POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Cadre de planification de la chaîne logistique basé sur la représentation des procédés pour l'amélioration de la rentabilité de l'industrie des pâtes et papiers
Auteur: Author:	Martin Laflamme-Mayer
Date:	2008
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Laflamme-Mayer, M. (2008). Cadre de planification de la chaîne logistique basé sur la représentation des procédés pour l'amélioration de la rentabilité de l'industrie des pâtes et papiers [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8186/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/8186/
Directeurs de recherche: Advisors:	Paul R. Stuart
Programme: Program:	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI®

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CADRE DE PLANIFICATION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE BASÉ SUR LA REPRÉSENTATION DES PROCÉDÉS POUR L'AMÉLIORATION DE LA RENTABILITÉ DE L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS

MARTIN LAFLAMME-MAYER
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (PH.D.)
(GÉNIE CHIMIQUE)
OCTOBRE 2008

© Martin Laflamme-Mayer, 2008.

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-47722-9
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-47722-9

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

CADRE DE PLANIFICATION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE BASÉ SUR LA REPRÉSENTATION DES PROCÉDÉS POUR L'AMÉLIORATION DE LA RENTABILITÉ DE L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS

présentée par : LAFLAMME-MAYER Martin
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor (Ph.D.)
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. SAMSON Réjean, Ph.D., président
M. STUART Paul, Ph.D, membre et directeur de recherche
M. PERRIER Michel, Ph.D., membre
M. GROSSMANN Ignacio, Ph.D., membre

DÉDICACE

À mes parents,

« Les neuf dixièmes de l'éducation reposent sur l'encouragement. »

Anatole France, Prix Nobel de Littérature (1844-1924)

REMERCIEMENTS

« It's a sign of mediocrity when you demonstrate gratitude with moderation. »

Roberto Benigni, Acteur Italien (1952 -)

Plusieurs personnes ont fait en sorte que les dernières années ont été pour moi une expérience personnelle extraordinaire. J'aimerais offrir mes remerciements les plus sincères :

À *Paul* pour m'avoir permis de vivre cette aventure unique qu'est le doctorat, ainsi que pour ta confiance et pour les nombreuses opportunités que tu m'as offertes au cours des dernières années.

À *Stratos* & *Nilay* qui m'ont donné l'opportunité de faire de la recherche au sein de leur groupe à Imperial College. Ce fut pour moi une expérience unique et très enrichissante.

À *Jason* pour ton support depuis le début. Ta participation a été un atout précieux pour mon doctorat.

À *Agnès* pour ton support, ta compréhension et ton amitié. Tu m'as beaucoup gâté et je t'en suis infiniment reconnaissant.

À *Matty* avec qui j'ai eu un malin plaisir à faire mon doctorat. En plus de « m'ouvrir » le chemin, tu es un partenaire DDC hors-pair (cette thèse n'a toutefois pas été écrite en Latex).

À *Sébastien* pour ton aide technique, psychologique et philosophique. Merci de partager avec moi ton Armagnac '85 et pour les discussions jusqu'à très tard dans la nuit (au grand dam de *Chantal* & *Caroline*).

À *Kevin & Sharon* pour votre appui, vos précieux conseils et vos délicieux soupers! Grâce à toi, *Kevin*, ma boîte à outils a toujours été bien remplie.

À *Steve*, *Ilich*, *Lucy*, *Geneviève*, *Ulrika*, *Virginie*, *Jean-Martin*, *Ian* et *Jean-Christophe*, mes compagnons d'armes et amis. Quel plaisir j'ai eu avec vous!

À *Deb*, *Oliver* & *Dan* mes « flatmates » et amis londoniens. Grâce à vous, j'ai découvert le PIMM'S et mon séjour à Londres a été des plus amusant.

À *Caroline* ma complice de tous les moments. Ton sourire, ton énergie et ton amour sont mes atouts les plus précieux! De belles choses s'offrent à nous dans l'avenir. Je t'aime!

À *Alain*, *Suzanne*, *Karine*, *Nicolas*, *Jacques* & *Hélène* pour les beaux moments et les aventures qu'on a partagés ensemble. Vous êtes pour moi une très grande source de fierté et de bonheur.

À tous mes amis et collègues qui font de la Chaire un groupe de recherche dynamique.

À la *Chaire CRNSG en Génie de Conception Environnementale*, *Le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies* et le *Center for Process Systems Engineering* à *Imperial College* pour leur appui financier.

RÉSUMÉ

L'industrie des pâtes et papiers (P&P) est depuis le début du 20e siècle l'un des piliers de la société canadienne. Étant donné la conjoncture hautement compétitive à laquelle elle est confrontée, il est de plus en plus difficile, sur la seule base de l'amélioration des technologies manufacturières, d'assurer son leadership tant sur les marchés régionaux que globaux. Cette industrie mature doit donc, afin de préserver sa valeur, développer ses compétences à gérer la complexité des opérations et des processus d'affaires à l'échelle de l'entreprise. La gestion de la chaîne logistique (SCM), qui offre un potentiel d'amélioration significatif en P&P, est considérée par plusieurs dirigeants comme une des solutions les plus prometteuses pour la survie de l'industrie.

Toutefois, comparée aux industries discrètes, elle a été plutôt tardive à reconnaître et à adopter la SCM et donc, peu de lignes directrices sont disponibles afin de l'aider dans l'application efficace des concepts reliés. Pour de telles industries de commodité, l'intégration des perspectives de l'usine et de l'entreprise est primordiale à la gestion efficace de la SC. Dans ce contexte, l'industrie des P&P bénéficierait grandement du développement d'outils qui lui permettrait de mieux représenter les procédés dans les problèmes de planification de la SC. Ce faisant, elle pourrait profiter de l'application d'une approche non conventionnelle de gestion de la SC axée sur les marges qui offre, spécialement dans des environnements d'affaires compétitifs, un potentiel d'amélioration de la rentabilité des opérations de la SC. Compte tenu de la convergence des systèmes d'information d'usine et d'entreprise et de la vaste quantité de données disponibles, les opportunités suivantes ont été identifiées : 1) utiliser les données de procédés des PIMS[1] afin de mieux caractériser les conditions d'opération, 2) intégrer les données de procédé et de coûts afin de relier les perspectives de production

---

[1] Système de gestion de l'information de procédé.

et d'affaires à l'usine et 3) incorporer ces informations pertinentes, reflétant le cycle manufacturier, dans les problèmes de planification de la SC afin de soutenir la prise de décisions à haut niveau.

L'objectif principal de ce projet était de démontrer les bénéfices, pour une industrie de commodité telle que les P&P, d'une approche axée sur les marges qui incorpore la capacité de production dans les problèmes de planification de la SC. Plus particulièrement, l'étude visait à montrer la valeur d'incorporer la connaissance du procédé pour la prise de décisions d'affaires 1) en utilisant une approche multidisciplinaire de modélisation des coûts reflétant l'impact des conditions d'opération, 2) en appliquant des outils avancés d'aide à la décision pour la gestion du flux de fibre dans la SC en P&P et enfin, 3) en incorporant la flexibilité des opérations à l'usine comme « outil » pour la gestion de la SC. Pour ce, il est faut souligner que le projet de recherche a été effectué à partir d'une étude de cas définie en étroite collaboration avec un partenaire industriel. Celle-ci consiste aux cycles d'approvisionnement en fibre, de production et de distribution/demande d'une usine existante de pâte commerciale à haut rendement.

Afin de relever le défi que représente l'intégration du cycle manufacturier au sein de la SC en P&P, un cadre de planification a été proposé dans ces travaux. Celui-ci, qui expose les exigences d'une approche ascendante de gestion de la SC, comporte trois phases importantes.

Premièrement, une approche de planification hiérarchique « en ligne », qui s'adapte aux processus réels de prise de décisions en tenant compte des niveaux décisionnels et de la nature de ces processus, a été développée. Au niveau supérieur, un modèle de planification agrégée de la capacité aide à déterminer une stratégie annuelle équilibrée de gestion de l'approvisionnement en fibre en fonction des prévisions de l'offre de fibres et de la demande de pâte. Au niveau inférieur, un modèle de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes

aide à déterminer, à plus court terme, le plan détaillé d'approvisionnement, la séquence optimale des campagnes de production et la sélection des commandes qui maximiseront la rentabilité des opérations de la SC. Les résultats obtenus montrent que les heuristiques de gestion typiquement appliquées ne sont valables que pour des environnements d'affaires spécifiques et que, dans ce contexte, des approches alternatives, basées sur l'utilisation d'outils d'aide à la décision, doivent être considérées.

Deuxièmement, une méthode a été proposée pour structurer et analyser les données clés de procédé et développer un modèle de coûts ascendant fournissant des informations plus transparentes pour l'évaluation des inducteurs de coûts. Un cadre de modélisation axé sur les opérations, qui met l'emphase sur l'analyse des liens entre l'utilisation des ressources, les activités dans le procédé et les objets de coûts (inspirée du ABC), améliore la traçabilité des coûts directs des opérations manufacturières en P&P. Les résultats obtenus montrent que, comparé aux méthodes traditionnelles d'évaluation des coûts, l'approche proposée permet de mieux caractériser la structure des coûts manufacturiers de l'usine, en fonction des diverses conditions qui influencent l'utilisation des ressources dans le procédé.

Troisièmement, le potentiel d'amélioration de la rentabilité d'une approche de gestion de la SC axée sur les marges a été démontré. Pour ce, deux stratégies potentielles de gestion, élaborées en collaboration avec le partenaire industriel, ont été considérées : la première vise à exploiter la flexibilité de la capacité de production afin de mieux aligner la production et la demande de pâte et la seconde, à exploiter la flexibilité des opérations (en fonction des ratios d'alimentation en copeaux) afin de soutenir des stratégies d'approvisionnement en fibre plus efficaces. Compte tenu de l'importance des compromis entre les perspectives de production et de la SC, cette approche axée sur les marges a été abordée en combinant les techniques de modélisation des coûts et de planification de la SC présentées plus tôt. Les résultats obtenus montrent que, contrairement aux pratiques de gestion « centrées sur la

production » et basées sur les recettes, l'utilisation pour la prise de décisions d'affaires d'information plus précise sur la production facilite l'application de stratégies plus rentables visant à mieux exploiter la capacité des procédés dans le contexte de la SC.

À la lumière des travaux de recherche effectués, trois contributions principales ont été identifiées :

1. Un cadre de planification de la SC qui assure, grâce à une approche analytique exploitant les données des PIMS dans un contexte d'affaires, la représentation adéquate du cycle manufacturier au sein de la SC et permet à l'industrie des P&P de bénéficier d'une approche de gestion de la SC axée sur les marges ;
2. Un outil d'aide à la décision pour la planification tactique et opérationnelle en P&P, aidant les décideurs à mieux évaluer les compromis et à gérer les complexités liées à la coordination efficace du flux de fibres dans la SC selon l'environnement d'affaires ;
3. Une approche de modélisation des coûts axée sur les opérations qui, en mettant l'emphase sur la perspective procédé comme source de génération des coûts dans les environnements continus de production, améliore la caractérisation des coûts directs en fonction des conditions d'opération dans les usines de P&P.

Finalement, il est important de souligner que les bénéfices de l'approche proposée ont été démontrés pour le cas d'un système industriel relativement simple. Or, pour des cas plus complexes, on peut s'attendre à ce que les opportunités d'amélioration de la rentabilité soient encore plus significatives. Enfin, bien qu'elle reconnaisse la SCM comme une avenue importante à exploiter, l'industrie papetière se doit d'être plus agressive vis-à-vis le développement de ses compétences à gérer la complexité de la SC. Outre l'amélioration de la rentabilité des opérations, l'implantation d'une capacité unique de SCM, intimement liée aux aspects organisationnels et stratégiques de l'entreprise, peut créer un avantage concurrentiel important et difficilement imitable.

ABSTRACT

The pulp and paper (P&P) industry has been one of the pillars of Canadian society since the beginning of the 20th century. Given the highly competitive business environment, it is increasingly challenging for this industry to compete based solely on the improvement of manufacturing technologies, in both regional and global markets. In order to preserve its value, this mature industry sector must develop its capability to manage the complexity of operations and business processes across the enterprise. Supply chain management (SCM), which offers a significant potential for improvement for the P&P industry, is considered by many executives as one of the most promising solutions for the survival of the industry.

Compared to discrete manufacturing, P&P companies have been rather late to recognize and adopt SCM and hence, few guidelines are available to assist them in the effective implementation of these concepts. For such a commodity-based industry, the integration of the mill and enterprise perspectives is critical to ensure the effective management of the SC. In this context, the P&P industry would greatly benefit from the development of tools that would improve the representation of its production processes in SC planning problems. By doing so, it could benefit from the application of a non-conventional margin-centric SCM approach that offers, especially in competitive business environments, a significant potential for improving the profitability of the SC operations. Given the convergence of information systems at the mill and enterprise levels, as well as the vast amount of data available, the following opportunities have been identified: 1) use lower-level process data, from the PIMS[2] at the mill, to better characterize the operating conditions, 2) integrate process and cost data in order to link the production and business perspectives at the mill and 3)

[2] Process information management system.

incorporate this relevant information, reflecting the manufacturing cycle, in SC planning problems to support higher-level decision making.

The main objective of this project was to demonstrate the benefits, for a commodity-product industry such as P&P, of a margin-centric approach that incorporates production capability in SC planning problems. More specifically, this study aimed to show the value of incorporating process knowledge for SC decision making by 1) using a multidisciplinary cost modeling approach reflecting the impact on cost of the process conditions at the mill, 2) applying advanced decision support tools to better manage the fibre SC in P&P and finally, 3) incorporating the manufacturing flexibility at the mill as a "tool" for managing the SC. To this end, the research project was carried out using a case study defined in close collaboration with an industrial partner. The case study consists of the fibre procurement, production and distribution/demand cycles of an existing high-yield market pulp mill.

To address the challenge of integrating the manufacturing cycle within the SC in P&P, a planning framework was proposed in this work. This framework outlines the requirements of a bottom-up SCM approach in three significant phases.

First, a multi-scale on-line planning approach, which fits the actual decision-making processes by taking into account their dynamic nature and the decision levels, was developed. At the higher level, an aggregate capacity planning model helps to find, given the available forecasts, the optimal balance between fibre supply and demand throughout the year. At the lower level, a campaign planning and order scheduling model helps to maximize short-term profitability given the SC capability and supply and demand orders. The results obtained show that the common heuristics typically used are only valid for specific business environments and that, in this context, alternative approaches based on the use of decision-support tools should be considered.

Second, a method has been proposed to structure and analyze key process and cost data and to develop a bottom-up cost model providing more transparent

information for the evaluation of cost drivers. An operations-driven cost model, which emphasizes the analysis of the links between resources, process activities and cost objects (ABC-like), improves the traceability of the direct manufacturing costs in P&P. The results obtained show that, compared to traditional cost accounting methods used at the mill, the proposed approach allows for better characterization of the cost structure of the mill, based on various process conditions that affect the use of resources.

Thirdly, the potential benefits of a margin-centric approach have been demonstrated. For this, two management strategies, elaborated in collaboration with the industrial partner, were considered: the first consists of varying the production capacity at the mill in order to reach a more profitable alignment between production and demand, and the second consists of exploiting the manufacturing flexibility at the mill (based on chips input ratios) in order to support more effective fibre supply procurement. Given the importance of the trade-offs between the mill and the SC performances, these margin-centric approaches have been addressed by combining the cost modeling and SC planning techniques discussed earlier. The results obtained show that, contrary to production-centric and recipe-based management practices, a better representation of the mill's operations at the SC level facilitates the implementation of more profitable strategies that better exploit the process capability in the context of the SC.

Based on the research work carried out, three main contributions have been identified:

1. A SC planning framework that ensures, through an analytical approach to exploiting the lower-level process data in a business context, the adequate representation of the manufacturing cycle within the SC and allows the P&P industry to benefit from a margin-centric SCM approach;

2. A SC decision support tool for the tactical and operational planning in P&P, helping decision makers to better evaluate the trade-offs and manage the complexity related to the effective coordination of the fibre SC, according to the business environment;
3. An operations-driven cost modeling approach that, given its emphasis on the process perspective as a source of costs in continuous manufacturing environments, improves the characterization of direct costs as a function of the operating conditions in P&P mills.

Finally, it is important to highlight that the benefits of the proposed approach were demonstrated for the case of a relatively simple industrial system (i.e. single factory, simple manufacturing process, a small number of grades, etc.). For more complex situations (e.g. several grades, several factories, specialty products), we can expect that the opportunities for improving the SC profitability will be even more significant. Finally, although it recognizes that SCM as an important avenue to exploit, the P&P industry must be more aggressive towards the development of its ability to manage the SC complexity. In addition to improving its overall profitability, the implementation of a unique SCM capability, closely linked to the organizational and strategic aspects of the company, can create a significant competitive advantage which is difficult to replicate.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace iv

Remerciements v

Résumé vii

Abstract xi

Table des matières xv

Liste des tableaux xx

Liste des figures xxi

Liste des symboles et abbréviations xxiv

Liste des annexes xxv

Chapitre 1: Introduction 1

1.1 Contexte *1*

1.2 Problématique *3*

1.3 Court sommaire des objectifs *5*

1.4 Programme de recherche de la Chaire en Génie de Conception Environnementale *6*

1.5 Collaborations *6*

1.6 Plan général de la thèse *8*

Chapitre 2: Revue de littérature 9

2.1 Concepts de gestion de la chaîne logistique *10*
2.1.1 Définition de la chaîne logistique 10
2.1.2 Définition de la gestion de la chaîne logistique 12
2.1.3 Cadre décisionnel de la chaîne logistique 14
2.1.4 Niveaux décisionnels 15
2.2 Application des concepts de SCM en P&P *17*
2.2.1 Contexte 17
2.2.2 Chaîne logistique de l'industrie des P&P 19
2.2.3 Défis d'implantation des concepts de SCM en P&P 20
2.2.4 Revue des travaux de recherche sur l'optimisation de la SC en P&P 24
2.3 Intégration des procédés dans les problèmes de SCM *26*
2.3.1 La SCM dans le contexte particulier de l'industrie des procédés 26
2.3.2 SCM : une approche basée sur l'ingénierie des systèmes de procédés 27
2.3.3 Problèmes de SCM dans l'industrie des procédés 30
2.4 Planification et ordonnancement de la SC *32*
2.4.1 Définitions 32
2.4.2 Programmation mathématique 33
2.4.3 Représentation du temps 34
2.4.4 Intégration de la planification et de l'ordonnancement 35
2.4.5 Approches de P&S « hors ligne » et « en ligne » 38
2.4.6 Représentation des procédés de production dans les problèmes de P&S 39
2.5 Rôle des technologies de l'information *41*
2.5.1 Systèmes transactionnels et analytiques 41
2.5.2 Approche ascendante basée sur l'analyse des données 42
2.6 Modélisation des coûts des opérations manufacturières *44*
2.6.1 Systèmes de coûts standard 45

2.6.2 Limitations des systèmes de coûts standard 46
2.6.3 Comptabilité par activités 47
2.6.4 Modélisation des coûts pour les environnements de production en continu 49
2.6.5 Applications pertinentes à l'industrie des procédés et des P&P 52

2.7 Synthèse de la revue de littérature 53

Chapitre 3: Méthodologie 59

3.1 Objectifs des travaux 59
3.1.1 Objectif principal 59
3.1.2 Objectifs spécifiques 59

3.2 Méthodologie de recherche 61

3.3 Définition de l'étude de cas 65
3.3.1 Description des opérations considérées de la SC 65
3.3.2 Description des processus actuels de planification de la SC 68

Chapitre 4: Synthèse 72

4.1 Liste des articles 72

4.2 Stratégie générale de la synthèse 73
4.2.1 Cadre de gestion de la chaîne logistique proposé 73
4.2.2 Organisation de la synthèse et lien avec les articles: 76

4.3 Planification de la SC (Phase A) 78
4.3.1 Cadre de planification hiérarchique « en ligne » 78
4.3.2 Caractérisation de l'agrégation 87
4.3.3 Application du cadre de planification hiérarchique « en ligne » 91

4.4 Modélisation des coûts axée sur les opérations (Phase B) 104

4.4.1 Approche de modélisation 105
4.4.2 Application de l'approche axée sur les opérations pour l'étude de cas 117

4.5 Approche de gestion de la SC axée sur les marges (Phase C) 127
4.5.1 Gestion flexible de la capacité de production pour une usine de pâte commerciale 128
4.5.2 Exploitation de la flexibilité des opérations pour une usine de pâte commerciale 136

Chapitre 5: Discussion générale 146

5.1 Approche de gestion de la SC axée sur les marges 146
5.1.1 Justification de la démarche employée pour la démonstration de l'approche générale 146
5.1.2 Implantation de l'approche axée sur les marges 147
5.1.3 Caractérisation « hors ligne » des structures de coûts 150

5.2 Planification de la SC 151
5.2.1 Outil décisionnel pour réagir rapidement aux imprévus 151
5.2.2 Défis liées à la résolution des problèmes 152
5.2.3 Démonstration des propriétés d'agrégation 153

5.3 Modélisation des coûts 153
5.3.1 Approche de modélisation pour supporter les problèmes de SC 153
5.3.2 Gestion des coûts & étalonnage des usines 154
5.3.3 Interprétation des régimes d'opération à l'échelle de l'usine 155

Chapitre 6: Conclusions 156

6.1 Conclusions 156

6.2 Contributions 158

6.2.1 Cadre de planification de la SC axé sur les marges en P&P 158
6.2.2 Outils d'aide à la planification de la SC 159
6.2.3 Modélisation des coûts axée sur les opérations 160

6.3 Travaux futurs 161

6.3.1 Planification de la SC multi-usines 161
6.3.2 Incertitudes liées à l'environnement d'affaires 161
6.3.3 Niveau 3 : vers l'optimisation en temps réel des opérations de l'usine 162
6.3.4 Intégration des aspects financiers 162
6.3.5 Raffinement du modèle de coûts élaboré 163
6.3.6 Qualité des données de procédé 163

Références 165

Annexes 176

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Niveaux décisionnels considérés par la gestion de la chaîne logistique .. 16
Tableau 2.2 : Particularités et différences importantes de la SC en P&P 21
Tableau 2.3 : Avantages et inconvénients de la programmation mathématique 34
Tableau 4.1 : Description des articles 77
Tableau 4.2 : Efficacité de résolution des modèles de niveaux 1 & 2 93
Tableau 4.3 : Comparaison des profits optimaux obtenus pour les approches intégrée et non intégrée 100
Tableau 4.4 : Différentes stratégies de gestion de la capacité lorsque le marché de la pâte est défavorable 131
Tableau 4.5 : Différentes approches de planification dans le contexte de l'approvisionnement en fibre 140

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Plan de la revue de littérature 9
Figure 2.2 : La chaîne logistique 12
Figure 2.3 : Cadre décisionnel de la chaîne logistique 15
Figure 2.4 : Niveaux décisionnels et processus de gestion de la chaîne logistique 17
Figure 2.5 : Représentation générale de la chaîne logistique de l'industrie des P&P 19
Figure 2.6 : Classification des publications scientifiques portant sur l'optimisation de la SC en P&P 25
Figure 2.7 : Expansion du champ d'application du PSE le long de la « chaîne d'approvisionnement des chimiques » 28
Figure 2.8 : Niveaux de contrôle et de gestion de la SC 29
Figure 2.9 : Représentation discrète et continue du temps 35
Figure 2.10 : Illustration de la technique basée sur un horizon de temps roulant 37
Figure 2.11 : Concept du modèle d'affaires ascendant 44
Figure 2.12 : Le principe de la comptabilité par activités 48
Figure 3.1 : Stratégie de recherche adoptée 63
Figure 3.2 : Étude de cas : Cycles d'approvisionnement, de production et de demande d'une usine de pâte commerciale à haut rendement 68
Figure 4.1 : Cadre de planification de la SC axé sur les marges 76
Figure 4.2 : Représentation du cadre de planification hiérarchique « en ligne » et de son intégration au sein de la structure organisationnelle de l'entreprise 81
Figure 4.3 : Application, pour un mois donné, du cadre de planification hiérarchique « en ligne »; intégration des modèles de niveau 1 et 2 86
Figure 4.4 : Résultats de l'application de la méthode d'évaluation du AMI, pour un problème de détermination de grandeur des lots 90

Figure 4.5 : Validation pratique des propriétés d'agrégation des modèles développés 94
Figure 4.6 : Effet de l'environnement d'affaires sur la rentabilité de la SC 96
Figure 4.7 : Amélioration du profit réalisée en utilisant une approche de planification basée sur l'optimisation 97
Figure 4.8 : Comparaison des plans de production selon l'heuristique et optimisé 98
Figure 4.9 : Application de l'approche hiérarchique au Cas #7 101
Figure 4.10 : Impact de la situation d'approvisionnement à long terme sur la stratégie de gestion des inventaires à court terme 102
Figure 4.11 : Évolution du plan de production (niveau 2) au fur et à mesure que de nouvelles informations sur les commandes sont disponibles 104
Figure 4.12 : Étapes pour la modélisation des coûts axée sur les opérations 105
Figure 4.13 : Phase de description 108
Figure 4.14 : Cadre de modélisation des coûts axée sur les opérations 112
Figure 4.15 : Exemple illustrant les principales fonctions devant être exécutées pour le calcul des coûts d'un PWC 116
Figure 4.16 : Représentation schématique de l'application de la méthode OdCM pour l'étude de cas 119
Figure 4.17 : Coûts manufacturiers directs de l'un des principaux grades de pâte 120
Figure 4.18 : Contribution de chaque PWC aux coûts directs normalisés de production (run 8) 123
Figure 4.19 : Analyse particulière des coûts d'un PWC basée sur les conditions spécifiques à chaque campagne de production 123
Figure 4.20 : Interprétation des régimes d'opération, sur la base des deux principaux attributs identifiés 126
Figure 4.21 : Résultats de la modélisation des coûts basée sur les régimes d'opération identifiés 127

Figure 4.22 : Coûts manufacturiers basés sur l'analyse des conditions d'opérations.. 130
Figure 4.23 : Gestion de la capacité pour des situations d'affaires caractérisées par la faiblesse des prix de la pâte 133
Figure 4.24 : Détermination de l'alignement optimal entre la capacité de production et la demande de pâte 134
Figure 4.25 : Effet de la structure des coûts manufacturiers sur l'alignement optimal entre la capacité de production et la demande profitable 135
Figure 4.26 : Effet de la structure des coûts de production sur le profit réalisé lorsque des commandes supplémentaires sont acceptées 136
Figure 4.27 : Implication sur les coûts des ratios d'alimentation en copeaux 138
Figure 4.28 : Coûts de production calculés, basés sur les informations de procédé, pour chaque scénario de recette considéré 139
Figure 4.29 : Bénéfices liés à l'exploitation de la flexibilité des opérations 142
Figure 4.30 : Compromis entre les coûts d'approvisionnement et de production 143
Figure 4.31 : Impact sur la rentabilité de structures de coûts moins flexibles 144
Figure 4.32 : Exemple démontrant que la flexibilité des opérations peut supporter des stratégies particulières d'approvisionnement 145
Figure 5.1 : Clarification de l'approche d'intégration des outils développés 147
Figure 5.2 : Architecture pour l'implantation de l'approche globale axée sur les marges 149

LISTE DES SYMBOLES ET ABBRÉVIATIONS

« Le langage est source de malentendus. »

Antoine de Saint Exupéry, Le Petit Prince (1900-1944)

ABC	Comptabilité par activités
AMI	Minimum du niveau d'inventaire moyen
BCTMP	Pâte chimico-thermomécanique blanchie
BDR	Base de données relationnelle
DM	Exploration des données
ERP	Progiciel de gestion intégré
IT	Technologie de l'information
KDD	Extraction de connaissance dans les bases de données
KPI	Indicateurs de performance clé
MILP	Programmation linéaire et en nombres entiers
OdCM	Modèle de coûts axé sur les opérations
OEE	Taux de rendement global
OF	Niveau de satisfaction de la demande
OWC	Centre d'activités des coûts indirects
P&P	Pâtes et papiers
P&S	Planification et ordonnancement
PI	Intégration des procédés
PIMS	Système de gestion de l'information de procédé
PSE	Ingénierie des systèmes de procédés
PWC	Centre d'activités de procédé
SC	Chaîne logistique
SCM	Gestion de la chaîne logistique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Methodology for using real-time process data for cost modeling and supply chain decision support in the pulp and paper industry 177

ANNEXE B Development of an operations-driven cost model for continuous processes Part I: Framework for design and operations decision making 185

ANNEXE C Development of an operations-driven cost model for continuous processes Part III: Application for pulp and paper manufacturing operations..... 203

ANNEXE D Multi-scale on-line supply chain planning Part A: Decision processes and framework for a high-yield pulp mill..... 228

ANNEXE E Multi-scale on-line supply chain planning Part B: Model formulation and test case results 247

ANNEXE F On the evaluation of minimum inventory levels for aggregate planning..... 300

ANNEXE G Capacity management for market pulp production..... 318

ANNEXE H Manufacturing flexibility to support cost effective fibre supply 330

ANNEXE I Supplément de littérature..... 343

ANNEXE J Extensions au modèle de planification opérationnelle de la SC - Flexibilité de la capacité de production 348

ANNEXE K Extensions au modèle de planification opérationnelle de la SC – sélection des scénarios de recette 353

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

« Engineering is not merely knowing and being knowledgeable, like a walking encyclopedia; engineering is not merely analysis; engineering is not merely the possession of the capacity to get elegant solutions to non-existent engineering problems; engineering is practicing the art of the organized forcing of technological change... Engineers operate at the interface between science and society... »

Dean Gordon S. Brown, Professeur de Génie Électrique - MIT (1907-1996)

1.1 Contexte

Au Canada, la forêt s'étend sur près de la moitié territoire et constitue une véritable richesse naturelle presque entièrement de propriété publique et donc, réglementée par les gouvernements. L'industrie forestière est depuis le début du 20e siècle l'un des piliers de la société canadienne. En fait, selon le Gouvernement du Canada [1] et l'Association des Produits Forestiers du Canada [2], cette industrie fournit à elle seule approximativement 900 000 emplois directs et indirects soit quelques 5.3% du total canadien. Elle soutient les économies locales de quelques 300 communautés où, dans de nombreux cas, elle est la seule grande industrie présente. Elle participe aussi à 2.9% du produit intérieur brut et génère, avec près de 31.9 milliards de dollars, la plus grande contribution à la balance commerciale nette du Canada. En plus, avec 16% des échanges internationaux totaux, le Canada est le premier exportateur de produits forestiers au monde. En terme de foresterie durable, cette industrie a su aussi démontrer son leadership mondial; 40% des forêts certifiées dans le monde sont canadiennes et ce, bien que le couvert forestier canadien ne représente que 10% du total des forêts de la planète. Étant donné les enjeux importants liés à l'exploitation de cette ressource naturelle, tant des points de vue économique que social et environnemental, la performance de ce secteur industriel est un enjeu important pour le Canada.

En ce début de 21e siècle, l'industrie canadienne des pâtes et papiers (P&P) traverse une période qui, étant donnée la conjoncture de plusieurs facteurs défavorables, est considérée par plusieurs comment étant la « tempête parfaite ». Ces facteurs consistent notamment en l'affaiblissement de la demande nord-américaine des produits P&P, les difficultés d'approvisionnement en fibre de bois bon marché (surtout dans l'Est Canadien), l'augmentation des coûts énergétiques, le recul relatif de la performance des opérations manufacturières sur une base mondiale, la surcapacité récurrente et le manque de discipline en terme de gestion de l'offre de produits sur le marché, le conflit canado-américain sur le bois d'œuvre, l'appréciation de la devise canadienne par rapport au dollar américain et enfin, la mauvaise perception de l'industrie par les marchés boursiers [3-6]. Puisque basée principalement sur la vente de produits de commodité dans un marché mature, l'industrie des P&P n'est pas en mesure de refiler, à tout le moins, une partie de cette augmentation des coûts à ses clients et ultimement, aux consommateurs. En fait, les prix des produits P&P sont largement déterminés par les coûts marginaux des producteurs ce qui, considérant le contexte global, crée un environnement propice aux producteurs à bas coûts pour s'attaquer aux marchés nord-américains [7] .

Afin d'améliorer leur performance économique, les compagnies papetières ont investi de nombreux efforts dans la restructuration et ce, tant au niveau des opérations que pour les investissements et les aspects financiers. Il est néanmoins extrêmement difficile pour celles-ci de fournir un rendement minimum sur les investissements pouvant assurer leur survie. Dans un tel environnement d'affaires, d'importants défis devront être relevés afin d'assurer le retour vers une meilleure santé financière. Puisque peu de fonds sont typiquement disponibles pour des projets d'investissements, l'industrie met l'emphase sur l'analyse systématique de ses activités (procédés manufacturiers et processus) avec pour objectif d'agir sur les sources de revenus et de coûts. Aux usines, cela implique l'évaluation et la comparaison des performances

(« *benchmarking* »), l'amélioration de l'efficacité des opérations, la restructuration des processus d'affaires et l'adoption d'une structure de coûts leur permettant non seulement de rester rentable mais surtout, d'attirer les investissements à long terme nécessaires à leur survie et compétitivité future.

Étant donné l'importance grandissante de la compétitivité des coûts tout au long de la chaîne logistique (SC), les hauts dirigeants en P&P reconnaissent d'emblée la gestion de la SC (SCM) comme étant l'une des principales priorités à aborder [8]. Vu la complexité du système à considérer, qui incorpore l'ensemble des unités d'affaires et des flux (information, matière et argent) nécessaires afin de se procurer les matières premières, de produire la pâte et le papier et de livrer les produits finaux aux clients, la gestion de la SC ne peut clairement pas être livrée au hasard. L'application des concepts de SCM, visant la création de valeur par la conception, la coordination et la gestion des unités d'affaires et des flux, permet de réduire de façon significative les coûts et les inventaires et de saisir le potentiel des synergies liées à l'intégration et à la gestion intra- et inter-compagnies. Étant donné la maturité de l'industrie des P&P, ces approches offrent un réel potentiel d'amélioration et constituent une des solutions les plus prometteuses afin de préserver la compétitivité tant sur les marchés local que global.

1.2 Problématique

Afin de réaliser ce potentiel de gestion de la chaîne logistique, l'industrie des P&P doit se questionner sur la pertinence de son approche de gestion basée essentiellement sur l'utilisation maximale de la capacité des usines et aussi, améliorer la coordination de ses unités d'affaires, typiquement gérées en « silo », le long de la SC. L'intégration de l'information et l'utilisation d'outils d'aide à la décision, à différents niveaux décisionnels, permettrait d'améliorer la rentabilité globale de la SC grâce à une meilleure gestion des compromis complexes tels que l'efficacité du cycle

manufacturier versus l'efficacité d'approvisionnement et la demande profitable. Qui plus est, puisqu'elle est difficile à répliquer, l'élaboration d'une stratégie unique de gestion de la SC, impliquant le développement de compétences et d'outils avancés, constitue une source importante d'avantage compétitif.

Ayant été majoritairement développés dans le contexte des industries discrètes, l'implantation de ces outils de gestion comporte, dans l'industrie des procédés, de nombreux défis. C'est le cas de l'industrie des P&P qui, étant donné les particularités de ses opérations manufacturières, a reçu peu d'indications pouvant l'aider dans l'application des concepts de SCM. Étant donné le rôle clé joué par le cycle manufacturier dans la SC des industries de procédés continus, l'élaboration d'approches SCM doit être appuyée par la connaissance des enjeux liés aux procédés de production. Pour ce, la recherche en ingénierie des systèmes de procédés (PSE) et en intégration des procédés (IP) vise à, entre autres, à aider l'industrie des procédés à mieux aborder la planification des opérations manufacturières dans le contexte de la SC.

Pour les grandes industries de procédés axées sur les marges, l'intégration efficace des procédés d'opérations et des processus d'affaires est primordiale afin de pleinement réaliser l'optimisation de la SC. En P&P, les technologies de l'information (IT) ont rendu disponible une vaste quantité de données, aux usines et au corporatif, à partir desquelles il est possible d'extraire des informations caractérisant à la fois ces procédés manufacturiers et ces processus d'affaires. Toutefois, les données de procédés ne sont pas bien exploitées pour la prise de décisions reliée à la SC; les décisions d'affaires à haut niveau ne sont basées que sur des informations agrégées de production. Compte tenu de la convergence des systèmes d'information d'usine et

d'entreprise, il y a une opportunité 1) d'utiliser les données de procédés des PIMS[3] afin de mieux caractériser les conditions d'opération, 2) d'intégrer les données de procédé et de coûts afin de relier les perspectives de production et d'affaires à l'usine et, 3) d'incorporer ces informations pertinentes, reflétant le cycle manufacturier, dans les problèmes de planification de la SC afin de soutenir la prise de décisions à haut niveau. Contrairement aux pratiques de gestion axées sur l'utilisation de la capacité de production, ces approches permettraient de mieux exploiter les compromis entre les cycles de la SC ce qui, dans la situation actuelle, est un aspect critique afin d'assurer la rentabilité des opérations.

1.3 Court sommaire des objectifs

L'objectif principal de ce projet est de démontrer les bénéfices, pour une industrie de commodité telle que les P&P, d'une approche axée sur les marges qui incorpore la capacité de production dans les problèmes de planification de la SC. Plus particulièrement, l'étude montre la valeur d'incorporer la connaissance du procédé pour la prise de décisions d'affaires 1) en utilisant une approche multidisciplinaire de modélisation des coûts visant à mieux refléter l'impact des conditions d'opération, 2) en appliquant des outils avancés d'aide à la décision pour la gestion du flux de fibre dans la SC en P&P et enfin, 3) en incorporant la flexibilité des opérations à l'usine comme « outil » pour la gestion de la SC.

Le projet de recherche décrit dans cette thèse a été effectué à partir d'une étude de cas définie en étroite collaboration avec un partenaire industriel. Celle-ci consiste aux cycles d'approvisionnement en fibre, de production et de distribution/demande d'une usine existante de pâte commerciale à haut rendement. Les objectifs spécifiques

---

[3] Système de gestion de l'information de procédé

établis avec les gestionnaires principaux de l'usine et de la SC consistaient à analyser et comprendre la structure des coûts de l'usine et à fournir la visibilité requise pour la gestion optimale de la fibre, le long de la chaîne logistique.

1.4 Programme de recherche de la Chaire en Génie de Conception Environnementale

Ce projet a été réalisé dans le cadre du programme en intégration des procédés pour l'industrie papetière de la Chaire CRSNG en génie de conception environnementale de l'École Polytechnique de Montréal. Au cours de son premier mandat, qui a débuté en 2000, la Chaire visait à acquérir une solide compétence dans les principes fondamentaux d'un large éventail de technologies d'intégration des procédés critiques pour la compétitivité à long terme de l'industrie des P&P. Plusieurs domaines de recherche ont été abordés par le groupe dont la dynamique des procédés, le traitement de l'information, l'énergie et l'environnement et la modélisation d'entreprise. La présente thèse appartient essentiellement au dernier de ces volets dont l'objectif principal consistait à développer des techniques de prise de décisions basées sur la connaissance des procédés manufacturiers, pour la résolution de problématiques particulières à l'industrie des P&P (et ce, tant dans le contexte de gestion des opérations que pour la conception des procédés).

1.5 Collaborations

Un des défis de la recherche en conception, et donc de ce projet, consiste en la nécessité d'adopter une approche multidisciplinaire et à l'intégration de plusieurs outils afin de répondre à une problématique industrielle spécifique. Conséquemment, il est nécessaire de souligner les collaborations qui ont permis de mener à bien ce projet de recherche. Chacun des collaborateurs introduits ci-dessous a été co-auteur d'un ou de plusieurs des articles reliés à cette thèse.

Tout d'abord, l'accès au contexte P&P (contacts, usine, données, etc.) ainsi que la réalisation de l'étude de cas ont été possible grâce au support de la compagnie Tembec Inc. Plus particulièrement, les aspects stratégiques ainsi que la problématique réelle, qui ont fortement inspirés ce projet de recherche, ont été établis avec l'appui de Jason Linkewich, VP Stratégie d'approvisionnent de la fibre. Il est aussi important de mentionner la participation de Steve Raymond en tant qu'expert lié au procédé manufacturier de l'usine étudiée. Enfin, tout au long du projet, plusieurs intervenants ont été consultés afin d'assurer la pertinence pratique de l'approche élaborée, du point de vue P&P. Parmi ceux-ci, il est nécessaire de souligner la participation de Kevin Riemer qui a non seulement contribué en tant qu'expert en P&P mais aussi, dans plusieurs autres volets de l'étude.

Au niveau des technologies, l'approche de modélisation des coûts a été développée avec le soutien de 3C Software Inc. et, plus spécifiquement, grâce à la participation de Paul Naliwajka, expert en implantation de systèmes de gestion des coûts. Aussi, la collaboration effectuée avec Sébastien Lafourcade, de Pepite Inc., a permis d'obtenir le support nécessaire à l'application des techniques de fouille de données et aussi, de bénéficier de conseils pour l'analyse des données de procédés dans les usines papetières.

De façon générale, le développement de l'approche ascendante de modélisation pour le support à la prise de décisions a été fait en étroite collaboration avec Matty Janssen (Doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2007). Tandis que les travaux de la présente thèse mettent l'emphase sur les opérations et leur gestion, le projet de recherche de Matty portait d'avantage sur la conception des procédés. Entre autres, il a démontré le potentiel d'application de l'approche sophistiquée de modélisation des coûts pour l'analyse de la rentabilité de grands projets d'investissements, en rétro-installation, dans les usines papetières [9].

Enfin, tous les travaux présentés dans cette thèse ont été exécutés sous la supervision du Professeur Paul Stuart, à l'École Polytechnique de Montréal. De plus, les articles IV, V, VI, qui portent sur le développement du modèle de planification de la SC, résultent d'une collaboration avec le « Centre for Process Systems Engineering » à Imperial College London, sous la co-supervision des Professeurs Stratos Pistikopoulos and Nilay Shah.

1.6 Plan général de la thèse

La suite de cette thèse contient cinq chapitres qui sont structurés de la façon suivante. Tout d'abord, une revue des concepts et des travaux de recherche pertinents dans le cadre de cette recherche est exposée au Chapitre 2. Ensuite, le Chapitre 3 décrit les objectifs principaux et les diverses étapes du projet et aussi, fournit plus de détails quant à l'étude de cas considérée. Le Chapitre 4 présente une synthèse des travaux effectués et des principaux résultats correspondants aux articles fournis en annexe de cette thèse. Les implications et limitations de l'approche globale élaborée sont discutées au Chapitre 5. Enfin, le Chapitre 6 souligne les conclusions importantes et contributions principales et, suggère quelques recommandations pour la poursuite de travaux futurs.

CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE

« Nous sommes comme des nains juchés sur des épaules de géants, de telle sorte que nous puissions voir plus de choses et de plus éloignées que n'en voyaient ces derniers. Et cela, non point parce que notre vue serait puissante ou notre taille avantageuse, mais parce que nous sommes portés et exhaussés par la haute stature des géants. »

Bernard de Chartres, Philosophe (XIIe siècle)

Ce chapitre fournit une revue des travaux pertinents et des perspectives clés mis de l'avant par divers auteurs et à partir desquels diverses opportunités de recherche ont été identifiées. La Figure 2.1 présente les différents sujets de recherche abordés dans chaque section et indique les principaux liens entre celle-ci.

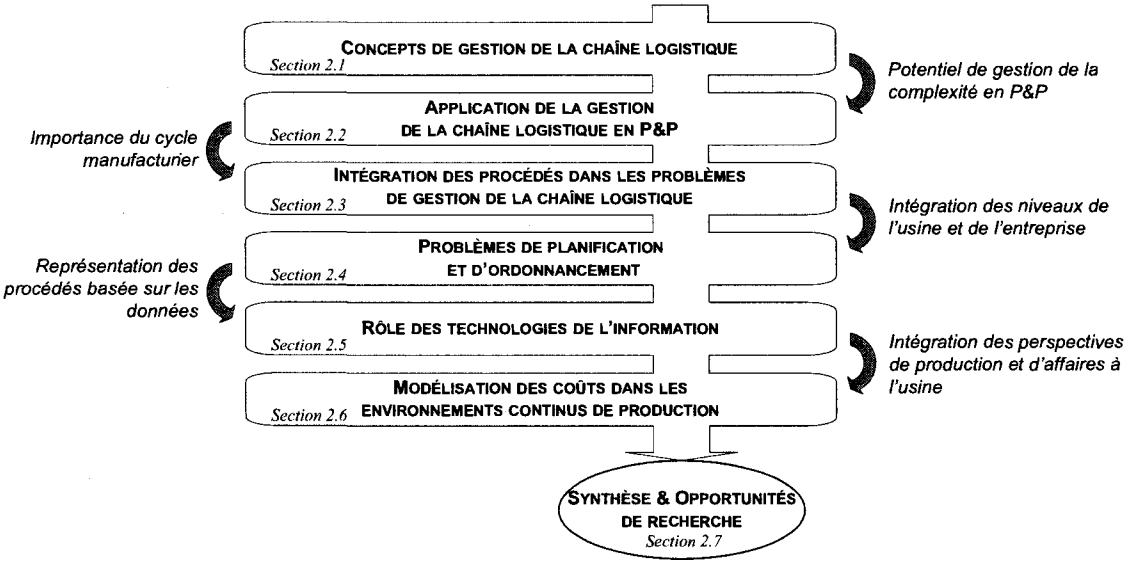


Figure 2.1 : Plan de la revue de littérature

2.1 Concepts de gestion de la chaîne logistique

2.1.1 Définition de la chaîne logistique

Étant donné l'intérêt relativement récent vis-à-vis les concepts de chaîne logistique, aucune définition précise ne semble faire consensus jusqu'à présent. Néanmoins, plusieurs auteurs, académiciens et praticiens, ont proposé leur définition de la chaîne logistique [10-16]. À titre d'exemple, le Dictionnaire APICS [17] décrit la chaîne logistique comme :

> *« un réseau global, des matières premières jusqu'au client ultime, constitué de flux structurés d'information, de distribution physique et d'argent et utilisé pour la livraison d'un produit ou service»*[4].

Dans tous les cas, il faut souligner certains éléments clés inclus dans ces définitions :

- L'intégration des activités et unités d'affaires, des flux d'information, d'argent et de matières;
- La complexité du réseau;
- La perspective cycle de vie;
- La livraison d'un bien ou service à un client ultime.

---

[4] Traduction libre.

La définition de la Chaîne Logistique (SC) adoptée dans le cadre de cette thèse est :

> Un système constitué de diverses activités et unités d'affaires, connectées en réseau par des flux de matières, d'énergie, d'information et d'argent, et permettant l'approvisionnement en matières premières, la production et la livraison d'un bien aux clients.

La Figure 2.2 montre une représentation conceptuelle d'une SC incorporant les cycles d'approvisionnement, de production, de distribution et de demande, ainsi que les flux essentiels au bon fonctionnement de celle-ci. L'envergure des chaînes logistiques considérées varie considérablement selon les études [13, 18]. Aussi, on distingue typiquement deux grandes perspectives : 1) une approche centralisée sur l'entreprise (intra-compagnie) et 2) une approche considérant la chaîne logistique étendue (inter-compagnies) [18, 19]. Dans tous les cas, la SC comprend, à son plus haut niveau d'abstraction, deux processus holistiques principaux: la planification de la production et le contrôle des inventaires et, la distribution et les processus logistiques [20, 21]. Bien que ces deux dimensions doivent être intégrées efficacement afin d'atteindre les objectifs de performance globaux, les travaux présentés dans cette thèse mettent essentiellement l'emphase sur la première dimension. Comme nous le verrons pour l'industrie des procédés, étant donné le rôle critique du cycle manufacturier (production à grande échelle, larges capitaux investis), les enjeux spécifiques liés à la planification de la production et des inventaires constituent des défis importants pour la gestion de la SC.

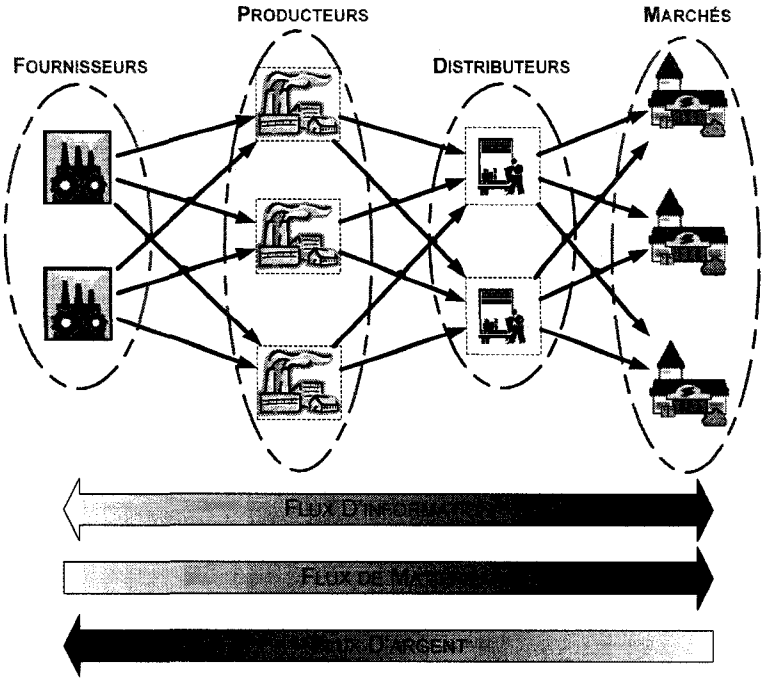


Figure 2.2 : La chaîne logistique

2.1.2 Définition de la gestion de la chaîne logistique

Bien qu'il soit possible de retracer les fondements de la gestion de la chaîne logistique dans les années 60, le terme lui-même fut introduit pour la première fois par des consultants dans les années 80 [13, 18, 22]. Ce n'est qu'un peu plus tard, dans les années 90, que la gestion de la chaîne logistique a véritablement suscité l'intérêt des chercheurs et gestionnaires d'entreprises et ce, dû principalement à l'augmentation de la compétition régionale et internationale, à la diminution du nombre de compagnies intégrées verticalement[5] et à la conscientisation au fait que l'optimisation locale des activités se fait le plus souvent au détriment de la performance globale de la SC [23]. Depuis, on a pu observer un véritable essor du développement de ces concepts et de

[5] Le terme « intégration verticale » réfère ici au fait que plusieurs unités d'affaires de la SC sont sous le contrôle d'une même compagnie.

l'application réussie de ceux-ci par des compagnies telles que Wal-Mart, Procter & Gamble, Caterpillar, IBM, Dow Chemical et Hewlett-Packard [10, 23-25].

La définition de la *Gestion de la Chaîne Logistique (SCM)* adoptée dans le cadre de cette thèse résume les aspects clés soulignés par divers auteurs [10, 11, 13, 18, 26]:

> La conception, coordination et gestion intégrée des flux et des unités d'affaires de la chaîne logistique afin de satisfaire la clientèle visée, maximiser la rentabilité et créer un avantage compétitif durable.

Essentiellement, elle consiste en une approche holistique visant un objectif commun et où la SC, constituée de sous-systèmes intégrés, est considérée comme une entité à part entière possédant ses concepts spécifiques de gestion [13, 27]. Le succès d'une SC est donc mesuré non pas sur la base du succès individuel des partenaires mais plutôt de façon globale [12, 20]. Comparée à une approche plus traditionnelle de gestion, la gestion de la chaîne logistique met l'emphase sur des éléments tels que le partage d'information entre les unités d'affaires dans la SC, la réactivité des opérations, la planification et la coordinations des opérations à l'échelle de la SC, la minimisation du coût global des opérations et le partage des risques et bénéfices [28].

Du point de vue de l'implantation des concepts de SCM, il est essentiel de faire la distinction entre la gestion physique et technique et la gestion des relations et des comportements [22, 29]. Bien que la gestion physique et technique inclus les éléments les plus tangibles (e.g. les méthodes de planification, les flux et opérations, la structure organisationnelle, etc.), le succès de l'application des concepts de SCM est fortement influencé par des aspects humains tels que la résistance aux changements et les relations et comportements des individus. Étant donné la nature dynamique et fragile de ces relations, il peut être très difficile de développer et de maintenir les liens

entre les partenaires de la chaîne logistique [14]. Toute initiative de SCM doit donc être fondée sur la compréhension de ces aspects et de leur interdépendance [22]. Ceci étant mentionné, les travaux de cette thèse visent à l'amélioration de la gestion physique et technique et, par conséquent, les aspects reliés à la gestion des relations et comportement, bien qu'importants, ne seront pas discutés davantage.

2.1.3 Cadre décisionnel de la chaîne logistique

Étant donné la complexité des SC, leur gestion intégrée peut être une source importante d'avantages concurrentiels qui ne peut pas être facilement répliqués [14]. Afin de développer cette habileté (i.e. gérer la complexité), chacun des éléments du cadre décisionnel présenté à la Figure 2.3 [12] doit être systématiquement abordé.

La combinaison adéquate de la structure de la SC et des inducteurs clés, soit l'information, le transport, les inventaires et les installations, permet de créer une capacité unique de gestion. Celle-ci détermine un équilibre entre les performances d'efficacité (i.e. coûts) et de réactivité (i.e. service aux clients)[6]. Aussi, il est donc primordial d'assurer la consistance entre la stratégie de SCM adoptée et la stratégie concurrentielle ciblée [30]. Cet alignement stratégique assure que l'ensemble des efforts déployés tout au long de la chaîne soient orientés vers un même objectif et répondent aux besoins de la clientèle visée [12, 23].

---

[6] Par exemple, beaucoup de compagnies papetières nord-américaines visent à réduire leur base de coûts afin d'assurer leur compétitivité sur une base globale. Conséquemment, elles cherchent à optimiser leur SC afin d'en améliorer l'efficacité globale et cela implique, par exemple, d'identifier quel grade est le plus rentable étant donné diverses conditions spécifiques tel que les coûts de la fibre de bois, de production, de transport et les prix de vente pour différents clients. Le secteur de l'emballage est un bon exemple d'entreprises qui sont plus préoccupées par la réactivité de la SC. Dans ce cas, la stratégie de SC met davantage l'accent sur le service à la clientèle et donc, en général, des services sur mesure sont offerts afin d'offrir une valeur supérieure pour les clients ou même, l'utilisateur final.

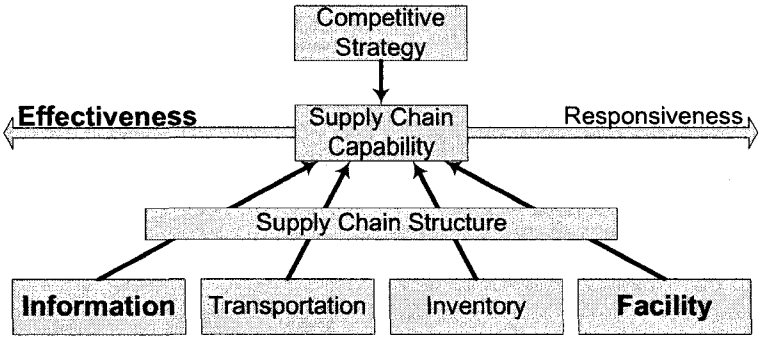


Figure 2.3 : Cadre décisionnel de la chaîne logistique

Dans la présente étude, trois éléments du cadre décisionnel sont particulièrement abordés : le développement de méthodes et d'outils analytiques permettant une meilleure utilisation des données d'usine (« information »), la représentation du cycle manufacturier au sein des problèmes de gestion de la SC (« facility ») et la maximisation de la rentabilité des opérations de la SC en P&P (« effectiveness»).

2.1.4 Niveaux décisionnels

Dépendamment de l'horizon de temps considéré et de l'importance des décisions à prendre, on différencie trois niveaux décisionnels : les niveaux stratégique, tactique et opérationnel [10, 12, 16]. Comme on peut le voir au Tableau 2.1, les décisions stratégiques fixent des contraintes pour les décisions tactiques qui, à leur tour, définissent des contraintes à considérer au niveau opérationnel. Chacun de ces niveaux décisionnels a un impact significatif sur la rentabilité globale et le succès de la SC.

Tableau 2.1 : Niveaux décisionnels considérés par la gestion de la chaîne logistique (adapté de Stadtler & Kilger [10] et Chopra & Meindl [12])

Niveau Décisionnel	Horizon de Temps	Description
Stratégique	Long terme (~plusieurs années)	– Conception de la structure de la chaîne logistique – Prévisions requises à long-terme – Exemples: localisation et capacité des usines, choix d'un progiciel de gestion intégré (ERP)[7], etc.
Tactique	Moyen terme (~6 à 24 mois)	– Structure fixée (au niveau stratégique) de la SC et considérée comme une contrainte – Prévisions requises à moyen terme – Définition des politiques d'opération qui gouverneront les décisions à court terme et qui tiennent compte de la flexibilité inhérente de la SC – Exemples: les politiques reliées aux inventaires, allocation de la demande aux différentes usines, etc.
Opérationnel	Court terme (~jours, semaines)	– Prévisions précises possédant le plus haut niveau de détails – Activités spécifiques et instructions détaillées pour l'exécution et le contrôle des opérations – Exploitation de la réduction de l'incertitude et optimisation des performances en tenant compte des contraintes liées aux politiques d'opération et à la structure de la SC – Exemples: allocation de commandes spécifiques à la production, génération des listes de livraison, etc.

La Figure 2.4 montre, pour les trois niveaux décisionnels mentionnés, certains processus de gestion typiques pour chacun des cycles de la SC. Au niveau stratégique, les processus de planification dans la SC sont intimement reliés puisque, pour prendre des décisions, telles que l'introduction d'un nouveau produit, il faut aussi considérer les

[7] Les ERP permettent l'automatisation des processus administratifs (« back office ») et couvrent généralement les aspects transactionnels de l'entreprise.

aspects liés à la capacité de production, la distribution et le transport vers les marchés et les besoins en matières premières. Aux niveaux tactique et opérationnel, les processus de planification tendent à être plus modulaires. Aussi, de façon générale, plus l'horizon de temps est court, plus le niveau de détails considéré est grand. Enfin, il est important d'assurer le partage de l'information tout au long de la SC ainsi qu'entre les niveaux décisionnels.

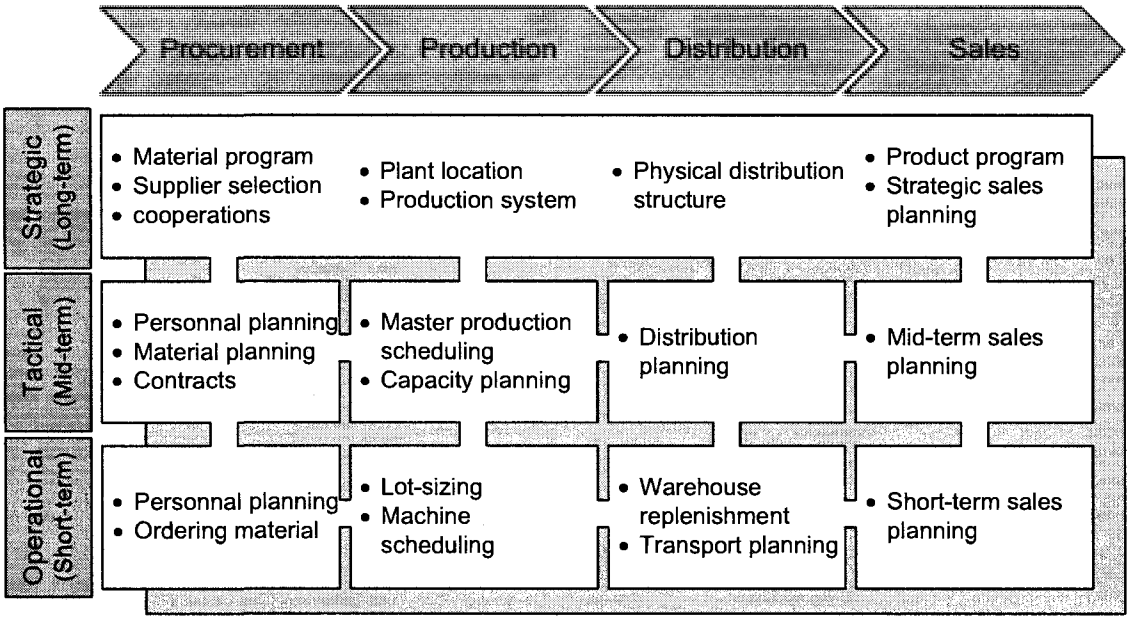


Figure 2.4 : Niveaux décisionnels et processus de gestion de la chaîne logistique

(adaptée de Stadtler et Kilger [10])

2.2 Application des concepts de SCM en P&P

2.2.1 Contexte

Étant donné la conjoncture de plusieurs facteurs défavorables, mentionnés au Chapitre 1, l'industrie des P&P fait présentement face à des défis importants et éprouve de sérieuses difficultés à fournir des retours satisfaisants sur les investissements [5].

Historiquement, afin d'améliorer ses performances économiques, cette industrie a dirigé ses efforts à l'amélioration incrémentielle des technologies manufacturières et des procédés de fabrication du papier [31]. Toutefois, vu la croissance rapide de l'industrie des P&P dans les pays producteurs émergents (en Asie et en Amérique du Sud.) et la construction de nouvelles usines hautement performantes dans ces pays, le leadership des infrastructures canadiennes, en terme technologique et de capacité de production, n'est plus assuré [3, 32-34][8]. La base des coûts de production de l'industrie nord-américaine étant relativement grande comparée à la compétition mondiale, il est nécessaire de considérer de nouvelles approches de gestion des affaires [6, 34]. L'application des concepts de SCM offre une des solutions les plus prometteuses pour la survie de l'industrie [3, 35].

Comparé à d'autres secteurs industriels, ce n'est que depuis récemment que les compagnies papetières investissent des efforts significatifs afin d'améliorer la gestion de la SC [36]. On retrouve désormais de plus en plus d'articles destinés à l'industrie papetières qui témoignent de l'intérêt grandissant de cette industrie face à l'implantation de ces concepts. Bien que certain auteurs discutent des avantages stratégiques de la SCM [31, 37-39] ou encore de l'importance de l'intégration et des partenariats stratégiques [40], la plupart des discussions présentées [36, 39, 41-50] concernent l'implantation de progiciel de gestion intégré (ERP) à la fine pointe de la technologie. Ces systèmes, qui facilitent la gestion de l'information le long de la SC et augmentent la visibilité des processus d'affaires au niveau de l'entreprise, font maintenant partie prenante des processus d'affaires de nombreuses compagnies papetières. Bien qu'ils soient largement répandus, ces systèmes ne constituent

---

[8] Ceci est d'autant pire que l'industrie Canadienne sous-investit dans ses usines depuis plusieurs annécs [32] J. Kenny, "How wide is the technology gap?," *Solution!*, vol. 85, 2005..

cependant pas la « gestion de la chaîne logistique » et ce serait une grave erreur de les considérer comme tel (chapitre 3 dans [11]).

2.2.2 Chaîne logistique de l'industrie des P&P

Les chaînes logistiques en P&P sont complexes et variées et leur structure est fonction des différents choix liés, notamment, aux segments de marché visés, aux opportunités d'approvisionnement, aux stratégies d'intégration avec les fournisseurs et les clients et à la structure même des organisations. Toutefois, tel qu'illustré à la Figure 2.5, la chaîne logistique en P&P incorpore six grandes étapes soit l'approvisionnement en fibre, la préparation des fibres, le procédé de mise en pâte, le procédé de fabrication du papier, la finition et la distribution des produits aux clients. L'industrie étant de plus en plus « orientée client » (e.g. [41, 51, 52]), la SC est davantage sollicitée et ce, tant pour les systèmes logistiques (e.g. délais de livraison) que pour la production (e.g. flexibilité, qualité) [53].

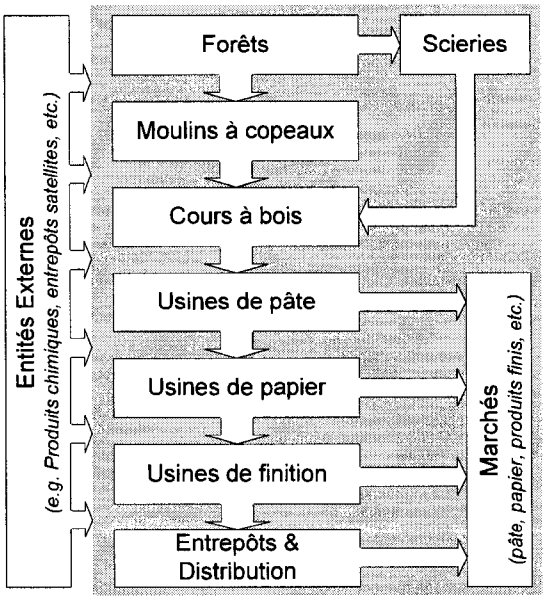


Figure 2.5 : Représentation générale de la chaîne logistique de l'industrie des P&P (adaptée de Kissani et Martel [54])

2.2.3 Défis d'implantation des concepts de SCM en P&P

Plusieurs auteurs ont discuté des défis d'implantation de la SCM dans l'industrie des P&P qui, comparée aux industries discrètes, a été tardive reconnaître et à adopter ces concepts [31, 55, 56]. Selon Lail [50, 57], deux raisons principales justifient cette situation. La première est que l'industrie papetière a fait face tardivement aux grands changements de son environnement d'affaires tels que la compétition globale, la consolidation, les excès de capacité et la faiblesse des prix. La seconde raison, la plus importante dans le contexte de cette thèse, consiste au fait que l'industrie des P&P comporte d'importantes différences, comparée aux autres secteurs manufacturiers plus traditionnels, qui n'ont pas été systématiquement prises en compte lors de l'application des concepts de SCM [57, 58]. Quelques-unes des particularités importantes de l'industrie papetière, qui sont évidemment majoritairement reliées aux procédés de production, sont présentées dans le Tableau 2.2. De plus, deux aspects principaux méritent une attention particulière et sont présentés dans les sections qui suivent.

Tableau 2.2 : Particularités et différences importantes de la SC en P&P

Aspect	Description
Procédés manufacturiers divergents [59, 60]	– Les procédés manufacturiers divergents sont caractérisés par un flux de matières premières acheminé à un procédé commun, des procédés intensifs en capitaux investis, un flux de sous-produits principal divisé en une variété de produits finis différents et des activités intensives de coordination post-production. – Les produits ne sont généralement que marginalement différents en ce qui a trait aux matières premières utilisées et ils peuvent être individuellement caractérisés, selon la demande d'un client, lors de l'emballage et du traitement post-production. – La source de diversité et de complexité, reliée aux produits, est beaucoup plus en aval dans la SC des industries divergentes.
Standardisation des produits [40, 57, 60, 61]	– Bien que les produits P&P soient des commodités, on retrouve souvent un haut degré de différentiation des produits: composition en matières premières, blancheur, épaisseur du papier, couleur, traitement de surface, emballage, etc. – Cette diversification des produits augmente la complexité de la chaîne logistique.
Modèle manufacturier [57, 61]	– Il est commun d'utiliser simultanément plusieurs modes d'opérations à une même usine : « production sur commande » à la base, « production pour les inventaires » pour certains clients spéciaux, « assemblage sur commande » pour les produits nécessitant des activités de conversion supplémentaires. – Évidemment, cette façon de faire complique la planification de la chaîne logistique : un seul modèle manufacturier est typiquement sélectionné dans les autres secteurs industriels.
Utilisation des produits [57]	– Les produits P&P sont utilisés de façon très variée par les clients. Cette variété d'utilisation des produits augmente la différentiation et rend la gestion de la qualité beaucoup plus difficile.
Planification de la production [42, 57, 59]	– Le taux de production étant principalement déterminé par la capacité de production d'un équipement majeur (e.g. la machine à papier), celui-ci est au centre des activités d'ordonnancement. On considère typiquement que la flexibilité de la capacité de production disponible est limitée (i.e. peu d'opportunités d'ajuster la capacité au niveau désiré). – Plusieurs commandes sont simultanément produites sur le même équipement et la production est généralement organisée en blocs de temps machine regroupant des commandes ayant les mêmes caractéristiques (i.e. le même grade). – La finition est ordonnancée en fonction du taux de production de pâte ou papier et des inventaires de produits intermédiaires disponibles.

Tableau 2.2 : Particularités et différences importantes de la SC en P&P (suite)

Aspect	Description
Gestion de la qualité [57]	– La gestion de la qualité est relative et basée sur des paramètres de qualité et leur déviation. – Les attributs des produits et les tolérances spécifiques aux clients doivent être pris en compte lors de l'allocation des produits aux commandes.
Gestion des inventaires [57]	– La gestion des inventaires de produits intermédiaires est généralement plus simple pour les P&P, comparées aux industries d'assemblage de produits, car, le procédé étant continu, le nombre de matières premières et de produits intermédiaires est limité. – Les caractéristiques de chaque produit (e.g. rouleau, ballots ou palette) doivent être suivies puisqu'il est nécessaire de pouvoir savoir à quel client chacune des unités en inventaires, possédant des attributs de qualités spécifiques, peuvent être associées.
Intégration des unités d'affaires [31, 57]	– La planification des cycles de la SC n'étant généralement pas (ou peu) intégrée, les gestionnaires ont une visibilité limitée à l'échelle de la SC. Ces « silos » organisationnels constituent un des obstacles majeurs à la prise de décisions et à l'application des concepts de SCM en P&P.

2.2.3.1 Environnement de production continu

Les opérations manufacturières principales en P&P sont caractérisées par des équipements opérés en continu et généralement à capacité maximale afin de réaliser un retour sur les investissements. Des changements intermittents des conditions d'opération permettent de produire différentes classes de produits (changements coûteux et nécessitant beaucoup de temps). Contrairement à la production discrète pour laquelle un certain nombre d'items distincts sont produits à partir de machines individuelles, l'ajout de valeur l'industrie de procédés se fait par mélange, séparation, formation ou réaction chimique [62]. Dans le cas des usines de P&P intégrées, on retrouve généralement, en plus de la production continue, des activités de production discrète qui se déroulent à la suite d'un procédé de désassemblage (ballots, feuilles, rouleaux) [50]. Ces environnements de production hybrides, nécessitant la planification

intégrée d'activités et de pratiques de nature différente, sont beaucoup plus difficiles à gérer dans le contexte de la SC [63].

2.2.3.2 Gestion axée sur l'utilisation de la capacité de production

Compte tenu de l'intensité en capitaux de l'industrie, la prise de décisions au niveau de la SC est typiquement guidée par l'utilisation des équipements à l'usine. L'un des principaux objectifs est donc de maximiser la production afin de répartir les coûts fixes sur un plus grand nombre de tonnes [31, 57, 59]. Une telle perspective, basée sur une compréhension erronée de la dynamique des coûts à l'échelle de la SC, peut sérieusement affecter la rentabilité d'une organisation [64, 65]. Lail [57] fournit une revue des implications de cette philosophie de gestion pour les différents cycles de la SC en P&P.

Cycle d'approvisionnement

Puisque l'utilisation de la capacité est primordiale, l'approvisionnement en fibre et la gestion des matières premières sont souvent considérées comme étant d'importance secondaire. Souvent, l'approvisionnement est géré de sorte à ce que les équipements principaux ne soient jamais arrêtés pour cause d'un manque de matières premières et ce, même si des changements de dernière heure sont effectués à la planification de la production.

Cycle manufacturier

La gestion des opérations a pour objectif la maximisation du taux de rendement global (OEE). Les différentes fonctions à l'usine (e.g. la planification de la production, les services d'entretien, les services d'utilité, etc.) visent avant tout à soutenir l'objectif de production maximale. Le tonnage total est signalé chaque jour comme le principal indicateur de performance.

Cycle de demande

L'objectif principal visé consiste à fournir suffisamment de demande à l'usine afin d'utiliser au maximum la capacité de production disponible. Dans certains cas, surtout lorsque le marché n'est pas favorable, des commandes peuvent être acceptée et ce, même si les marges ne sont pas rentables.

2.2.4 Revue des travaux de recherche sur l'optimisation de la SC en P&P

Compte tenu des particularités des procédés manufacturiers en P&P et dû à l'intérêt relativement récent porté par les entreprises P&P pour la SCM, le nombre de références disponibles sur l'application des concepts d'optimisation de la SC est assez limité. Carlsson et al. [66] en fournissent une revue exhaustive.

De plus, les travaux dans le domaine [67-82] peuvent être classifiés à partir d'une « carte » des problèmes de SC, adaptée de Shah [19] (voir Figure 2.6) Cette représentation inclut deux dimensions principales : les niveaux décisionnels et les cycles de la chaîne logistique.

Tout d'abord, plusieurs travaux (e.g. [67, 73]) témoignent de la pertinence et du potentiel de l'application de techniques sophistiquées permettant une meilleure intégration entre les cycles de la SC en P&P et ce, tant pour des problèmes stratégiques que tactiques et opérationnels. De plus, le développement de modèles pour la logistique et la planification des activités forestières (e.g. [69], [76] and [70]) reflètent l'importance des défis présents et futurs liés à l'approvisionnement en fibre (surtout en ce qui a trait au coût et à la disponibilité de celle-ci). Plusieurs articles (e.g. [72], [83] et [71]) portent aussi sur la production et la distribution du papier. Dans ces cas, l'accent est mis surtout sur la planification de la partie discrète de la SC (i.e. la finition, conversion et distribution) et les auteurs proposent divers outils pour mieux gérer la complexité de ces procédés divergents.

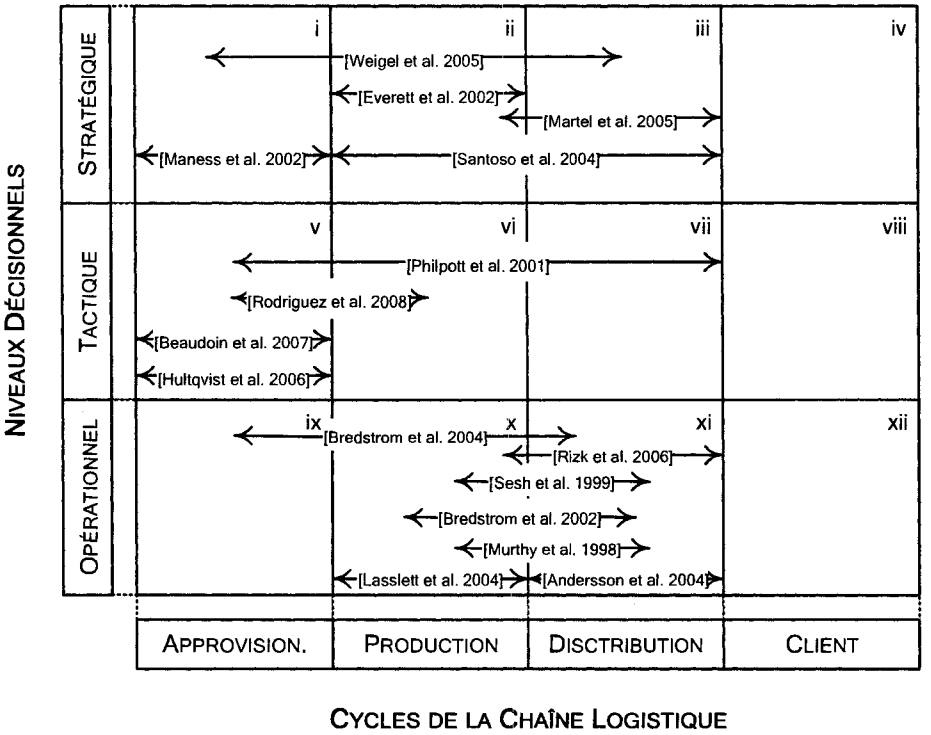


Figure 2.6 : Classification des publications scientifiques portant sur l'optimisation de la SC en P&P

Plus spécifiquement, trois éléments ne sont pas ou peu abordés dans les problèmes de planification de la SC qui ont été revus :

1) La problématique importante, telle que soulevée par Lail [57], liée à la particularité des procédés de production en P&P et à leur prise en compte dans les problèmes de SC;
2) Tel que reconnue par Carlsson et al. [53], la planification de la SC en industrie se fait à plusieurs niveaux décisionnels et couvrent différents horizons de temps. Toutefois, les approches présentées ne considèrent pas l'intégration des niveaux décisionnels dans les problèmes de planification de la SC;

3) Peu d'indications sont fournies en ce qui a trait à la structure organisationnelle et à la nature des processus décisionnels lors du développement des outils d'aide à la décision.

Enfin, il faut noter qu'une seule publication porte sur la planification de la SC dans le contexte des usines de pâte commerciale. Celle-ci, particulièrement pertinente dans le contexte de cette thèse, est présentée plus en détails à l'Annexe I.

2.3 Intégration des procédés dans les problèmes de SCM

2.3.1 La SCM dans le contexte particulier de l'industrie des procédés

En général, il est difficile pour l'industrie des procédés de bénéficier des plus récentes évolutions des systèmes d'information (IT) et des pratiques SCM qui sont, le plus souvent, élaborées dans le contexte des industries discrètes et, par conséquent, pas (ou peu) adaptées aux besoins des procédés manufacturiers en continu [84]. En fait, l'industrie des procédés, bien qu'elle soit plus automatisée au niveau du contrôle des opérations, est en retard par rapport à l'industrie discrète en ce qui a trait au développement d'outils globaux de gestion manufacturière [62]. Puisque chaque type d'industrie possède une chaîne logistique particulière, il est essentiel d'en comprendre les caractéristiques et besoins spécifiques afin de pleinement bénéficier du développements et de l'application des pratiques de SCM [21].

Quelques auteurs [84-87] ont fourni une revue des principales différences entre les environnements de production discret et continu et des défis liés à l'implantation de systèmes et concepts sophistiqués de gestion initialement développés dans le contexte de la production discrète. Un des aspects essentiels à considérer consiste à la représentation de la complexité et des incertitudes associées aux conditions d'opérations, d'une importance particulière dans les industries des procédés telles que

les P&P [88]. Comparé au cas de la production discrète, la représentation de ces conditions d'opération rend beaucoup plus difficile l'intégration du cycle manufacturier au sein des problèmes de SCM. Bien qu'à ce niveau décisionnel l'objectif n'est pas de faire le contrôle des procédés, il est primordial que ces aspects soient pris en compte et correctement représentés. Ceci rend l'intégration entre les niveaux de l'usine et de la SC plus difficile à établir [88].

2.3.2 SCM : une approche basée sur l'ingénierie des systèmes de procédés

De façon générale, on peut classer l'industrie des procédés en deux grandes catégories. La première est constituée de compagnies devant préserver leur valeur (e.g. les grandes industries de commodité telles que les papetières et les pétrolières) et la seconde, de compagnies ayant des opportunités de croissance et de développement de la valeur (e.g. les biotechnologies et les produits pharmaceutiques). Selon Grossmann [89], les compagnies du secteur de l'industrie des procédés devant « préserver leur valeur » doivent faire l'optimisation de l'entreprise et de la SC afin de rester compétitives et économiquement viables (notamment par la réduction des coûts globaux et des inventaires).

Pour répondre à ces besoins, la communauté scientifique en ingénierie des systèmes de procédés (PSE) a, depuis quelques années déjà, étendu son champ d'étude vers les niveaux supérieurs et inférieurs de la « chaîne d'approvisionnement des chimiques » (voir Figure 2.7). Traditionnellement portée sur la conception, le contrôle et les opérations des procédés chimiques [90], la recherche en PSE évolue maintenant vers l'application et le développement d'outils PSE au niveau moléculaire, pour l'innovation, la découverte et le design de nouveaux produits, et au niveau de l'entreprise, pour l'optimisation et la coordination des procédés manufacturiers au sein de la SC [89]. Bien que communément définit comme étant l'application d'approches holistiques et intégrées pour l'analyse des systèmes en matière de conception de

procédés industriels nouveaux ou en rétro-installation [91, 92], le domaine de l'intégration des procédés (PI), tel que pratiqué par exemple dans la *Chaire en intégration des procédés pour l'industrie papetières*, est aussi concerné par l'amélioration des processus de prise de décisions et la planification intégrée de la production et distribution des produits à l'échelle de l'entreprise.

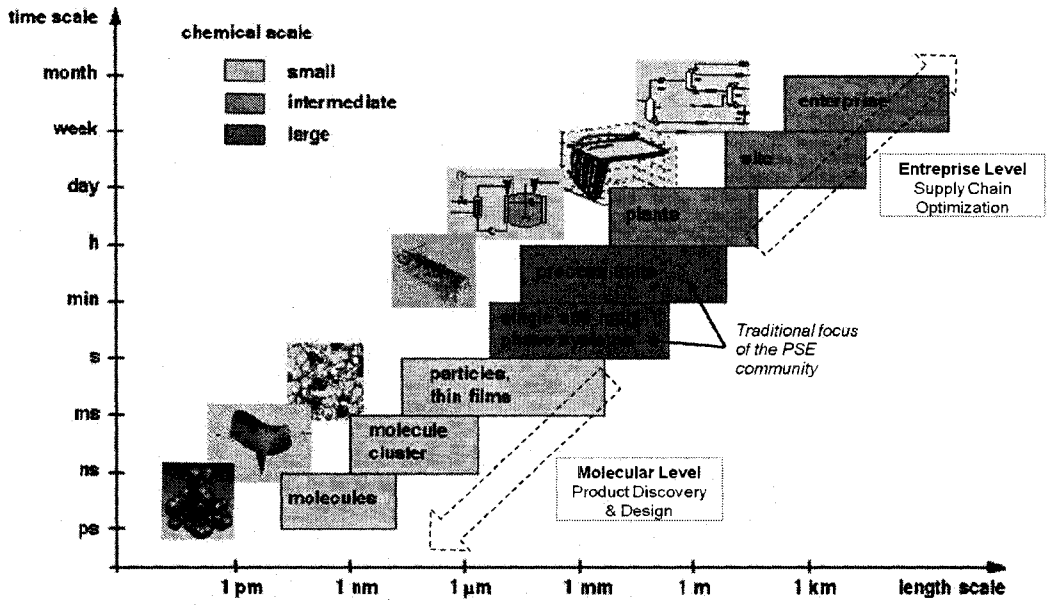


Figure 2.7 : Expansion du champ d'application du PSE le long de la « chaîne d'approvisionnement des chimiques »

(adaptée de Grossmann [89] et Marquardt, Wedel & Bayer [93])

Pour les grandes industries de commodités telles que les P&P, la prise de décisions au niveau de la SC est souvent découplée des activités au niveau de l'usine. Afin de traiter pleinement l'optimisation et la gestion des entreprises et de leur SC, les perspectives de l'usine et de la SC doivent être mieux intégrées [87, 89]. La Figure 2.8, qui incorpore les niveaux de contrôle de Seborg, Edgar et Mellichamp [94] et les niveaux décisionnels de Chopra et Meindl [12], illustre bien l'aspect hiérarchique dans l'industrie des procédés. Dans ce contexte, il est important de pourvoir assurer un flux

bidirectionnel de communication fournissant la visibilité requise en ce qui a trait aux objectifs et décisions établis par les niveaux supérieurs et aussi, aux contraintes et performances des niveaux inférieurs [87]. L'élaboration de méthodes et de modèles pour la prise de décisions à haut niveau doit être basée sur une approche ascendante permettant de bien identifier, comprendre et considérer les contraintes et la performance du procédé [95, 96]. En fait, pour souligner l'importance de cet aspect dans l'industrie des procédés, Grossmann [97] a introduit le concept d'optimisation de l'entreprise (« Enterprise-Wide Optimization » (EWO)) qui met spécifiquement l'accent sur la planification, l'ordonnancement et le contrôle du cycle manufacturier au sein de la SC. Bien qu'il y ait un chevauchement avec le concept SCM tel que définit normalement, les approches d'optimisation développées dans la communauté PSE mettent l'emphase sur les opérations manufacturières i.e. sur l'intégration des connaissances en génie chimique afin de mieux représenter les procédés au sein de la SC [97].

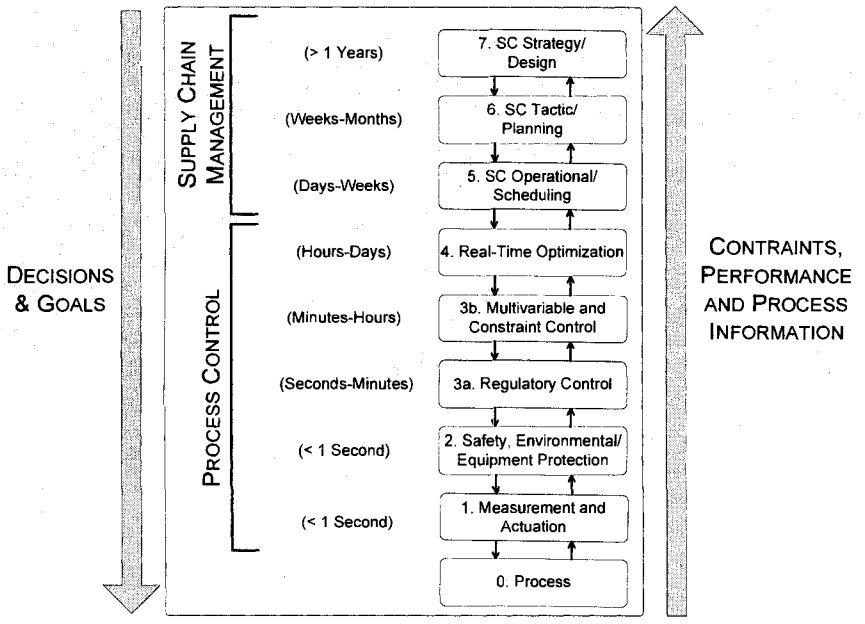


Figure 2.8 : Niveaux de contrôle et de gestion de la SC

(adaptée de Seborg, Edgar & Mellichamp[94] et de Chopra & Meindl [12])

2.3.3 Problèmes de SCM dans l'industrie des procédés

L'intérêt de l'industrie des procédés pour la gestion holistique des entreprises a stimulé les chercheurs qui ont appliqué les concepts d'optimisation de la SC pour divers secteurs de l'industrie tel que le raffinage (e.g. [98]), la pétrochimie (e.g. [25, 99, 100]) et le pharmaceutique (e.g. [101]). Les travaux de recherche, étant de plus en plus inspirés et testés pour des contextes industriels véritables, ont démontré que les problèmes industriels peuvent être abordés et résolus par les approches et outils d'EWO développés en PSE [97, 102]. Shah [19] classe les problèmes de SC en trois catégories principales: 1) la conception des SC, 2) la simulation des SC et l'analyse des politiques de gestion et 3) la planification des SC.

2.3.3.1 Problèmes de conception des SC

Ce type de problèmes est essentiellement au centre d'activités stratégiques ayant pour objectif principal la création de valeur pour les actionnaires de l'entreprise [19, 27]. Les modèles développés considèrent des décisions importantes, telles que l'ouverture ou la fermeture d'installations ou la modification des infrastructures existantes, et permettent l'analyse des compromis stratégiques entre, par exemple, les structures régionales des coûts de production, les coûts de transport, les taux de change, la complexité des réseaux, etc. Puisque ces problèmes ont été largement abordés à la fois par les communautés en recherche opérationnelle (OR) et en PSE, plusieurs exemples d'application sont disponibles dans la littérature (e.g. [103-105]). Toutefois, tel que spécifié par Shah [19], certains aspects particulièrement critiques pour l'industrie des procédés doivent être abordés dont, notamment, la description adéquate des procédés et le lien entre la conception des procédés et les opérations de la SC.

2.3.3.2 Problèmes de simulation des SC et d'analyse des politiques de gestion

À l'aide de modèles de simulation, il est possible de faire l'analyse du comportement dynamique d'une SC donnée soumise à divers scénarios opérationnels [19, 27]. La simulation des performances de la SC est fort utile car elle permet, non seulement d'analyser l'impact des incertitudes tout au long de la SC, mais aussi d'évaluer le potentiel de différentes politiques de gestion de la SC et ce, avant leur implantation [20]. Des exemples d'application de l'approche de simulation multi-agent, particulièrement adaptée pour la simulation des SC [19], sont disponibles dans [106, 107]. Dans le contexte de l'industrie des procédés, la représentation simplifiée des procédés de production et leur intégration à la modélisation des processus d'affaires constituent encore une fois des défis importants à relever.

2.3.3.3 Problèmes de planification des SC

La planification et l'ordonnancement (P&S) sont des activités importantes pour la gestion de l'entreprise à court et moyen termes. Tandis que les deux types précédents de problèmes sont liés à des activités « hors ligne » (e.g. concevoir la SC, établir les politiques de gestion), la P&S, qui considère une configuration fixe de la SC, vise à optimiser l'utilisation des ressources disponibles et à maximiser la performance, pour un environnement d'affaires donné [19, 108]. Compte tenu de la prédominance du cycle manufacturier dans l'industrie des procédés, la P&S aux niveaux de l'entreprise et de l'usine sont intimement liées [109]. Puisque par définition ces processus décisionnels doivent tenir compte à la fois des perspectives de production et d'affaires, les cadres de P&S peuvent jouer un rôle clé dans l'intégration de l'usine au sein de la SC [87, 110]. Enfin, puisque le problème de SC abordé dans cette thèse fait partie de cette catégorie, une revue plus détaillée des problèmes de P&S est fournie à la section suivante.

2.4 Planification et ordonnancement de la SC

2.4.1 Définitions

Puisque la planification et l'ordonnancement se chevauchent souvent, il n'est pas toujours aisé de faire une distinction claire entre ces activités dans les organisations. Néanmoins, ces processus de prise de décisions peuvent être définis comme suit.

- Au niveau de l'entreprise, la planification [88, 108, 109, 111] a pour objectif la coordination des activités tout au long de la SC (cycles d'approvisionnement, de production et de demande) et la détermination de cibles de performance opérationnelle. Elle considère généralement des données agrégées (e.g. prévisions de la demande par famille de produits) et un horizon de temps variant de quelques mois à une année.
- Au niveau de l'usine, l'ordonnancement [16, 21, 88, 108] est concerné principalement par la synchronisation et la détermination de l'intensité des activités de production et ce, afin de rencontrer les objectifs fixés de performance. Dans ce cas, on considère typiquement un horizon de temps réduit (i.e. de quelques jours à 2-3 mois) et une formulation plus détaillée incluant, par exemple, une discrétisation temporelle plus fine, des données de demande mieux définies et une représentation plus exacte des procédés manufacturiers et de leurs coûts.

Plusieurs revues [16, 19, 21, 85, 108, 109, 112] ont fait état des méthodes et éléments clés à considérer pour les problèmes de P&S dans le contexte de l'industrie des procédés. Néanmoins, il existe encore des défis liés à l'élaboration de méthodes pratiques pour le développement et l'implantation de ces modèles de sorte à ce que la portée, la complexité et la précision de ceux-ci soient pertinents compte tenu des objectifs de prise de décisions [113].

2.4.2 Programmation mathématique

Les techniques de programmation mathématique sont le plus souvent utilisées pour la résolution des problèmes de P&S ou pour le développement d'outils d'aide à la décision [21, 109, 111]. En fait, la disponibilité de langages de programmation, d'algorithmes d'optimisation et d'interfaces graphiques à la fine pointe a démocratisé l'utilisation de ces techniques qui permettent l'organisation efficace de l'information (i.e. paramètres, variables et contraintes) utilisée pour représenter mathématiquement les problèmes de SC [108, 113]. Typiquement formulés par programmation en nombres entiers linéaire et non-linéaire (i.e. MILP[9], MINLP), les modèles permettent d'optimiser une ou plusieurs mesures de performance de la SC en tenant compte des variables décisionnelles et des contraintes physiques et opérationnelles du système [20]. Puisque des problèmes semblables peuvent être modélisés différemment, plusieurs efforts de recherches ont porté sur l'uniformisation des approches pour la modélisation des problèmes de P&S [108] (e.g. « State Task Network (STN) » [114] et « Resource Task Network (RTN) » [115]). Enfin, le Tableau 2.3 [16, 109, 111-113, 116] résume les principaux avantages et inconvénients de la programmation mathématique.

---

[9] Ces modèles, qui consistent en une généralisation des modèles de programmation linéaire, contiennent des variables entières et continues qui permettent plus de flexibilité pour la résolution de problème de P&S.

Tableau 2.3 : Avantages et inconvénients de la programmation mathématique

Avantages	Inconvénients
– Approche holistique et systématique permettant l'analyse des compromis et des interactions entre les variables décisionnelles. – La modélisation et la résolution peuvent se faire efficacement à l'aide de logiciel commerciaux d'optimisation (e.g. GAMS [117]). – Une solution optimale (ou à tout le moins des bornes sur cette solution optimale) peut être calculée pour des modèles mathématiques convexes (e.g. MILP).	– Modélisation non-intuitive; le problème doit être représenté en terme abstrait. – Dû aux décisions discrètes, les problèmes de P&S sont combinatoires de nature (surtout pour l'ordonnancement). Pour des problèmes de très grande échelle, il peut être difficile de trouver une solution faisable dans un lapse de temps raisonnable.

2.4.3 Représentation du temps

Les formulations de P&S peuvent être classifiées selon leur représentation du temps i.e. discrète ou continue. La représentation discrète (Figure 2.9, A) fait référence à des modèles où l'horizon de temps est uniformément divisé en intervalles d'égale durée et où les événements ne peuvent arrivés qu'aux frontières de ceux-ci [112]. Cette approche permet une flexibilité suffisante pour la modélisation de divers aspects des problèmes de P&S. Cependant, lorsque l'horizon de temps ou la portée du problème considérés augmentent, elle introduit un grand nombre de contraintes et de variables binaires et résulte en de larges problèmes combinatoires difficiles à résoudre [111].

Dans le cas de la représentation continue (Figure 2.9, B), les événements modélisés peuvent arrivés à n'importe quel point du domaine temporel continu. Bien que la structure de ces modèles soit généralement plus complexe, ces formulations résultent en des problèmes plus petits et requièrent donc moins d'effort computationnel [112].

Tel que souligné par divers auteurs [101, 111], il n'est pas trivial de déterminer a priori quelle approche est susceptible de mieux performer dans un contexte donné. Aussi, il ne semble pas y avoir de consensus général à savoir laquelle de ces deux approches est la plus appropriée pour la P&S dans l'industrie des procédés.

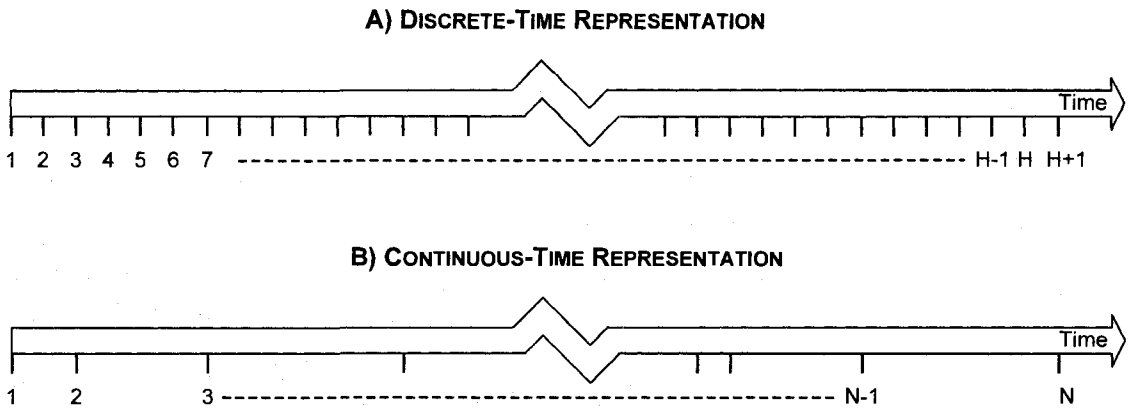


Figure 2.9 : Représentation discrète et continue du temps

(tirée de Floudas [112])

2.4.4 Intégration de la planification et de l'ordonnancement

Dans le contexte de l'optimisation de la SC, l'intégration de la planification et de l'ordonnancement et la coordination entre ces niveaux décisionnels constituent un des principaux défis liés au développement d'outils analytiques d'aide à la décision [16, 97]. Bien que plusieurs publications portent sur la planification ou l'ordonnancement (tel que discuté par les revues de Shah [19], Floudas [112] et Kallrath [109]), l'intégration de différents problèmes de P&S ou l'intégration de divers niveaux décisionnels d'un même problème sont moins souvent abordés dans la littérature [116]. Les sous-sections suivantes présentent deux approches possibles pour traiter ces types de problèmes.

2.4.4.1 Approche « pleine grandeur »

Puisque que les décisions à chaque niveau sont interreliées, les aspects d'ordonnancement devrait idéalement être pris en compte de façon intégrale dans le problème de planification [111]. Toutefois, dans la plupart des cas, il est difficile de résoudre les problèmes « pleine grandeur » où un seul modèle détaillé couvre l'ensemble des niveaux décisionnels [16]. Pour surmonter cette complexité, trois stratégies sont typiquement utilisées afin de considérer l'intégration des problèmes de P&S et d'assurer la résolution de ceux-ci dans des délais pratiques (i.e. efforts computationnels raisonnables) [97].

- La première consiste à l'application d'algorithmes de décomposition représentant le problème original par un problème maître et un sous-problème et où, itérativement, la solution du problème maître est améliorée grâce à l'évaluation du sous-problème (et de coupes entières) [16, 108, 118, 119]. Tel que démontré par Papageorgiou et Pantelides [118], cette technique peut être appliquée pour des problèmes de P&S d'envergure.
- La seconde stratégie consiste quant à elle à l'agrégation des périodes de temps ultérieures. Dans ce cas, l'horizon de temps considéré est divisé en deux portions : une première période pour laquelle l'ordonnancement détaillé est déterminé et, une seconde période visant la planification agrégée. Puisqu'à la fin de la première période l'état du modèle d'ordonnancement doit être égal à l'état donné par le modèle de planification, la continuité du problème général de P&S peut être assurée [67, 120].
- Enfin, la troisième approche est basée sur un horizon de temps roulant qui est divisé en une portion détaillée et agrégée. Dans ce cas, la procédure consiste en une séquence d'itérations où, à chaque fois que les problèmes d'ordonnancement et de planification sont résolus, les variables associées à la portion détaillés de l'horizon

sont fixées à leur valeur optimale, pour les itérations subséquentes (Figure 2.10). La portion agrégée de l'horizon diminue au fur est à mesure que les périodes détaillées sont fixées. Les itérations sont donc répétées jusqu'à ce qu'une cédule détaillée soit obtenue pour tout l'horizon de temps [121].

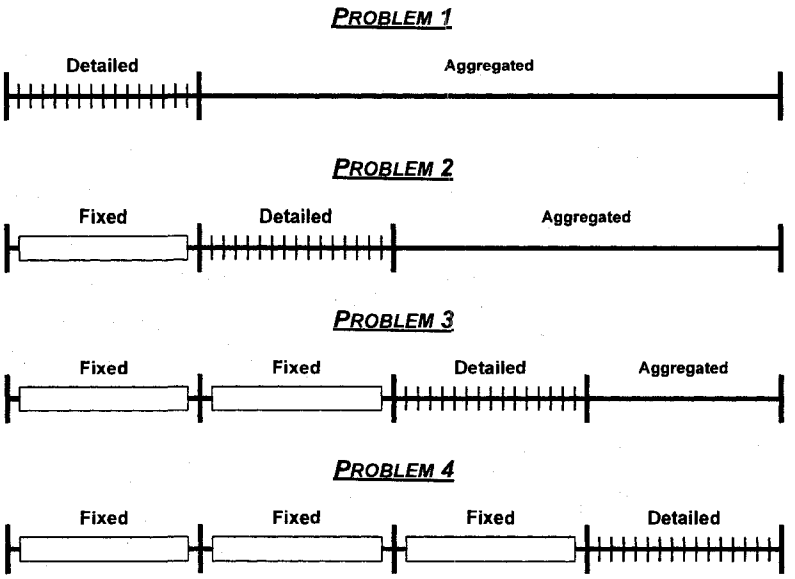


Figure 2.10 : Illustration de la technique basée sur un horizon de temps roulant
(tirée de Dimitriadis et al. [121])

2.4.4.2 Approches hiérarchiques intégrées

La planification et l'ordonnancement se font généralement en deux phases séquentielles où, à chaque niveaux, divers aspects doivent être pris en compte (e.g. objectif spécifique, portée du problème, fréquence des décisions, données considérées, type de gestion, etc.) [21]. Les approches hiérarchiques tiennent compte de cette structure particulière et partitionnent le problème global de planification en plusieurs niveaux (ou modules) [122]. De plus, de part la communication de l'information et l'intégration de la prise de décisions, ils assurent la consistance entre les niveaux

décisionnels [123]. Tel que noté par Hax et Meal [124], les systèmes hiérarchiques sont mieux adaptés que les approches intégrées pleine grandeur (monolithiques) car, en plus de fournir un support à la prise de décisions, ils impliquent les gestionnaires responsables à chacun des niveaux décisionnels. En fait, ils soulignent d'emblée leur préférence pour ce type d'approche et ce, même si la puissance des ordinateurs à cette époques (années 70) aurait été suffisante pour résoudre des problèmes de grande envergure. Encore de nos jours, étant donné leur consistance avec la nature hiérarchique des processus décisionnels, les avantages des approches hiérarchiques intégrées pour la P&S de la SC sont largement reconnus [102].

2.4.5 Approches de P&S « hors ligne » et « en ligne »

2.4.5.1 Approche « hors ligne »

Selon Stefansson & al. [101], la plupart des approches de P&S dans la littérature peuvent être classifiées comme étant « hors-ligne » c'est-à-dire qu'elles considèrent que toutes les données du problème peuvent être spécifiées et donc, que le décideur a une connaissance absolue du futur. Ce type de problème, faisant l'hypothèse que les conditions sont prédictibles et stables, est généralement abordé à l'aide de formulations déterministiques [111]. Toutefois, en pratique, les gestionnaires doivent souvent réagir à des situations inattendues, telles que des bris d'équipement, des nouvelles commandes, des variations de disponibilité des matières premières, et prendre les décisions nécessaires afin de modifier ou d'améliorer le plan ou la cédule au fur et à mesure que de nouvelles informations sont disponibles. Afin de mitiger les impacts de ces incertitudes, la gestion des opérations se fait souvent de façon conservatrice. Enfin, les formulations stochastiques (voir par exemple [99, 125]), bien qu'encore en développement, peuvent être utilisées afin de traiter systématiquement ces incertitudes dans les problèmes de P&S [111].

2.4.5.2 Approche « en ligne »

Tel que mentionné par Stobbe et al. [111], les décideurs, qui doivent compenser le manque d'information par leurs connaissances et expériences, devraient être supportés et non remplacés par des outils appropriés de P&S. L'utilisation d'une approche « en ligne » constitue une alternative intéressante et particulièrement adaptée aux processus décisionnels dynamiques et continus [101]. Plutôt que de définir et d'inclure explicitement les incertitudes pour un ensemble de données définit sur tout l'horizon de temps, cette approche vise à améliorer de la qualité du plan ou de la cédule au fil du temps [116]. En fait, la procédure résout périodiquement les modèles (à une fréquence consistante avec les processus décisionnels) et ce, basé sur la connaissance des données historiques et courantes et sans savoir toutes les informations concernant le futur [109]. Enfin, peu d'indications sont disponibles sur ce sujet dans la littérature. Ceci est d'autant plus vrai concernant le développement et l'application des ces concepts dans le contexte de problèmes réels.

2.4.6 Représentation des procédés de production dans les problèmes de P&S

Selon Shah [102], la représentation trop simplifiée des procédés de production consiste en une faiblesse typique des approches de P&S. En fait, il note que le type de représentation du procédé, i.e. le niveau de détails nécessaire, est fortement lié au type d'entreprise et aux marges de profits qu'elles réalisent. On retrouve donc, de façon générale, deux approches pour la représentation des procédés manufacturiers dans les problèmes de P&S [19].

<u>Approche basée sur les recettes</u>

Lorsque les marges de profits sont grandes (e.g. produits de spécialités), les bénéfices potentiels d'une représentation plus sophistiquée des procédés sont moins attrayants et, par conséquent, une approche de planification basée sur les recettes

(« recipe-based ») est typiquement utilisée. Ces recettes définissent les conditions d'opération (fixes) qui sont considérées dans les problèmes de SC. Cette approche de planification se retrouve aussi communément dans deux autres cas soit pour les entreprises devant, par réglementation, fixer leurs conditions d'opération (e.g. l'industrie pharmaceutique) ou encore, pour les entreprises ayant une connaissance plus limitée de leur procédé d'opération. L'industrie des P&P fait partie de cette dernière catégorie. Bien qu'elles n'offrent pas de grandes marges de profits, les approches de gestion basées sur les recettes sont très présentes dans cette industrie qui ne possède qu'une connaissance très empirique de ses procédés de production. Enfin, des exemples d'application de l'approche basée sur les recettes sont fournis dans [67, 115, 125].

Approche basée sur les propriétés

Pour les producteurs à faibles marges de profits, la planification efficace de la SC nécessite une représentation plus adéquate des opérations manufacturières [100]. Il est donc nécessaire de caractériser les procédés visés ainsi que les flux de matières et ce, à une résolution compatible avec les exigences de chaque niveaux décisionnels de la SC [113]. Jusqu'à présent, la représentation plus sophistiquée de la production dans les problèmes de SC a été abordée par une approche de planification dite « basée sur les propriétés » (« property-based ») [19, 100]. Elle utilise des modèles de procédés (et simulations) basés sur des bilans massiques et énergétiques, afin de mieux caractériser la complexité de l'usine [97] et d'évaluer les flux, conditions d'opération et autres variables tel que la qualité [84]. Bien que les opérations soient mieux intégrées au niveau de la SC, l'utilisation de modèles sophistiqués, contenant un niveau élevé de détails, implique souvent des relations non-linéaires et résulte en des problèmes de SC complexes et beaucoup plus difficiles à résoudre [84, 97, 100]. Puisque cette approche est relativement nouvelle, seulement quelques exemples sont disponibles dans la littérature (industrie pétrochimique et raffineries) [98, 100, 126]. Toutefois, vu la convergence des outils et modèles de procédé et de SC, on devrait observer une

augmentation du nombre de ces applications [19]. Enfin, l'industrie des P&P bénéficierait grandement de l'application d'une approche similaire qui lui permettrait, contrairement à l'utilisation des recettes, d'améliorer la représentation des usines dans les problèmes de SC et donc, de mieux considérer les enjeux liés l'efficacité du cycle manufacturier et de la SC.

2.5 Rôle des technologies de l'information

2.5.1 Systèmes transactionnels et analytiques

Au cours des dernières années, la partage de l'information dans la SC a été considérablement amélioré par l'implantation de technologies de l'information (IT) dite transactionnelles[10] [97]. Initialement, l'accomplissement de tels projets IT a été motivé par le désir de fournir aux gestionnaires une visibilité accrue des activité de l'entreprise [110]. Dans ce contexte, l'intégration des progiciels de gestion intégrée (ERP) et des systèmes d'information à l'usine constitue une étape essentielle pour l'industrie des procédés [37, 127]. Le seul fait de fournir aux décideurs à travers la SC et les niveaux décisionnels l'opportunité d'accéder rapidement à des informations consistantes sur la production en usine a nécessairement mené à une amélioration de la prise de décisions au sein des entreprises [110, 128]. Toutefois, les informations sur la production disponibles dans les ERP sont généralement à un niveau d'agrégation qui permet pas, dans les industries des procédés, de supporter efficacement la prise de décisions liée à la SC [110]. Bien que ces systèmes incorporent généralement des informations telles que les recettes de production, ils ne considèrent pas les informations les plus utiles à la compréhension des procédés manufacturiers de l'usine i.e. les conditions d'opération

---

[10] De façon générale, on peut classer les technologies de l'information (IT) en deux catégories: 1) les IT transactionnelles qui supportent les processus de l'entreprise et traitent les données actuelles et 2) les IT analytiques qui visent à analyser les données disponibles et à utiliser les informations résultantes pour optimiser la performance des entreprises [63].

[110]. C'est le cas, par exemple en P&P, où les information de procédé ne sont intégrées que de façon *ad hoc* pour appuyer les processus décisionnels à plus haut niveau [95].

Bien qu'une vaste quantité de données soit disponible grâce aux IT, qui soutiennent à la fois les opérations de l'usine et les processus d'affaires, les pratiques courantes de gestion n'exploitent pas efficacement ces données pour la prise de décisions [129]. Tel que souligné par Carr [130], plusieurs dirigeants considèrent à tort que les IT sont à tout coup synonymes de valeur stratégique; toutefois, ce qui permet de créer un avantage compétitif durable n'est pas l'omniprésence de celles-ci, mais plutôt la façon dont les informations sont utilisées pour améliorer la performance de l'organisation. Dans ce contexte, plusieurs auteurs [63, 84, 95, 97] reconnaissent le potentiel qu'offre le développement d'approche et l'implantation de systèmes et d'outils analytiques.

2.5.2 Approche ascendante basée sur l'analyse des données

Les modèles « ascendants » basé sur l'analyse des données fournies par les IT peuvent également être utiles pour caractériser les procédés manufacturiers et supporter les activités de contrôle, d'analyse et de planification de la production [84]. Dans l'industrie des P&P, contrairement par exemple à l'industrie pétrochimique, le procédé ne peut typiquement pas être décrit par des relations *ab initio* (i.e. basées sur les principes fondamentaux) [131]. Dans ce cas, il y a donc une grande motivation à utiliser les mesures et données de procédés disponibles en ligne (e.g. les taux de production, l'énergie appliquée, la consistance, etc.) pour caractériser les opérations à l'usine [131]. Depuis l'avènement des systèmes de gestion de l'information de procédé (PIMS), à la base des systèmes des usines de P&P, nombreux sont ceux qui reconnaissent le potentiel d'amélioration de la prise de décisions d'affaires par une meilleure utilisation des données de procédés disponibles [37, 84, 95, 110, 132-134].

Une approche ascendante pour la représentation des procédés de production dans les processus décisionnels, basée sur l'intégration des données de procédés, a été proposée par Janssen et al. [96]. Tel qu'illustré à la Figure 2.11, cette approche comprend trois dimensions importantes : 1) le traitement des données, 2) l'analyse des données à l'aide d'outils d'intégration des procédés et 3) une analyse plus globale incluant la modélisation de la SC. Cette approche multidisciplinaire cherche à mieux exploiter les données des PIMS et à transformer celles-ci en connaissances utiles pour la prise de décisions.

Finalement, bien que de nombreux efforts ont été investis, depuis la fin des années 90, afin d'intégrer les systèmes et les informations entre l'entreprise et les usines, très peu de lignes directrices ou de méthodes ont été dégagées de ces expériences [110]. Aussi, tel que souligné par Harkins et al. [110], il peut être difficile de relier, aux usines, les perspectives de production et d'affaires compte tenu du fait que qu'elles possèdent différentes structures de données et surtout parce que différents concepts et compétences sont impliqués.

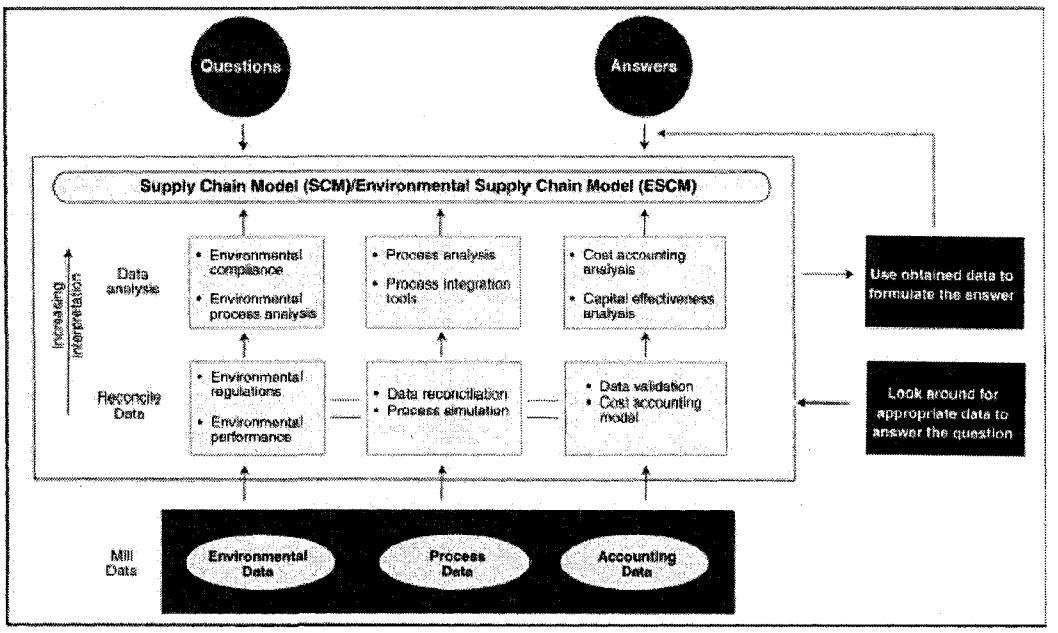


Figure 2.11 : Concept du modèle d'affaires ascendant

(tirée de Janssen et al. [95])

2.6 Modélisation des coûts des opérations manufacturières

Il est nécessaire de faire la distinction entre les approches de comptabilité généralement utilisées aux usines et les approches de comptabilité de gestion telle qu'abordée dans cette thèse. Aux usines, les activités de comptabilité financière peuvent être caractérisées par l'accent mis sur les rapports externes (e.g. pour les actionnaires) et sur la représentation cohérente des coûts de fabrication au fil du temps [135]. Les activités liées à la comptabilité de gestion vise quant à elles à fournir, par l'analyse des données historiques de coûts, des informations utiles à la prise de décisions, la planification, le contrôle et l'évaluation de la performance [135]. Dans ce contexte, il est généralement reconnu que la connaissance des procédés est un élément important pour l'analyse approfondie et l'interprétation des données de coûts.

2.6.1 Systèmes de coûts standard

De concert avec l'évolution des concepts de gestion scientifique (taylorisme), les notions de coûts standard ont été élaborées, au début du siècle dernier, afin de répondre à un besoin pour des informations comptables plus systématiques et fiables [136]. Les systèmes de contrôle des coûts, basés sur les approches de coûts standard et d'analyse des écarts, ont été les plus largement utilisés au 20e siècle [137]. Ils permettent de surveiller et gérer l'efficacité et la productivité et aussi, de comprendre leur impact sur la performance des coûts des usines.

L'une des étapes fondamentales de cette approche, qui consiste à déterminer le niveau standard d'utilisation des ressources, est accomplie en faisant l'analyse des habitudes historiques de consommation des ressources. En règle générale, le niveau standard des coûts manufacturiers indirects et des frais généraux est déterminé par les comptables alors que le niveau des ressources consommées directement par le procédé de production est évalué par des ingénieurs. Chaque mois, les coûts standard, i.e. les coûts qui auraient dû être encourus par l'organisation pour répondre à la demande réelle, sont calculés en utilisant les niveaux standards établis. Ceux-ci sont considérés, du point de vue de l'évaluation de la performance, comme des objectifs à atteindre. En comparant les coûts standard et réels, il est donc possible de caractériser les pertes (ou gains) en raison d'événements exceptionnels et/ou de la variation de l'efficacité et la productivité [65]. L'analyse des écarts constituent l'élément clé de cette procédure traditionnelle de contrôle des coûts et l'attention des gestionnaires se porte essentiellement sur les exceptions [129] i.e. une enquête est faite seulement pour les éléments de coût ayant des écarts importants (au-delà d'un certain seuil e.g. 5% ou 5000$)

2.6.2 Limitations des systèmes de coûts standard

Outre sa simplicité, un des principaux avantages des systèmes de coûts standard consiste au fait qu'ils permettent à la direction de se concentrer, en soulignant les écarts défavorables pour chaque période, sur les éléments où il semble y avoir des inefficacités [137, 138]. Tel que mentionné par Kaplan [139], bien qu'ils soient appropriés pour l'établissement de rapports financiers, ces approches ne conviennent ni pour l'estimation des coûts ni pour fournir les informations nécessaires à la prise de décisions (notamment en ce qui a trait à la performance des procédés). Quelques-unes des principales limitations des systèmes de coûts standard sont présentées ci-après.

Distorsion causée par le traitement inapproprié des coûts indirects de l'usine [65, 140, 141]

Les coûts indirects de fabrication et les frais généraux (ingénierie, maintenance, R&D, etc.), souvent considérés comme étant périodiques ou fixes, sont typiquement imputés sur la base du volume de production. Bien entendu, cela ne fournit pas un d'aperçu utile en termes de comportement des coûts.

Mauvaise représentation de la structure des coûts manufacturiers de l'usine

D'une part, il n'est pas rare que des organisations utilisent des standards dépassés qui, de toute évidence, fournissent une caractérisation inadéquate des opérations pour le calcul des coûts manufacturiers [65]. Ces standards peuvent aussi ne pas refléter la réalité lorsqu'ils sont fondés sur des hypothèses erronées à propos de la production en usines [65]. D'autre part, tel que noté par Cooper & Kaplan [137], les systèmes de coûts standard reflètent une philosophie de type «top-down » où la définition et la performance des opérations de l'usine sont déterminées, à « haut niveau », par les ingénieurs ou gestionnaires. Par exemple, en P&P, les recettes standard représentent les conditions d'opérations idéales qui sont fixées par les ingénieurs de procédés et qui doivent être ciblée les opérateurs à l'usine. Vu la

complexité des opérations et compte tenu du fait que, par le passé, les IT étaient beaucoup moins disponibles, l'utilisation de ces recettes standard pour le calcul des coûts représentait un choix logique. Conséquemment, les systèmes de coûts standard ont été largement adoptés dans l'industrie des P&P. Toutefois, puisqu'elle est fondée sur une représentation simplifiée des procédés de production, cette approche est insuffisante pour fournir une compréhension approfondie de la manière dont les coûts sont générés à usine. En fait, au lieu d'analyser systématiquement les inducteurs de coûts (« cost driver ») dans le procédé, les informations fournies à haut niveau ne peuvent qu'être désagrégées, pour une analyse plus approfondie [86, 142].

Soutien limité à la gestion des opérations

Compte tenu du cycle comptable mensuel, l'analyse des écarts, *a posteriori*, n'est pas suffisamment réactive afin de rapidement identifier les problématiques importantes et d'appuyer la prise de décisions opérationnelle [139]. En plus, puisque les informations de coûts et de procédé sont intégrées à un niveau d'agrégation trop élevé, les capacités d'analyse et de traçabilité des coûts tout au long du procédé de fabrication sont amoindries [142, 143].

2.6.3 Comptabilité par activités

La comptabilité par activités (ABC) est une méthode qui a été élaborée pour répondre aux besoins des environnements modernes de fabrication [139, 144]. Les concepts d'ABC ont été développés spécifiquement afin de mieux représenter et comprendre les ressources consommées par ce qu'on appelle le «hidden factory» (ensemble des processus de support aux activités manufacturière principales) [145], où la plupart des frais indirects sont engagés. Autrement dit, la comptabilité par activités vise à caractériser la génération des coûts manufacturiers indirects et des frais généraux qui sont, tel que mentionné à la section précédente, imputés de façon inappropriée aux objets de coûts [140]. Cette technique expose systématiquement les relations entre les

objets de coût, les activités et la consommation des ressources en utilisant un vaste ensemble d'inducteurs de ressources et d'activités qui sont établis, autant que faire se peut, à partir de mesures observables (voir Figure 2.12) [141, 144]. Comparé aux systèmes de coûts traditionnels, le concept proposé par Kaplan et Cooper [137], qui a fortement inspiré l'approche de modélisation des coûts proposée dans cette thèse, comporte trois améliorations importantes:

- Il se base sur les activités et processus (procédé) ;
- Il met l'accent sur le coût d'utilisation des ressources ;
- Il vise à exploiter un riche ensemble d'inducteurs de coûts afin de mieux prendre en compte de la complexité des opérations.

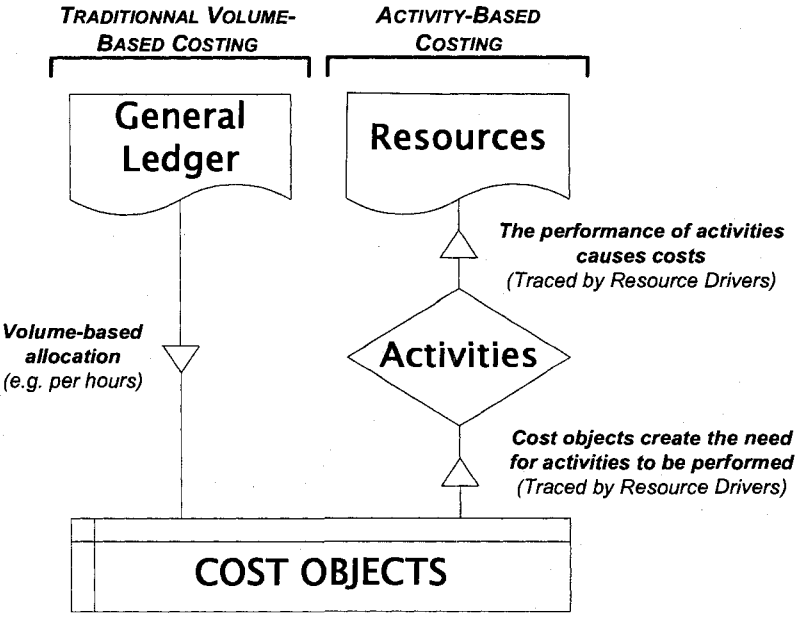


Figure 2.12 : Le principe de la comptabilité par activités
(adaptée de Bras [141])

2.6.4 Modélisation des coûts pour les environnements de production en continu

Puisque le développement de nouveaux modèles de coûts dans les années 90 a mis l'emphase sur les frais généraux et les processus d'affaires, peu d'attention a été accordée aux opérations manufacturières. Ainsi, des approches simplifiées sont généralement utilisées pour l'analyse des opérations et le traitement des coûts manufacturiers directs dans les environnements complexes de production [146]. De plus, tel que confirmé par Brierley et al. [147] sur la base d'un sondage, les pratiques de modélisation des coûts de l'industrie des procédés ne diffèrent pas de celles utilisées par les industries discrètes. Les techniques utilisées ne sont pas adaptées à la nature particulière des opérations manufacturières en continu. En fait, dans l'industrie des procédés, les approches de gestion des coûts doivent prendre en compte à la fois les perspectives « produit » et « procédé » [86]. En fait, Reeve [86] souligne l'importance, pour l'analyse et l'explication des coûts de production, des activités liées aux procédés qui, souvent, ne peuvent pas être facilement reliés aux produits. Ceci est une distinction essentielle à faire car, dans la plupart des approches de gestion des coûts mises au point dans le contexte de l'industrie discrète, le produit est considéré comme la cause principale des activités (et donc de la génération des coûts à l'usine). Afin de mieux comprendre le comportement des coûts dans les usines de P&P, il est nécessaire de prendre en compte les deux aspects ci-dessous.

2.6.4.1 Perspective « produit »

Dans l'industrie des procédés, et c'est le cas en P&P, on distingue deux grands types d'opération: les opérations manufacturières principales (e.g. les procédés de mise en pâte et de fabrication du papier) ainsi que la conversion et les opérations de finition (e.g. la mise en feuilles, l'emballages) [21]. Dans le cas de la production discrète, les inducteurs de coûts à l'usine peuvent généralement être bien déterminés à partir des

caractéristiques et de la stratégie spécifique du produit. En P&P, cette approche est surtout utile pour décrire le comportement des coûts pour les activités qui sont en aval des opérations manufacturières principales (« beyond the factory » selon Cooper & Kaplan [144]), là où une large diversité de produits est créée. En fait, de la finition aux clients, la perspective produit est adéquate et permet d'évaluer les impacts, sur les coûts, des spécifications du produit (mandrin, emballage, étiquetage, etc.), des canaux de distribution (livraison juste-à-temps, l'expédition directe, l'expédition via les centres de distribution) et des clients (arrangements contractuels, complexité des commandes, etc.). C'est la principale raison pour laquelle Reeve [86] suggère que, dans les industries des procédés, l'implantation des concepts d'ABC devrait se faire pour cette portion « orientée demande » (i.e. cycles de distribution et du client) de la SC.

2.6.4.2 Perspective « procédé »

Pour le cas des opération manufacturières principales, il est souvent plus pertinent d'examiner la perspective « procédé », i.e. le procédé de production et les conditions d'opérations, afin d'expliquer la génération des coûts à l'usine [86]. Bien qu'il puisse sembler naturel de considérer ces aspects pour des ingénieurs chimiques, ils ne sont généralement pas compris ou reconnus dans la littérature de gestion des coûts.

<u>Procédé de production</u>

L'analyse du procédé est nécessaire afin de mieux comprendre la génération des coûts pour les opérations manufacturières principales. Elle permet d'obtenir des informations telles que la configuration de l'usine, les courants importants, les types de procédé (mélange, chauffage, réaction, etc.) et autres informations qualitatives et quantitatives nécessaires à la caractérisation des procédés de production. En outre, une grande partie des coûts manufacturiers indirects sont causées par des activités telles que l'entretien, qui sont davantage liées au procédé de production lui-même qu'au produit

fabriqué. Ces éléments de coûts étant normalement alloués aux produits, il est difficile d'obtenir des informations utiles pour la gestion des opérations [86].

Conditions d'opération

Une différence fondamentale entre l'industrie discrète et l'industrie des procédés consiste en la base utilisée pour l'affectation des ressources. Dans le premier cas, les activités peuvent être retracées à partir du produit final en tenant compte du cheminement dans l'usine et de la liste du matériel. Il est donc significativement plus facile de calculer les coûts manufacturiers directs à partir du niveau de consommation des ressources mesuré pour chacun des composantes individuelles formant le produit final assemblé. Dans l'industrie des procédés, où on retrouve un flux continu de matière, cette base est inexistante. En fait, la consommation des ressources n'est souvent pas fonction d'une seule composante, mais plutôt de la combinaison des composantes qui constituent le flux de matières (et qui perdent leur identité lors du mélange). Ce sont les conditions d'opérations qui, à chaque étape du procédé, sont responsables de la consommation des ressources. Bien qu'elles puissent généralement être mesurées avec précision, il n'est souvent pas possible de retracer les ressources utilisées dans ces flux de matières principaux. Ainsi, pour des fins de simplification, on considère généralement que le produit (ou flux) est homogène [139] et les coûts sont calculés à l'aide des recettes standard. Bien que ces recettes spécifient l'utilisation des matières premières (additifs, copeaux, énergie, etc.) ainsi que les conditions d'opérations requises, les informations de coûts obtenues sur cette base ne correspondent pas à la réalité. Compte tenu des variations dans le procédé, les conditions réelles d'opération, et non les standards, devraient être utilisées pour analyser la génération des coûts des opérations manufacturières principales [86]

Enfin, il faut préciser que les perspectives « produit » et « procédé » ne sont pas mutuellement exclusives et qu'ils sont parfois toutes deux requises pour expliquer

certains éléments de coûts. Par exemple, bien que le coût des transitions encouru par l'usine dépende de la séquence des campagnes de production (perspective produit), l'explication des coûts spécifiques générés par une transition nécessite un examen approfondi des procédés d'opération (perspective procédé).

2.6.5 Applications pertinentes à l'industrie des procédés et des P&P

Afin de faciliter la prise de décisions en P&P, les stratégies de gestion doivent être en mesure de fournir une vision globale intégrant les perspectives de production et d'affaires [142]. Dans la littérature, peu d'articles portent sur l'application d'approches sophistiquées de gestion des coûts dans le contexte des environnements de production en continu [58, 142, 148]. Fogelholm [58] reconnaît que les principes du ABC ne peuvent que difficilement être appliqués dans le contexte des P&P. Il souligne l'importance d'analyser de façon plus approfondie les standards utilisés à l'usine. Pour ce, il propose un modèle pour le développement et l'entretien des systèmes de calcul des coûts qui met l'emphase sur la précision de ces coûts. Toutefois, l'approche proposée ne semble pas distinguer entre les perspectives « procédé » et « produit ». Aussi, bien qu'il reconnaît qu'une vaste de données est disponible aux usines, il n'est pas clair comment celles-ci sont structurées et analysées pour la modélisation des coûts. Quant à eux, Steen & Steenstand [142] ont examinés les avantages de l'utilisation d'un système avancé pour le calcul des coûts des produits et le support à la prise de décisions en temps réel à l'usine. Leur approche, qui repose sur le concept ABC, est appliquée dans le contexte des usines de P&P. Malheureusement, aucune information explicite n'est fournit concernant la méthode utilisée et le développement du cadre de modélisation des coûts. Ils ont néanmoins identifié des exigences importantes pour la réussite des systèmes de coûts en P&P: la réconciliation de données de procédé, l'intégration des données de procédés et de coûts, l'agrégation ascendante des

informations (i.e. du bas vers le haut), la capacité de retracer les coûts tout au long du procédé, une structure de données commune et une configuration flexible du système.

Dans le cas où des approches avancées de modélisation des coût ont été développées (e.g. [148] [142]), l'emphase a surtout été mise sur la capacité de compartimenter les coûts de façon plus détaillée. Ces approches permettent, par exemple, de calculer les écarts de coûts et d'analyser les éléments de coûts pour chaque heure ou pour les différentes commandes des clients. Cependant, tel que le reconnaissent d'emblée Steen et Steenstand [142], ces approches sont liées à la perspective produit. Celles-ci ne peuvent donc pas fournir le soutien approprié afin de mieux comprendre les implications sur les coûts des conditions d'opérations à l'usine. Puisqu'ils sont affectés directement au produit, aucune information utile n'est fournie sur la manière dont les coûts sont réellement générés lors des opérations de transformation. Comme l'a souligné Reeve [86], il existe une relation entre les ressources utilisées et les produits mais cela ne suffit pas à expliquer la consommation de ressources à l'usine. Pour les environnements de production en continu, les systèmes de coûts doivent intégrer des inducteurs liés à la fois aux procédés et aux produits [86]. Par conséquent, il est indispensable d'incorporer des informations sur le procédé de production et les conditions d'opérations afin d'analyser efficacement les coûts manufacturiers directs aux usines.

2.7 Synthèse de la revue de littérature

Étant donné les défis auxquels fait face l'industrie Canadienne des P&P, il est de plus en plus difficile, sur la seule base de l'amélioration des technologies manufacturières, d'assurer sa compétitivité tant sur les marchés régionaux que globaux. Cette industrie mature doit donc, afin de préserver sa valeur, développer sa capacité à gérer la complexité des opérations et des processus d'affaires à l'échelle de l'entreprise. La gestion de la SC, qui offre un potentiel d'amélioration significatif en P&P, est

considérée par plusieurs dirigeants comme une des solutions les plus prometteuses pour la survie de l'industrie. Toutefois, comparée aux industries discrètes, l'industrie des P&P a été plutôt tardive à reconnaître et à adopter la gestion de la chaîne logistique et donc, peu de lignes directrices sont disponibles afin d'encourager cette industrie dans l'application efficace de ces concepts. Nonobstant la complexité des opérations en P&P, ces principes peuvent être appliqués à condition de développer des approches adaptées aux besoins particuliers de l'industrie et de comprendre comment les procédés d'opération doivent être réfléchis dans les problèmes de SC.

En P&P, un des aspects critique, afin d'assurer la rentabilité des opérations, consiste en la gestion et en la coordination du flux de fibre dans les cycles d'approvisionnement, de production et de demande de la SC. Dans ce contexte, la planification et l'ordonnancement sont des activités très importantes, à court et moyen termes, pour les entreprises cherchant à mieux gérer la complexité de leur SC. Dans la littérature, on retrouve, pour cette importante classe de problèmes de SCM, plusieurs indications utiles pour l'application d'approches sophistiquées permettant aux entreprises de mieux répondre à leur environnement d'affaires et de maximiser la performance de la SC selon les ressources disponibles. Toutefois, l'intégration des problèmes de P&S et la coordination entre les niveaux décisionnels constituent un des principaux défis liés au développement d'outils analytiques d'aide à la décision. Contrairement aux approches monolithiques, les approches hiérarchiques tiennent compte de la nature des processus décisionnels dans les organisations. Du point de vue de l'application dans des contextes industriels, les approches hiérarchiques comportent trois caractéristiques particulièrement intéressantes : 1) elles assurent la coordination entre les niveaux décisionnels, 2) elles fournissent un support à la prise de décisions s'alignant aux objectifs et caractéristiques spécifiques à chaque niveau et, 3) elles nécessitent la participation du gestionnaire responsable à chaque niveau. D'un autre côté, les approches « en ligne » de planification sont particulièrement adaptées à la

réalité des processus décisionnels dynamiques à chaque niveau où les décideurs doivent réagir aux différents imprévus et incertitudes et tenter d'améliorer le plan au fur et à mesure que de nouvelles informations sont disponibles. Enfin, il existe encore des défis liés au développement et à l'application pratique des approches de P&S hiérarchiques « en ligne » et ce, notamment en ce qui a trait à l'élaboration de modèles pertinents compte tenu des objectifs de prise de décisions dans des industries de procédés lourdes telles que les P&P.

Aussi, pour les industries de commodité telles que les P&P, la prise de décisions au niveau de la SC est souvent découplée des activités au niveau de l'usine. Tel que noté, il est important de pouvoir assurer un flux bidirectionnel d'informations en ce qui a trait aux objectifs et décisions établis par les niveaux supérieurs et, aux contraintes et performances des niveaux inférieurs. L'intégration systématique des perspectives de l'usine et de l'entreprise est nécessaire afin de pleinement traiter des problèmes de planification de la SC et d'assurer la consistance entre les processus décisionnels à chaque niveau. Néanmoins, tant pour la conception que pour la simulation et la planification de la SC, la représentation des procédés d'opération dans ces problèmes se fait souvent de manière simplifiée. En P&P, étant donné la connaissance moins précise (empirique) des procédés de production, l'approche basée sur les propriétés n'est pas adaptée pour l'intégration du cycle manufacturier au sein des problèmes de planification de la SC. Toutefois, l'industrie des P&P bénéficierait grandement du développement d'outils semblables qui permettraient, plutôt que d'utiliser les recettes, de mieux représenter les procédés et d'adopter une approche de gestion axée sur les marges.

Puisqu'elle intègre les perspectives de production et d'affaires, la modélisation des coûts de production à l'usine peut jouer un rôle clé pour la représentation des procédés dans les problèmes de SC. Par contre, les méthodes de coûts standard

couramment utilisées par l'industrie des P&P (elles aussi basées sur les recettes) ne sont pas adaptées à ces activités de prise de décisions. Compte tenu des variations dans le procédé, les conditions réelles d'opération, et non les standards, devraient être utilisées pour caractériser la génération des coûts à l'usine. À l'instar des concepts d'ABC, l'intégration d'inducteurs, basés sur l'analyse des données de procédé historiques, permettrait de mieux représenter et comprendre les ressources consommées par les environnements continus de production. Bien qu'il puisse sembler naturel de considérer ces aspects pour des ingénieurs chimiques, ils ne sont généralement pas compris ou reconnus dans la littérature de gestion des coûts et n'ont pas été appliqués dans les systèmes de coûts mis en place dans le secteur des P&P. Jusqu'à présent, les défis technologiques ainsi que l'absence de lignes directrices et de méthodes systématiques ont empêché cette industrie de relever le défi que représente l'implantation de tels concepts.

En P&P, une vaste quantité de données est disponible grâce aux IT qui soutiennent à la fois les opérations de l'usine et les processus d'affaires des entreprises. Le partage de l'information et la visibilité accrue fournie aux gestionnaires dans la SC ont considérablement améliorés la prise de décisions. Toutefois, les pratiques courantes de gestion n'exploitent pas efficacement les données dans ce contexte. D'une part, les données de procédé à l'usine ne sont que modestement utilisées pour appuyer les processus décisionnels à haut niveau. D'autre part, les informations agrégées de production disponibles dans les ERP ne permettent pas, dans l'industrie des procédés, de supporter efficacement la prise de décisions liée à la SC. Compte tenu de la convergence des systèmes d'information d'usine et d'entreprise, les opportunités suivantes ont été identifiées :

1) Utiliser les données de procédé des PIMS afin de mieux caractériser les conditions d'opération ;

2) Intégrer les données de procédé et de coûts afin de relier les perspectives de production et d'affaires à l'usine ;
3) Incorporer ces informations pertinentes, reflétant le cycle manufacturier, dans les problèmes de planification de la SC afin de soutenir la prise de décisions à haut niveau.

Basé sur la représentation adéquate des procédés, les problèmes de planification de la SC pourraient, contrairement aux pratiques de gestion axées sur l'utilisation de la capacité de production, permettre à l'industrie des P&P de mieux exploiter les compromis entre l'usine et la SC ce qui, dans la situation actuelle, est un aspect critique afin d'assurer la rentabilité des opérations. Vu la capacité des outils et systèmes d'information, le développement de telles approches analytiques d'aide à la décision, modulaires et étroitement intégrées, est à la fois pratique et pertinent. Cependant, très peu de méthodes sont disponibles afin de fournir des directives utiles notamment en ce qui a trait aux informations critiques devant être incorporées pour la prise de décisions ou encore, aux défis d'intégration des perspectives de production et d'affaires aux usines (pour la représentation des procédés).

À la lumières des travaux revus, la proposition suivante a été formulée afin d'orienter la recherche [149].

Proposition :

En manifestant adéquatement les procédés au sein des problèmes de planification de la SC, l'industrie des P&P peut profiter de l'application d'une approche non conventionnelle de gestion de la SC axée sur les marges (« margin-based » au lieu de « recipe-based ») offrant, spécialement dans le contexte d'environnements d'affaires compétitifs, un potentiel d'amélioration de la rentabilité des opérations de la SC.

En accord avec cette proposition, une telle stratégie de gestion de la SC en P&P devrait être supportée par l'élaboration d'une méthode analytique combinant des outils d'optimisation de la SC et, étant donné les systèmes d'information à l'usine, de modélisation des coûts. Dans ce contexte, le développement d'un cadre d'aide à la décision doit être pratique et adapté aux processus décisionnels. Aussi, il est essentiel que les modèles de coûts puissent faire un lien clair entre les conditions d'opérations et la structure des coûts de l'usine. Enfin, ceci mène à trois principales questions de recherche.

Question de recherche I :

Comment la coordination des cycles d'approvisionnement, de production et de demande (i.e. éviter les « silos » de gestion ») peut-elle être améliorée par un outil d'aide à la planification de la SC qui tient compte de la nature des divers processus décisionnels impliqués (i.e. guider les décideurs)?

Question de recherche II :

Comment les données de procédé et de coûts peuvent-elles être intégrées afin de réconcilier les perspectives de production et d'affaires aux usines et d'assurer la caractérisation adéquate de la structure des coûts de production en fonction des conditions d'opérations?

Question de recherche III :

Pour une usine papetière de commodité, quel est le potentiel d'amélioration de la rentabilité de la SC lié à l'adoption d'une approche de gestion de la chaîne logistique basée sur la flexibilité de ses opérations manufacturières plutôt que de fixer les recettes de production?

CHAPITRE 3: MÉTHODOLOGIE

« Le savoir, pour moi, est une longue promenade.

Qu'importe le parcours; l'essentiel est de marcher. »

Albert Jacquard, Scientifique Généticien (1925-)

3.1 Objectifs des travaux

3.1.1 Objectif principal

Montrer les bénéfices, pour une industrie de commodité telle que les P&P, d'une approche axée sur les marges qui incorpore la capacité de production dans les problèmes de planification de la SC.

3.1.2 Objectifs spécifiques

Objectif spécifique #1 : Modélisation des coûts

Montrer que des informations utiles à la prise de décisions d'affaires peuvent être obtenues en caractérisant les coûts de production des usines P&P à partir d'une approche multidisciplinaire visant à mieux refléter l'impact des conditions d'opérations.

- Développer un cadre ascendant de modélisation, intégrant les données de procédé et de coûts aux usines, pour la caractérisation des coûts directs dans les environnements de production en continu;
- Proposer une approche « étape par étape » pour structurer et analyser les données clés de procédé et, pour développer un modèle adapté pour l'interprétation des coûts des régimes d'opération à l'usine;
- Montrer l'application de ces concepts pour une étude de cas en P&P.

Objectif spécifique #2 : Planification de la SC

Montrer la valeur de l'application d'outils avancés d'aide à la décision pour la gestion du flux de fibre dans la SC en P&P et, dans ce contexte, l'importance d'assurer le synchronisme entre les outils développés et les processus décisionnels de l'organisation :

- Développer un cadre de planification de la SC qui tient compte de l'intégration des nivaux décisionnels et de la nature dynamique des processus de prise de décisions;
- Montrer, pour une étude de cas en P&P, l'application du cadre de planification de la SC et les bénéfices potentiels reliés à l'amélioration de la coordination du flux de la fibre tout au long de la SC.

Objectif spécifique #3 : Approche ascendante de planification de la SC

Montrer que la combinaison des approches proposées de modélisation des coûts et de planification de la SC offre un cadre d'aide à la décision permettant de manifester les opérations manufacturières de l'usine au sein de la SC et donc, de soutenir des stratégies de gestion de la SC axées sur les marges :

- Montrer le potentiel d'amélioration de la rentabilité d'incorporer la flexibilité des opérations à l'usine comme « outils » pour la gestion de la SC axée sur les marges 1) pour une approche de gestion flexible de la capacité de production visant un meilleur alignement avec la demande profitable, 2) pour une approche exploitant la flexibilité des opérations pour aider à l'approvisionnement efficace en fibre de bois.

3.2 Méthodologie de recherche

La recherche en conception axée sur l'industrie présente un véritable défi lié à la réconciliation, pour un problème « ouvert », des besoins académiques et industriels. Ce type de recherche qui est effectué à partir d'un contexte industriel réel vise le développement de méthodes ou d'outils pratiques faisant le pont entre la recherche « théorique » de pointe et les applications industrielles de pointe. Le projet de recherche décrit dans cette thèse met donc l'emphase sur la compréhension des détails qui se manifestent dans un contexte réel et sur le développement d'approches pratiques et pertinentes pour l'industrie des P&P. Dans ce contexte, la recherche par études de cas s'avère un outil privilégié car elle permet au chercheur de retenir les aspects essentiels et holistiques caractérisant les phénomènes réels tels les processus organisationnels et de gestion. Les résultats et les analyses présentés ont donc été réalisés à partir de modèles et de situations caractérisant l'usine et la SC (pour ce, une variété de sources d'information a été considérée telles que des données du procédé, des documents, des entretiens, des présentations, etc.).

Peu d'indications sont disponibles sur la conception de la recherche par étude de cas. Cependant, tel que mentionné par Yin [149], il faut éviter de considérer celle-ci comme étant une variante ou un sous élément d'autres stratégies de recherche telles que les expériences. Il existe quatre types différents d'étude de cas selon qu'elle soit simple ou multiple et holistique ou imbriquée ([149]). La recherche présentée dans cette thèse correspond au type « simple et imbriqué ». Compte tenu des ressources disponibles, un seul cas a été inclus dans cette étude; il incorpore toutefois l'analyse plus extensive et en profondeur de trois volets de l'étude de cas globale.

La méthodologie suivie afin d'atteindre les objectifs de la section précédente est illustrée à la Figure 3.1. Elle comporte trois grandes partie: l'étape de définition consistant à sélectionner les études de cas et à développer une approche préliminaire,

l'étape d'analyse consistant à conduire chaque partie de l'études de cas globale et à en analyser les résultats et, l'étape de conclusion consistant à la synthèse de l'approche développée et au transfert technologique.

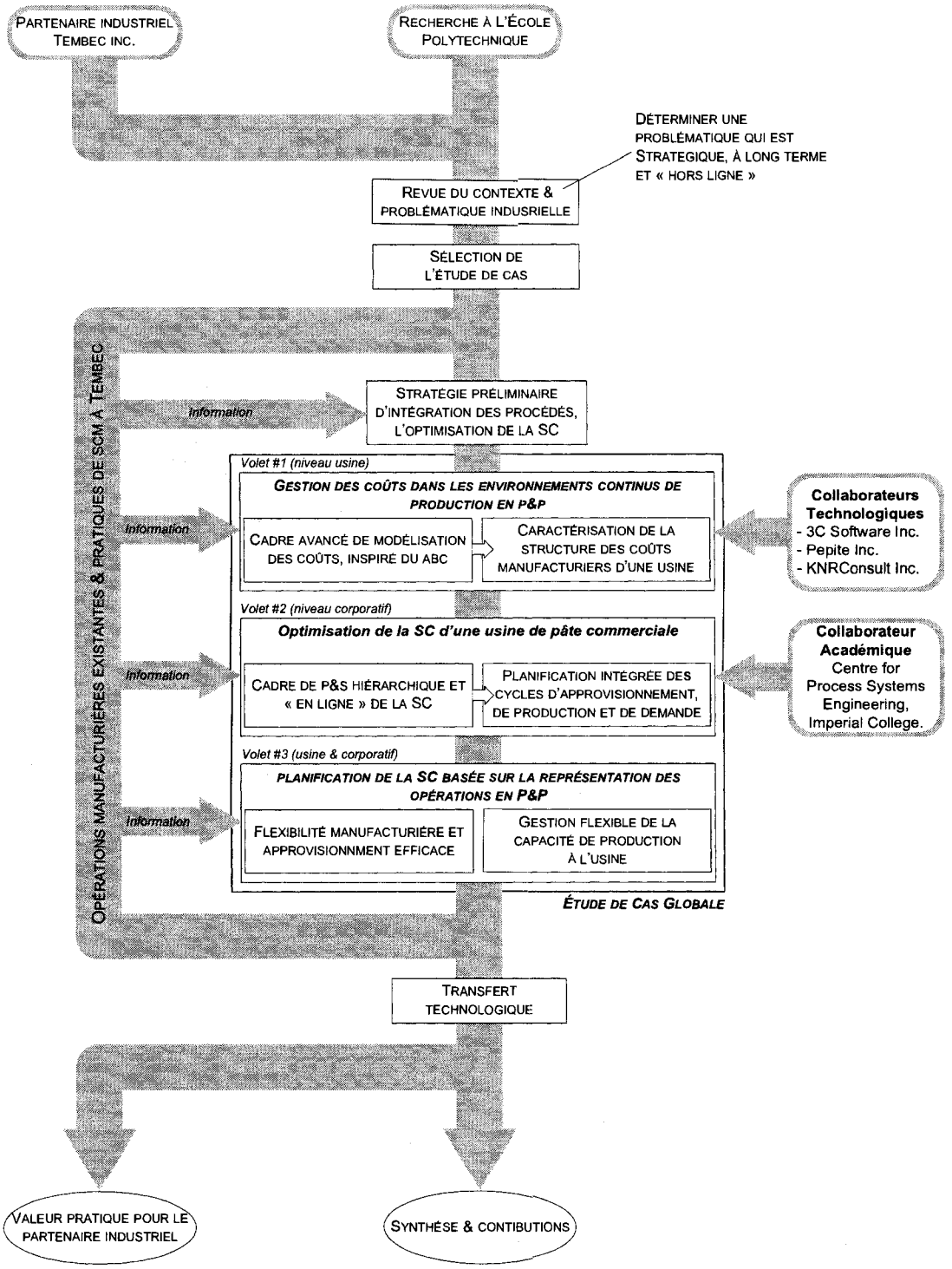


Figure 3.1 : Stratégie de recherche adoptée

Étape de définition

Étant donné qu'il n'y a qu'une étude de cas, il est très important de la sélectionner avec beaucoup de précautions afin d'atteindre les objectifs établis en l'accomplissant. Le cas étudié n'est pas un échantillon et doit être sélectionné comme un chercheur en laboratoire sélectionne le sujet d'une nouvelle expérience [149]. Aussi, afin d'assurer le succès de la collaboration avec le partenaire, il est primordial de définir une problématique qui est à la fois stratégique, à long terme et « hors-ligne ». Enfin, il est essentiel de développer une approche préliminaire. Il ne s'agit pas d'élaborer de grandes théories formelles mais plutôt de développer une vision adéquate du sujet étudié qui facilitera la phase de cueillette de donnée et la réalisation des trois unités d'analyse [149].

Étape d'analyse

Un des défis de la recherche en conception, et donc de ce projet, consiste en la nécessité d'adopter une approche multidisciplinaire et à l'intégration de plusieurs outils afin de répondre à une problématique industrielle spécifique. Tel que présenté à la Figure 3.1, l'étude de cas globale comporte trois volets :

- Le premier (relié à l'objectif spécifique #1) concerne les aspects de gestion des coûts de production;
- Le second (relié à l'objectif spécifique #2) aborde les aspects liés au développement d'outils d'aide à la décision;
- Le troisième, qui bâtit sur les approches développées lors des deux volets précédents, concerne les aspects liés à l'intégration des procédés manufacturiers au sein de la SC (relié à l'objectif spécifique #3).

Les interactions principales avec le partenaire industriel se sont faites au niveau de l'usine (volet #1), au niveau corporatif (volet #2) et conjointement aux deux niveaux

(volet #3). Enfin, le projet a aussi bénéficié de la participation de collaborateurs technologiques et académiques.

Étape de conclusion

Les approches et outils développés étant avancés comparativement aux pratiques courantes de l'industrie, les activités reliées au transfert technologique servent surtout à appuyer les vision d'avenir du partenaire quant à l'application des concepts de SCM et aussi, de façon plus pratique, à expliquer, basé sur l'utilisation de modèles et résultats quantifiables, les phénomènes, intuitions et compromis observés par les divers acteurs de la SC. Du point de vue de la recherche en conception, ces activités sont très importantes car elles permettent de pleinement comprendre les implications pratiques des résultats obtenus. Finalement, la synthèse de l'ensemble des travaux réalisés pour l'étude de cas globale a été effectuée afin de démontrer les contributions thématiques (P&P) et méthodologiques (PSE).

3.3 Définition de l'étude de cas

3.3.1 Description des opérations considérées de la SC

L'étude de cas considérée dans cette thèse consiste aux cycles d'approvisionnement en fibre, de production et de distribution/demande d'une usine existante de pâte commerciale à haut rendement (voir Figure 3.2). Les objectifs établis avec les gestionnaires principaux de l'usine et de la SC, étaient de :

1) Développer un cadre ascendant de modélisation pouvant caractériser la structure des coûts à l'usine et fournir aux gestionnaires de la SC une visibilité adéquate des procédés manufacturiers;
2) Proposer un outil d'optimisation de la SC pouvant fournir un support à la prise de décisions, au niveau tactique et opérationnel.

Puisque cette étude met l'accent sur l'alignement entre les opportunités d'approvisionnement en fibre, la capacité de production et la demande de pâte, l'analyse est limitée à la SC de la fibre (i.e. certains aspects de la SC, tels que la production et l'achat de produits chimiques, les stratégies de gestion énergétique, ont été exclus).

Le cycle d'approvisionnement considère différentes opportunités de fibre, sous la forme de copeaux ou de billes de bois. Différentes espèces de feuillus sont utilisées, dans des proportions variables, pour produire les divers types de pâte à l'usine. Compte tenu de la situation géographique de l'usine considérée, deux principales régions d'approvisionnement sont prises en compte. Chaque région comprend plusieurs fournisseurs internes et externes ainsi que des opportunités d'échange de fibre. Les fournisseurs internes réfèrent aux usines de sciages qui produisent des copeaux de bois comme sous-produit de leurs activités normales. Même si ces scieries font partie de la même compagnie, elles sont opérées de façon indépendante (maximise de la rentabilité des produits de bois) et il est difficile d'assurer la coordination de leurs activités avec celles de l'usine de pâte. Les fournisseurs externes référent, quant à eux, à l'achat sur le marché de copeaux et billes de bois à différents fournisseurs tels que les propriétaires des terres, les scieries privées, etc. Enfin, l'échange de fibre consiste en des dispositions prises avec des concurrents en vue d'échanger des copeaux ou billes de bois dans le but principal de réduire les frais de transport. Les coûts et capacités disponibles, pour chaque source potentielle et type de fibres (i.e. essences, copeaux, billes), doivent être pris en compte lors de la planification de l'approvisionnement.

Les billes de bois livrées à l'usine sont entreposées sur le site, et séparées selon les essences de bois. Puisque l'usine de pâte ne peut utiliser que des copeaux, des équipements adaptés sont requis pour transformer les billes de bois. Tous les copeaux de bois sur le site, qu'ils arrivent directement des fournisseurs ou du procédé de mise

en copeaux, sont entreposés dans de larges piles extérieures. Il peut y avoir une ou plusieurs piles de copeaux pour chaque essence de bois.

L'usine de pâte possède deux lignes de production similaires qui produisent de la pâte à haut rendement à partir de copeaux de bois durs. Plus précisément, les opérations manufacturières consistent en un procédé de type BCTMP (i.e. pâte chimico-thermomécanique blanchie) [150, 151] qui comprend quatre grandes étapes de production:

1) Le prétraitement chimique des copeaux ;
2) Le raffinage pressurisé des fibres de bois ;
3) Le blanchiment de la pâte ;
4) Le séchage et la finition.

Le produit final est vendu aux clients sous la forme de balles de pâte séchée. Trois caractéristiques principales définissent les grades de pâte produits: le bouffant, la blancheur et l'essence de bois. Ces caractéristiques peuvent être modifiées en variant les conditions d'opération, telles que le dosage de produits chimiques et l'énergie spécifique appliquée pour le raffinage des fibres de bois. Ces conditions d'opération sont dictées par des recettes, définies pour chaque grade et ligne de production de pâte. Une transition se produit lorsque la recette est changée sur une ligne de production, afin de produire un grade de pâte différent. Ces transitions qui dépendent de la séquence (i.e. du grade terminé et du nouveau grade) sont un des aspects importants typiquement pris en compte lors de la planification de la production. En règle générale, afin de minimiser les coûts des transitions à l'usine, les opérateurs tentent de modifier, dans une transition donnée, qu'une seule des trois caractéristiques mentionnées préalablement.

Enfin, en ce qui concerne le cycle de distribution/demande, il est nécessaire de faire la distinction entre la pâte produite pour le client interne et les clients externes. Dans le premier cas, la pâte est essentiellement produite par une des deux lignes de production et est utilisée par une usine de carton située sur le site industriel. La pâte diluée est acheminées directement par pipeline et donc, les opérations de séchage et finition de sont pas nécessaires. Dans le second cas, la pâte est produite pour satisfaire la demande de clients externes et doit être séchée et emballée avant d'être distribuée.

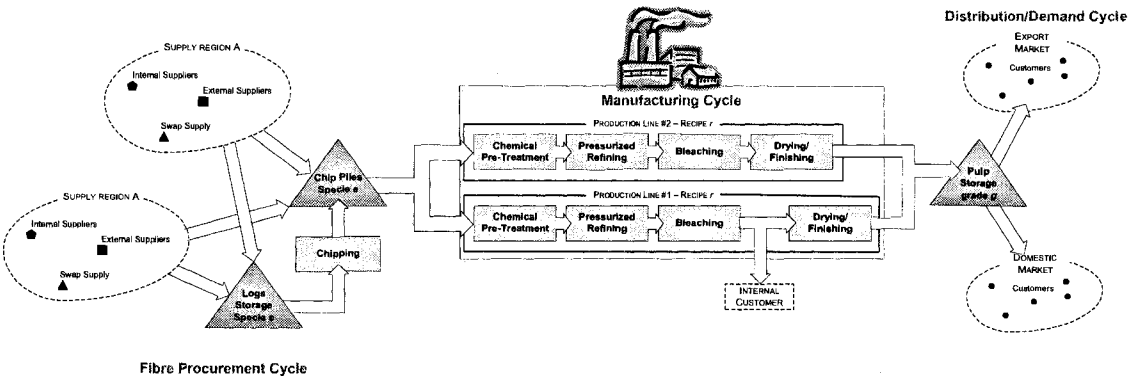


Figure 3.2 : Étude de cas : Cycles d'approvisionnement, de production et de demande d'une usine de pâte commerciale à haut rendement

3.3.2 Description des processus actuels de planification de la SC

Pour que la planification soit efficace, il est important d'aborder, d'une manière intégrée, les trois cycles de la SC de la fibre tel que présenté à la Figure 3.2. Puisque les processus décisionnels au sein de chaque cycle sont sous la responsabilité de différents gestionnaires, la SC est souvent opérée en «silos» (i.e. avec peu d'intégration entre les unités d'affaires). En fait, à l'exception de réunions mensuelles, chaque unité d'affaires a très peu de visibilité à travers la SC et ce, en matière d'information, d'actions/décisions et d'objectifs. Il est donc difficile d'évaluer et de quantifier l'impact des décisions locales de planification sur les autres unités d'affaires et d'identifier les compromis importants et opportunités globales d'amélioration de la rentabilité. Cette

situation, commune pour de nombreuses usines de P&P, affecte la coordination globale et mène inévitablement à la sous optimisation de la SC.

3.3.2.1 Cycles d'approvisionnement et de production (offre de fibre)

La planification de l'approvisionnement en fibre est un processus décisionnel dynamique devant être exécuté pour différents niveaux de décisions et à différentes fréquences.

Au niveau supérieur l'objectif consiste généralement à élaborer un plan annuel et à le réviser sur une base mensuelle. Cette planification, à plus long terme, est particulièrement importante car les délais associés à l'approvisionnement en fibres sont significativement plus longs que ceux reliés à la demande de pâte. Les informations considérées par le décideur, généralement mises à jour à tous les mois, incluent entre autres : le niveau d'inventaires, la capacité prévue de production, les prévisions de l'offre en fibre et les prévisions de la demande de pâte. Le processus de planification vise donc à identifier la stratégie d'approvisionnement la plus avantageuse et à fournir des lignes directrices pour la gestion des inventaires de matières premières et la sélection des fournisseurs. Enfin, les plans obtenus sont signalés sur une base mensuelle aux gestionnaires de l'usine afin de voir à l'alignement entre l'offre et les besoins en fibres.

À un niveau inférieur, la prise de décisions a pour objectif d'obtenir, aux meilleurs coûts, des copeaux et billes de bois et d'assurer que ceux-ci soient acheminés à temps selon le plan de production à l'usine. L'horizon de temps considéré varie généralement de 2 à 3 mois et les informations à la disposition du décideur sont mises à jour sur une base hebdomadaire. Ces dernières incluent, par exemple, les bons de commandes (i.e. les livraisons engagées de copeaux et de billes de bois), la capacité prévue des fournisseurs par semaine et par essences de bois, les niveaux d'inventaires,

la capacité de production de copeaux sur le site et le calendrier de production de l'usine (la consommation en copeaux est calculée à partir des recettes standards). Ce processus de planification vise donc à minimiser les coûts d'approvisionnement en sélectionnant, selon la situation, les meilleures opportunités de fibre et en évitant, autant que possible, d'obtenir des copeaux ou billes de bois des fournisseurs les plus dispendieux. Puisqu'elle doit s'adapter à la production de l'usine ainsi qu'aux imprévus liés à l'approvisionnement, la planification est révisée chaque semaine.

3.3.2.2 Cycles de production et de demande (demande de fibre)

À l'usine, il existe deux principaux processus décisionnels liés à la planification des opérations. Le premier, qui consiste à déterminer la séquence des campagnes de production[11] sur chacune des lignes de production de l'usine, se fait sur une base hebdomadaire et considère un horizon de temps d'environ 2 ou 3 mois. En plus des informations concernant les niveaux d'inventaires et la capacité de production, le décideur a accès à deux types différents d'information sur la demande: les commandes confirmées qui sont déjà engagées pour un client donné (et à une date fixée) et les commandes courantes qui peuvent varier en quantité et en temps. Compte tenu des incertitudes liées à la demande (en particulier pour les commandes courantes) et à la production (e.g. défaillance des équipements, production hors-spécifications, etc.), la planification des campagnes de production est un processus dynamique exigeant de fréquents ajustements. En règle générale, un plan de production de 3 mois offre une vue relativement précise de ce que sera la production dans les premières semaines et des indications plus générales sur la production pour les périodes de temps subséquentes.

---

[11] Les campagnes de production regroupent, pour les mêmes grades de pâte, différentes commandes des clients.

Idéalement, c'est ce plan de production qui est utilisé comme base de référence par les autres unités d'affaires pour leurs propres besoins de la planification.

Le second processus décisionnel, qui réfère à l'ordonnancement des commandes, a pour objectif principal de déterminer la répartition des commandes confirmées et courantes dans chacune des campagnes de production prévues. En plus de veiller à ce que les délais promis pour les commandes confirmées soient respectés, il fournit également une idée préliminaire quant à l'intégration des commandes courantes au plan de production. Ce processus décisionnel fournit donc le plan final de ce qui sera produit, et pour quels clients. Bien que les incertitudes soient significativement réduites, les opportunités liées à l'optimisation du profit sont plus limitées car le type de décisions effectué ne modifie généralement pas la structure de consommation des ressources à l'usine ou à travers la SC.

CHAPITRE 4: SYNTHÈSE

« The cure for boredom is curiosity. There is no cure for curiosity. »

Attribuée à Dorothy Parker, Écrivaine Américaine (1893-1967)

4.1 Liste des articles

La synthèse présentée est basée sur les articles suivants :

1) "Methodology for using real-time process data for cost modeling and supply chain decision-support in the pulp and paper industry" par Martin Laflamme-Mayer, Jason Linkewich et Paul Stuart. Publié dans Pulp and Paper Canada.
2) "Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part I: Framework for design and operations decision making" par Martin Laflamme-Mayer, Matty Janssen, Paul Naliwajka et Paul Stuart. Soumis à International Journal of Production Economics.
3) "Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part III: Application for pulp and paper manufacturing operations" par Martin Laflamme-Mayer, Sébastien Lafourcade, Kevin Riemer et Paul Stuart. Soumis à International Journal of Production Economics.
4) "Multi-scale on-line supply chain planning – Part A: Decision processes and framework for a high-yield pulp mill " par Martin Laflamme-Mayer, Nilay Shah, Stratos Pistikopoulos, Jason Linkewich et Paul Stuart. Soumis à AIChE Journal.
5) "Multi-scale on-line supply chain planning – Part B: Model formulation and test case results" par Martin Laflamme-Mayer, Nilay Shah, Stratos Pistikopoulos et Paul Stuart. Soumis à AIChE Journal.

6) "On the evaluation of minimum inventory levels for aggregate planning" par Martin Laflamme-Mayer, Nilay Shah, Stratos Pistikopoulos et Paul Stuart. Soumis à Computers and Chemical Engineering.

7) "Capacity management for market pulp production" par Martin Laflamme-Mayer, Steve Raymond, Jason Linkewich et Paul Stuart. Soumis à Tappi Journal.

8) "Manufacturing flexibility to support effective fibre supply" par Martin Laflamme-Mayer, Steve Raymond, Jason Linkewich et Paul Stuart. Soumis à Tappi Journal.

Les deux articles suivants sont basés sur les mêmes travaux mais ne sont pas inclus dans cette thèse :

9) "Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part II: Retrofit process design application" par Matty Janssen, Paul Naliwajka et Paul Stuart. Soumis à International Journal of Production Economics [152].

10) "Survey indicates mills' need to exploit IT systems with new business model" par Matty Janssen, Martin Laflamme-Mayer, Houssemane Zeinou et Paul Stuart. Publié dans Pulp & Paper [95].

4.2 Stratégie générale de la synthèse

4.2.1 Cadre de gestion de la chaîne logistique proposé

De nos jours, étant donné l'ubiquité des technologies de l'information, les procédés et les processus d'affaires génèrent une vaste quantité de données et ce, tant pour les cycles d'approvisionnement, de production et de demande. Les systèmes

d'entreprise, qui intègrent certaines de ces données[12], facilitent le partage de l'information, à haut niveau, tout au long de la SC. La visibilité accrue dont disposent maintenant les décideurs ainsi que les bonnes pratiques (processus décisionnels) qui ont découlées de l'implantation de ces systèmes ont eus un impact positif sur la qualité des décisions reliées à la gestion de la SC. Toutefois, les bénéfices observés sont liés en grande partie à l'utilisation des systèmes eux-mêmes plutôt qu'au développement de compétences avancées et durables de gestion de la SC en P&P. En fait, compte-tenu du niveau d'agrégation de l'information et des outils utilisés pour supporter les processus actuels de gestion, il est typiquement difficile d'évaluer les compromis entre les cycles de la SC. L'utilisation, pour la prise de décisions d'affaires, d'information trop simplifiée sur la production est un obstacle à l'application de stratégies visant à mieux exploiter la capacité des procédés dans le contexte de la SC. Afin de relever le défi que représente l'intégration du cycle manufacturier au sein de la SC, une approche analytique de planification, qui comporte trois phases importantes, a été développée (Figure 4.1).

Phase A. Développement d'un outil d'aide à la planification de la SC : Cet outil renforce les processus actuels de décisions car il permet d'évaluer systématiquement et efficacement les compromis entre les cycles d'approvisionnement, de production et de demande et fournit des informations nouvelles et importantes aux décideurs (e.g. plan de production optimal, sélection optimale des fournisseurs de fibre, répartition idéale des commandes de pâte, niveaux d'inventaires, etc.)

---

[12] Les données intégrées sont généralement reliées aux transactions (e.g. commandes, achats, etc.), aux aspects financiers (e.g. comptes payables et recevables) ainsi qu'aux des informations agrégées décrivant la performance des systèmes gérés (e.g. capacité mensuelle d'approvisionnement, efficacité mensuelle de production aux usines, etc.).

Phase B. Développement d'un outil de modélisation des coûts axé sur les opérations : Pour adopter en toute confiance une approche de SC qui incorpore la capacité de production, il est nécessaire d'être en mesure de bien comprendre l'impact des différentes conditions d'opération sur la structure des coûts de l'usine. Pour ce, le développement et l'application d'un modèle de coûts basé sur l'analyse des données de procédé (ceci est un aspect clé étant donné la nature empirique des P&P) sont essentiels afin de mieux caractériser les coûts manufacturiers en P&P.

Phase C. Développement d'une approche de gestion axée sur les marges : En combinant les outils développés aux étapes précédentes, il est possible de développer une compétence unique de gestion de la SC (dite « axée sur les marges ») qui, au lieu de s'accommoder aux usines, utilise la flexibilité des opérations manufacturières de celles-ci afin d'améliorer la rentabilité des opérations de la SC.

Puisque du point de vue de l'industrie, le développement d'une telle capacité avancée de gestion ne peut se faire qu'étape par étape, la modélisation avancée des coûts, la planification de la SC et l'approche de gestion de la SC axée sur les marges peuvent être considérées comme différents niveaux de compétence (ou phase) à atteindre. Clairement, l'objectif ultime, i.e. réaliser le potentiel associé à la Phase C, ne peut être atteint que si une compagnie papetière développe préalablement les compétences associées aux Phases A et B. En pratique, vu le niveau élevé d'efforts impliqué pour l'application des approches proposées à chacune des phases, un tel programme de gestion de la SC ne serait déployé qu'à la condition que chacune de celles-ci puissent se justifier d'elle-même par la valeur qu'elles apportent (et ce, indépendamment des bénéfices liés à l'objectif ultime). Pour ces raisons, la synthèse des travaux a été organisée de façon à refléter chacune de ces phases et à illustrer, au-

delà de l'élaboration des concepts et modèles, les bénéfices potentiels liés au développement de ces compétences. Finalement, puisqu'ils sont obtenus pour des études de cas définies à partir de situations industrielles réelles, les résultats présentés montrent comment chacune des phases se manifeste dans un contexte d'application pratique et donc, démontrent la faisabilité de l'approche générale proposée.

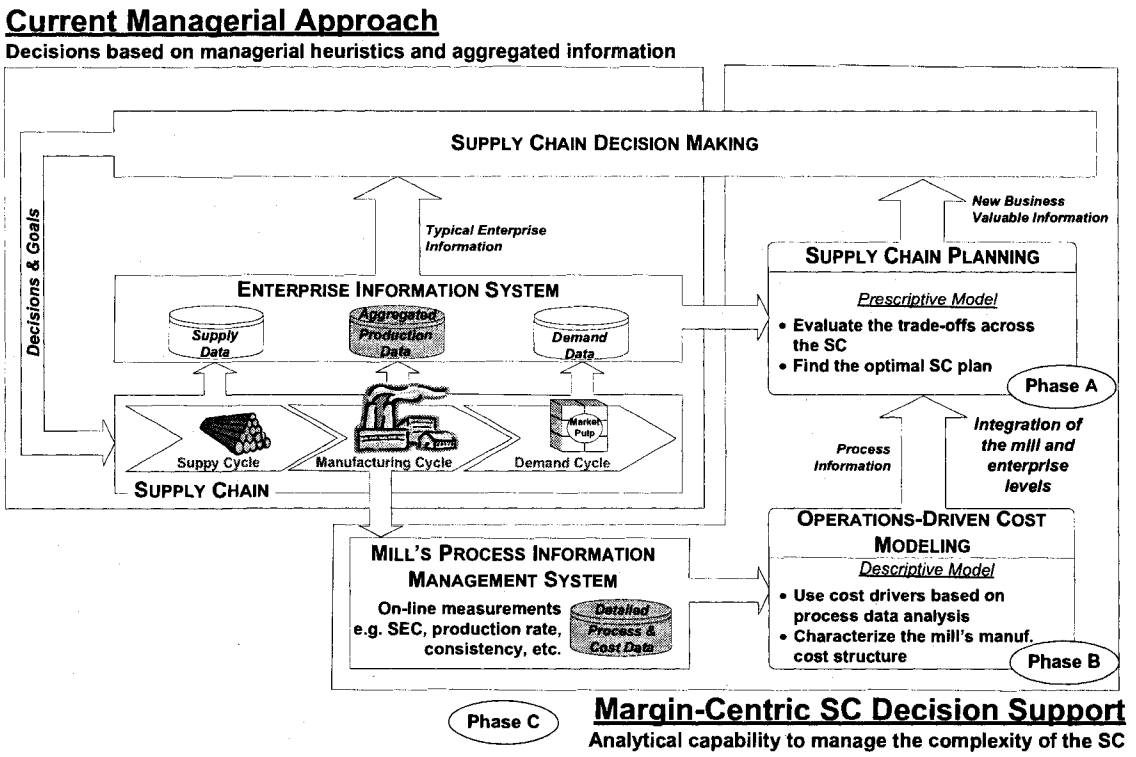


Figure 4.1 : Cadre de planification de la SC axé sur les marges[13]

4.2.2 Organisation de la synthèse et lien avec les articles:

Cette section décrit comment chacun des articles s'intègre dans le contexte de chacune des phases introduites plut tôt. Tout d'abord, l'Article I explique la vision

[13] Voir articles 7 et 8.

préliminaire élaborée (voir Section 3.2), en début de projet, pour la caractérisation des procédés d'opérations et l'incorporation de ceux-ci dans le problème de planification de la chaîne logistique en P&P. Basé sur une analyse générale de l'étude de cas (« mapping ») et une revue des différentes pratiques en P&P, il expose les exigences d'une approche ascendante de gestion de la SC. Il met aussi en évidence la nécessité d'adopter une perspective multidisciplinaire, intégrant les données de procédé et de coûts, pour caractériser l'utilisation des ressources et extraire des informations pertinentes pour supporter la planification à court et long termes de la SC. Enfin, bien qu'il ne soit pas directement associé à l'une des trois phases, l'Article I a guidé les activités détaillées qui ont été accomplies tout au long du projet. Les Articles II à VIII, quant à eux, décrivent les concepts développés ainsi que leur application à une étude de cas réelle pour chacune des trois phases (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Description des articles

Phase A – Planification de la SC	
Article IV	Il propose un cadre de planification pour aider à la gestion de la SC d'une usine de pâte commerciale à haut rendement. L'approche est fondée sur une revue des processus décisionnels de planification et aussi, sur les objectifs de prise de décisions fixés en collaboration avec le partenaire industriel. L'outil d'aide à la décision proposé incorpore un niveau supérieur adapté à la planification tactique ainsi qu'un niveau inférieur pour la planification opérationnelle.
Article V	Il décrit les modèles d'optimisation développés pour les niveaux inférieur et supérieur du cadre de planification ainsi que la stratégie d'intégration entre ces modèles. Une analyse systématique des modèles est aussi effectuée afin de caractériser les propriétés d'agrégation. Les résultats présentés montrent que l'application d'un tel outil d'optimisation permet d'aborder de façon systématique les compromis entre les cycles de la SC et aussi, entre les niveaux décisionnels. Ceci offre un potentiel significatif d'amélioration de la compétitivité des usines P&P.
Article VI	Il propose une formulation permettant d'assurer que le coût des inventaires calculé dans la planification agrégée constitue une borne inférieure au coût des inventaires déterminé au niveau détaillé. Ceci est une condition nécessaire à la démonstration, dans l'Article V, que le modèle agrégé (niveau supérieur) est une relaxation du modèle détaillé (niveau inférieur).

Tableau 4.1 : Description des articles (suite)

Phase B – Modélisation des coûts axée sur les opérations	
Article II	Il propose une approche sophistiquée de modélisation des coûts, développée dans le cadre d'une collaboration entre des ingénieurs et comptables, facilitant la caractérisation de la structure des coûts manufacturiers dans les environnements de production continus. Comparée aux méthodes traditionnelles d'évaluation des coûts, l'approche proposée met l'accent sur l'intégration des informations de procédé afin de mieux refléter l'importance de la perspective procédé comme source de coûts aux usines.
Article III	Il montre l'application du modèle de coûts élaboré, dans un contexte opérationnel, pour le cas d'une usine existante de pâte à haut rendement. Il souligne les étapes requises pour structurer et analyser les données clés de procédé et, pour développer un modèle adapté pour l'interprétation des coûts des régimes d'opération à l'usine. Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible, grâce à l'utilisation d'inducteurs de coûts liés au procédé, de caractériser la structure des coûts manufacturiers pour la production des divers grades de pâte à l'usine.
Phase C – Approche de gestion de la SC axée sur les marges	
Article VII	Il montre le potentiel d'amélioration de la rentabilité, pour une usine de pâte commerciale, d'une stratégie de gestion flexible de la capacité de production permettant de mieux aligner la production et la demande de pâte. Compte tenu de l'importance des compromis entre les perspectives de production et de la SC, cette approche axée sur les marges a été abordée en combinant les techniques de modélisation des coûts et de planification de la SC présentées au Phase A et B.
Article VIII	Il montre le potentiel d'amélioration de la rentabilité, pour une usine de pâte commerciale, d'une stratégie de gestion visant l'exploitation de la flexibilité des opérations à l'usine, afin de soutenir des stratégies d'approvisionnement en fibre plus efficaces. Cette approche axée sur les marges a été abordée en combinant les techniques de modélisation des coûts et de planification de la SC présentées au Phase A et B.

4.3 Planification de la SC (Phase A)

4.3.1 Cadre de planification hiérarchique « en ligne »

La planification intégrée des cycles d'approvisionnement, de production et de demande est un processus décisionnel complexe et essentiel afin d'assurer la réussite financière des producteurs de pâte commerciale. Les décisions prises ne devraient pas être basées sur des heuristiques traditionnelles de gestion, mais plutôt à partir d'outils

d'aide à la décision permettant d'identifier les meilleures stratégies afin de maximiser la rentabilité globale de la SC.

Un des objectifs importants visé lors de l'élaboration du cadre de planification était de tenir compte des particularités intrinsèques des divers processus de gestion impliqués dans le cadre de la planification de la SC de l'usine de pâte considérée. Tel indiqué à la Section 3.3.2, le processus général de planification incorpore deux niveaux importants ayant des objectifs différents et donc, devant considérer différents horizons temporels et diverses problématiques. Il est essentiel que différents décideurs soient responsables de ces différents niveaux de décisions car chacun d'entre eux possède une expertise et une connaissance intime des problématiques particulières auxquelles ils font face. Il est donc nécessaire que l'approche de planification développée fournisse une structure globale qui guide ces décideurs de manière intégrée et assure la visibilité au travers la SC et les niveaux de gestion.

Aussi, il est important de reconnaître que les processus décisionnels à chaque niveau sont répétés, pour des fréquences et à des moments différents, afin de tenir compte de l'évolution de la situation. Au moment où ils prennent des décisions, les décideurs n'ont pas à leur disposition toutes les informations pertinentes et, par conséquent, doivent s'accommoder d'un ensemble de données historiques, actuelles et futures (i.e. les prévisions). Au fil du temps, de nouvelles informations deviennent disponibles et sont utilisées afin de mettre à jour et d'améliorer la planification. En outre, les décideurs sont constamment confrontés à de nouveaux événements (e.g. modifications des commandes, arrêts imprévus de production, etc.) et doivent réagir au mieux, étant donné les décisions qui ont été déjà prises et qui ne peuvent plus être changées. Donc, l'approche de planification développée doit aussi être en mesure de s'adapter à cette nature dynamique des processus réels de prise de décisions.

Le cadre de planification hiérarchique « en ligne » développé est schématisé à la Figure 4.2. Cette approche assure la cohérence entre les deux niveaux décisionnels : le niveau supérieur (niveau 1) est adapté pour la planification tactique et le niveau inférieur (niveau 2), pour la planification opérationnelle. En fait, au niveau supérieur, un modèle de planification agrégée de la capacité est formulé afin de déterminer, à plus long terme, l'équilibre optimal entre l'offre et la demande de fibres. Au niveau inférieur, un modèle de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes est utilisé pour maximiser la rentabilité de la SC de l'usine de pâte étant donné l'approvisionnement en fibre, la capacité de production et la demande de pâte. Des flux d'information assurent l'intégration entre ces niveaux décisionnels. De bas en haut, l'intégration se fait via les systèmes d'information qui assurent que les données utilisées par le modèle supérieur soient consistantes avec celles disponibles au niveau inférieur (e.g. les informations plus précises sur l'offre de fibre et la demande de pâte pour les trois premiers mois). De haut en bas, certains résultats obtenus lors de l'utilisation du modèle de niveau 1 sont transférés au niveau 2 afin d'assurer que les perspectives à plus long terme soient prises en compte.

Le paradigme de gestion, tel que discuté par Van Der Vorst [13], est utilisé pour décrire l'intégration de ces outils de planification au sein de la structure organisationnelle de l'entreprise. Tel que représenté, il comprend trois éléments importants: le système géré (« managed system »), le système d'information (« information system ») et le système de gestion (« managing system »). Dans ce cas, le système géré réfère aux composantes de la SC qui sont pertinentes de considérer, étant donné l'objectif visé à chaque niveau de planification. Le niveau de détails doit être compatible avec le niveau décisionnel et donc, inclure les aspects de la SC qui sont sous le contrôle du décideur. Les systèmes d'information de l'entreprise et de l'usine permettent l'acquisition et la gestion des données. Divers types de données, provenant de sources internes (e.g. niveaux des inventaires) et externes (e.g. commandes des

clients), sont disponibles pour décrire l'état du système géré. Enfin, compte tenu des informations disponibles, le système de gestion vise à prendre des décisions et à fixer les objectifs qui guideront l'exécution du système géré, afin d'obtenir des performances maximales.

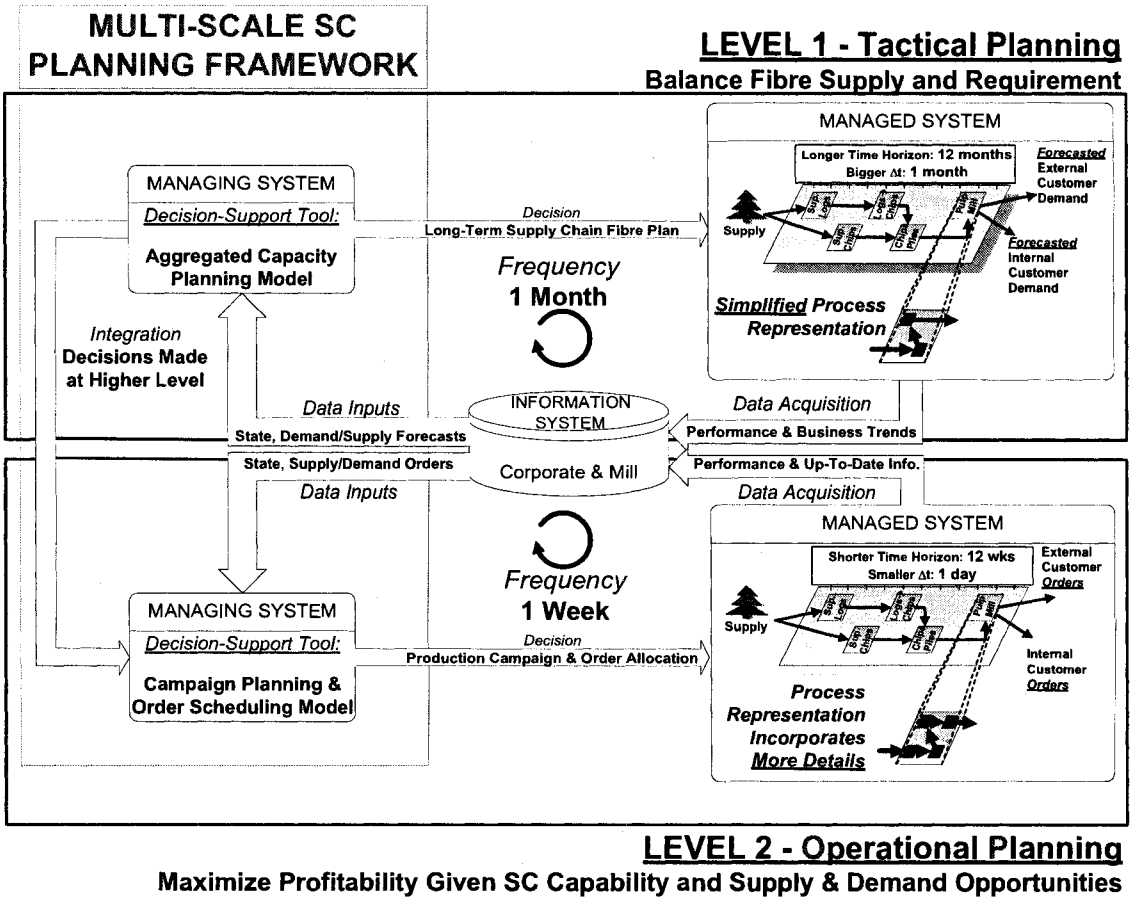


Figure 4.2 : Représentation du cadre de planification hiérarchique « en ligne » et de son intégration au sein de la structure organisationnelle de l'entreprise[14]

[14] Voir article 4.

4.3.1.1 Niveau 1: Planification agrégée de la capacité

Le modèle de planification agrégée de la capacité fournit un support à la prise de décisions tactique et est principalement utilisé par les gestionnaires responsables de l'approvisionnement en fibre. Il a pour objectif de déterminer un plan de gestion à long terme indiquant l'équilibre optimal entre l'offre et la demande de fibres dans la SC. À ce niveau, un horizon de temps de un an et un pas de temps d'un mois sont utilisés. Puisque les prévisions (offre de fibre, demande de pâte) ne sont disponibles qu'à tous les mois, le modèle de niveau 1 est exécuté sur une base mensuelle. Chaque mois, l'état correspondant au système géré est mis à jour, les nouvelles prévisions sont intégrées et l'horizon temporel considéré est avancé d'un mois.

Puisque le niveau tactique offre une perspective à plus long terme, une représentation simplifiée du système géré est utilisée. Néanmoins, il incorpore des contraintes de capacité, de continuité (bilans de masse) et d'affectation (définies pour chaque mois) et considère les principaux éléments de coûts pour la prise de décisions. Le modèle élaboré, inspiré par le problème de planification de la production présenté par Guillén et al [120] (voir Annexe I), est assez simple pour réduire la complexité mathématique, mais fournit suffisamment de détails pour appuyer la prise de décisions. Il est formulé par programmation linéaire et en nombres entiers et incorpore une représentation discrète du temps. Il peut être résumé comme suit:

Étant donné | Les prévisions de la capacité et des coûts d'approvisionnement en fibre, les coûts et les niveaux initial et final des inventaires, la capacité de production et les coûts manufacturiers à l'usine, les prévisions de la demande et des prix de la pâte ;

Trouver *(pour chaque mois)*	Les meilleures opportunités d'approvisionnement en fibre, le flux de fibre optimal tout au long de la SC, les niveaux d'inventaire requis, le nombre de jours de production pour chaque grade de pâtes et les opportunités de demande qui maximiseront le bénéfice total pour les 12 mois de l'horizon temporel considéré.

Enfin, les résultats fournis par le modèle de niveau 1 aident essentiellement à déterminer une stratégie équilibrée de gestion de la fibre le long de la SC en fonction de l'évolution prévue (prévisions à long terme) de l'approvisionnement en fibres et de la demande de pâte.

4.3.1.2 Niveau 2: Planification des campagnes de production et ordonnancement des commandes

Au niveau 2, le modèle de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes fournit un support pour la planification opérationnelle. Il a pour objectif de déterminer la séquence optimale des campagnes de production et de répartir les commandes entre celles-ci. À ce niveau, un horizon de temps de trois mois et un pas de temps d'une journée sont considérés. Contrairement au niveau 1, la planification n'est pas faite à partir de prévisions mais sur la base d'informations plus précises telles que les commandes courantes et confirmées. Toutefois, il subsiste plusieurs incertitudes notamment dû au fait que les commandes ne sont pas toutes connues (pour les 3 mois à venir) et qu'elles deviennent peu à peu disponibles. Par souci de cohérence avec les processus décisionnels de l'usine à l'étude, le modèle au niveau 2 est exécuté sur une base hebdomadaire. Chaque semaine, l'état correspondant au système géré est mis à jour, de nouvelles informations sur les commandes sont intégrées et l'horizon temporel considéré est avancé d'une semaine.

Pour les besoins du niveau opérationnel, une représentation plus exacte du système géré est nécessaire. En fait, le modèle élaboré, inspiré par les travaux de Bredstrom & al. [67] (voir Annexe I), incorpore des contraintes détaillées, définies pour la plupart sur une base quotidienne, de sorte à garantir que la logique de production de l'usine soit bien reflétée au sein de la SC. Entre autres, des contraintes de capacité et d'affectation sont utilisées respectivement pour représenter les limitations des ressources disponibles (e.g. capacité des équipements) et les décisions discrètes devant être faites (e.g. les transitions, la production (ou pas) d'un grade de pâte au cours d'une période donnée, etc.). Bien que cette représentation des opérations augmente la complexité du modèle, cela est compensé par la réduction de l'horizon de temps considéré (seulement trois mois). Enfin, le modèle est formulé, comme le niveau 1, par programmation linéaire et en nombres entiers et incorpore une représentation discrète du temps. Il peut être quant à lui être résumé comme suit:

Étant donné	La capacité et les coûts détaillés d'approvisionnement en fibre, les coûts et les niveaux initial et final (cibles) des inventaires, la capacité de production (y compris les transitions) et la structure de coûts détaillée de l'usine, les commandes actuelles des clients (quantités, délais visés et les prix de vente) ;
Trouver *(pour chaque jour)*	Le plan détaillé d'approvisionnement en fibre (coût, quantité, livraison), le flux de fibre optimal tout au long de la SC, les niveaux détaillés d'inventaire requis, le plan optimal de production (campagne, transition, capacité) et la sélection/répartition des commandes <u>qui maximisent le bénéfice total pour l'horizon temporel considéré</u>.

Enfin, les résultats de ce modèle fournissent aux décideurs des indications plus précises aidant à gérer la complexité de la SC et à maximiser sa rentabilité, compte tenu de l'environnement d'affaires (i.e. opportunités d'approvisionnement et de demande).

4.3.1.3 Intégration des modèles de planification tactique et opérationnelle

L'intégration des niveaux 1 et 2 est d'une importance considérable car la planification opérationnelle ne peut se faire en toute confiance sans prendre en compte les perspectives à long terme. Par exemple, toutes décisions à court terme liées à la réduction de la capacité de production doit considérer la demande prévue au cours des mois ultérieurs. La planification opérationnelle doit maximiser la rentabilité à court terme mais ce, sans compromettre la capacité de maximiser la rentabilité dans l'avenir. Grâce à la stratégie d'intégration choisie, le niveau supérieur fournit des indications qui permettent au modèle du niveau inférieur de tenir compte, indirectement, des tendances futures d'offre de la fibre et de demande de pâte (et ce, tout en gardant un horizon de temps de trois mois). Afin d'expliquer cette stratégie d'intégration et les flux d'informations entre les deux modèles, il est nécessaire de présenter comment le cadre de planification hiérarchique « en ligne » devrait être implanté de façon pratique (Figure 4.3).

Comme on peut le voir, l'application du cadre de planification, pour un mois donné, se fait en cinq étapes principales.

Étape 1 Le modèle agrégé (niveau 1) est exécuté, basé sur les prévisions de l'offre de fibre et de la demande de pâte, pour les mois M1 à M12. Pour assurer la cohérence entre les trois premiers mois du niveau 1 et les mois correspondants au niveau inférieur, les prévisions utilisées pour M1, M2 et M3 sont déterminées à partir des données détaillées disponibles au niveau 2 (e.g. les commandes de pâte). Ceci est essentiel car, si la situation à court terme est mal représentée, alors les indications fournies par le modèle de niveau 1 ne seront pas fiables et introduiront des distorsions au niveau inférieur.

Étape 2 Le modèle détaillé (niveau 2) est exécuté, basé sur des données plus précises caractérisant l'offre de fibre, la demande de pâte ainsi que l'état actuel du système, pour les semaines WK1 à WK12.

Étape 3 *Étape 4* *Étape 5* Pour chacune des autres semaines du mois en cours, l'ensemble des données est mis à jour et le modèle au niveau 2 est exécuté de nouveau. Puisque la semaine WK12 reste la dernière semaine à chaque fois que le modèle est exécuté, l'horizon de temps considéré rétrécit de 12 à 9 semaines. Cette approche est utilisée afin d'assurer la cohérence entre le modèle détaillé et la disponibilité (et la résolution) des informations provenant du niveau supérieur.

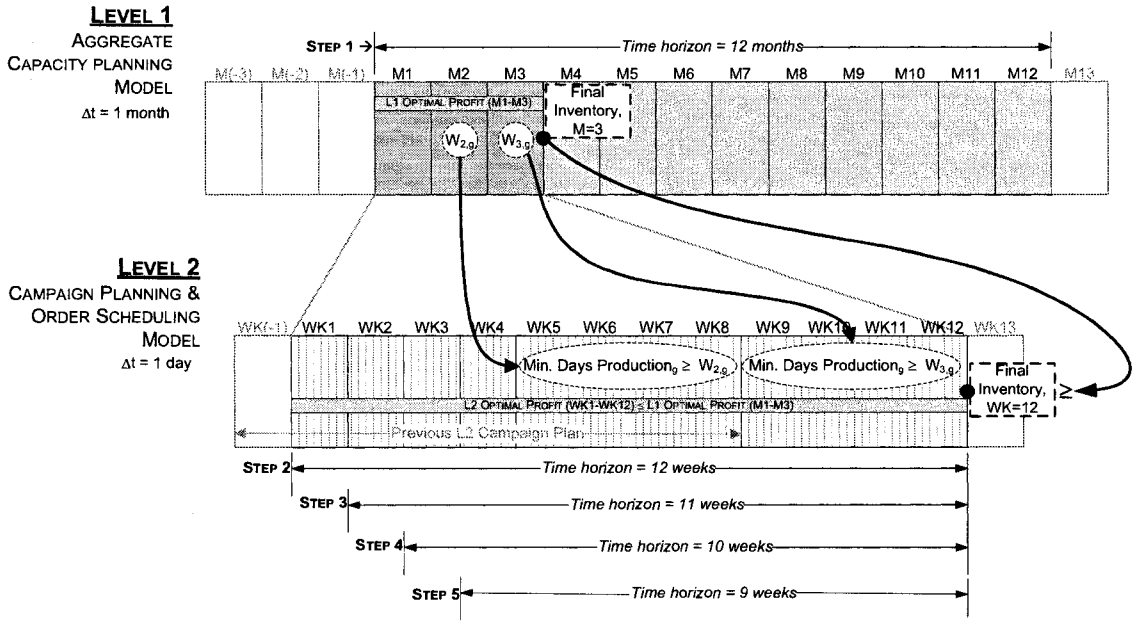


Figure 4.3 : Application, pour un mois donné, du cadre de planification hiérarchique « en ligne »; intégration des modèles de niveau 1 et 2[15]

(M : Mois, WK : Semaine)

[15] Voir article 4.

Enfin, trois types d'information sont intégrés entre les modèles de niveau 1 et 2. Tout d'abord, les niveaux des inventaires (pour la pâte, les copeaux et les billes de bois) à la fin du troisième mois (M3) sont utilisés comme cibles, au niveau 2, pour les inventaires à la fin de l'horizon de temps (WK12). Puisque ces cibles sont déterminées au niveau 1, en fonction des prévisions annuelles, elles forcent le modèle inférieur à être cohérent avec les perspectives à long terme d'approvisionnement et de demande. Le second type d'information intégré consiste, pour les mois M2 et M3, au nombre de jours de production, pour chaque grade de pâte. Puisque que les commandes des clients ne sont pas pleinement connues à l'avance (spécialement pour les deuxième et troisième mois), ces informations permettent de fournir une idée préliminaire de la production au niveau 2. Bien entendu, on suppose que, pour le premier mois du niveau 2, les commandes sont totalement connues et donc, qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer cette condition. Finalement, puisque le modèle agrégé est une relaxation du problème de planification détaillée (voir section suivante), le profit optimal obtenu au niveau 1 (calculé pour les trois premiers mois) peut être utilisé comme borne supérieure au profit calculé au niveau 2 (i.e. profit niveau 2 ≤ profit niveau 1), pour potentiellement faciliter la résolution du modèle détaillé.

4.3.2 Caractérisation de l'agrégation

Pour les approches hiérarchiques, l'analyse des propriétés d'agrégation est un élément très important à aborder afin de comprendre les limites en termes d'optimalité et de faisabilité [153]. Pour le cadre de planification présenté, il est possible de démontrer, grâce à l'analyse systématique des contraintes et des fonctions objectif à chaque niveau, que le modèle agrégé (niveau 1) est une relaxation du modèle détaillé (niveau 2). Pour cela, deux caractéristiques doivent être assurées [154]: 1) la région faisable du modèle inférieur doit être incluse dans la région faisable définit du modèle agrégé et 2) la valeur de la fonction objectif du niveau supérieur doit être supérieure ou

égale à la valeur de la fonction objectif du modèle détaillé, pour toutes solutions envisageables au niveau inférieur. Puisque, de façon générale, la formulation mathématique au niveau 1 peut être obtenue en effectuant des manipulations mathématiques valables à partir de la formulation détaillée, il est possible d'analyser chacune des contraintes et fonctions objectif et de prouver ces conditions. Pour ce, il est important de souligner que le même horizon de temps a été considéré et que les contraintes ainsi que la fonction objectif de la formulation agrégée ont été exprimées en fonction des variables et paramètres du modèle détaillé.

4.3.2.1 Analyse des contraintes

Cette première analyse a permis de montrer, par comparaison, que les contraintes du problème détaillé sont plus restrictives que les contraintes du problème agrégé. En fait, toute solution faisable au niveau inférieur est aussi possible dans la formulation agrégée car elle maintient des niveaux d'inventaire non négatifs, n'outrepassent pas les limites de capacité établies et, respectent toutes les contraintes d'affectation (qui sont beaucoup plus simples qu'au niveau détaillé).

4.3.2.2 Analyse des fonctions objectif

En comparant les termes des fonctions objectif des deux niveaux, il est possible de démontrer que le problème agrégé de planification offre une borne supérieure au profit correspondant calculé au niveau détaillé. Pour ce, deux éléments de coût de la fonction objectif au niveau 1 requièrent un traitement particulier. Tout d'abord, il est nécessaire d'assurer que le coût des transitions calculé[16] soit une borne inférieure au même coût déterminé au niveau détaillé. Cette problématique a été abordée en basant le

---

[16] Contrairement au modèle détaillé, les transitions ne sont pas explicitement représentées au niveau agrégé.

calcul de ces coûts sur le nombre minimum de transitions possible, pour chaque période du niveau 1.

Il est également nécessaire que les coûts des inventaires dans la formulation agrégée soient une borne inférieure aux coûts correspondants calculés dans le modèle détaillé. Ceci n'est pas possible si ces coûts sont calculés, pour chaque période agrégée, sur la base d'une simple moyenne entre les niveaux d'inventaires initial et final. En fait, dans certains cas, il est possible que les coûts calculés au niveau agrégé soient surestimés par rapport aux coûts déterminés par le modèle détaillé (voir le profit « average » à la Figure 4.4). Pour éviter cette situation, la section suivante propose une formulation particulière pour le calcul des niveaux d'inventaire dans le problème de planification agrégée.

4.3.2.3 Minimum du niveau d'inventaire moyen

Afin d'assurer la relaxation, une approche a été développée afin de déterminer le minimum possible du niveau d'inventaire moyen (AMI) pour une période agrégée[17] (voir le profil « minimum» à la Figure 4.4). L'évaluation de cet AMI se fait à partir des taux maximums de consommation et d'accumulation des produits, de la demande totale de produits et des niveaux initial et final des inventaires d'une période agrégée. Plus spécifiquement, la méthode consiste à calculer, par interpolation linéaire, les profils d'inventaire correspondant aux cas du plus rapide épuisement (à partir du niveau initial d'inventaire) et de la plus rapide accumulation (jusqu'au niveau final d'inventaires) de produit.

---

[17] Pour des problèmes de planification agrégée de type MILP et ayant une représentation discrète du temps.

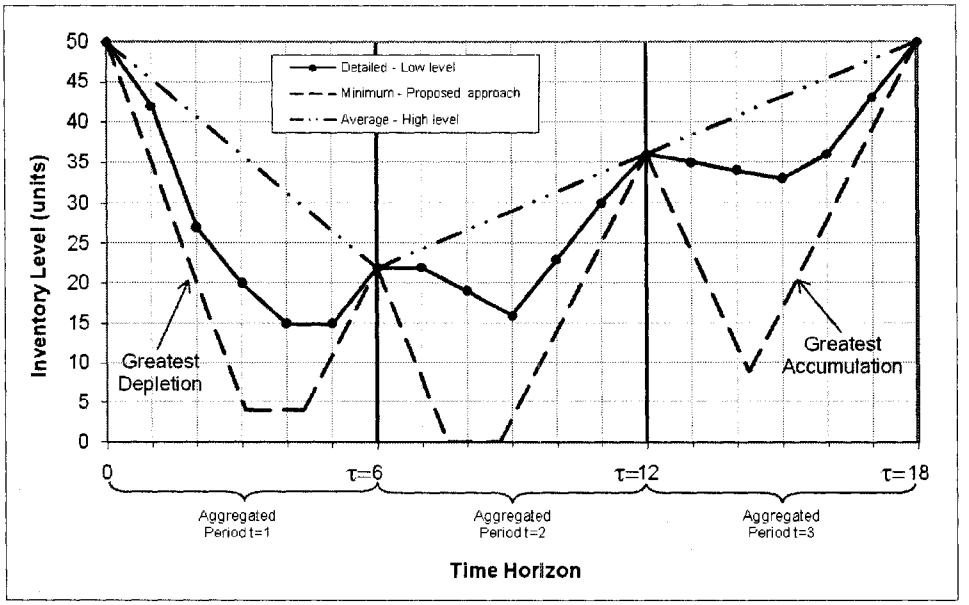


Figure 4.4 : Résultats de l'application de la méthode d'évaluation du AMI, pour un problème de détermination de grandeur des lots[18]

Tel que démontré à la Figure 4.4, pour le cas simple d'un problème de détermination de la grandeur des lots (« lot-sizing »), la procédure élaborée garantit que le coût des inventaires calculé au niveau agrégé est une borne inférieure aux coûts calculés pour le modèle détaillé. Bien que ce résultat soit pour le cas général, la formulation proposée peut aussi être simplifiée pour des applications particulières. Par exemple, dans le problème abordé de planification de la SC d'une usine de pâte, le calcul du AMI associé aux inventaires de copeaux de bois se fait basé sur le pire taux de consommation des copeaux et les niveaux initial et final des inventaires (on fait l'hypothèse que les copeaux peuvent être réapprovisionnés de façon instantanée).

[18] Voir article 6.

4.3.2.4 Implication de la propriété d'agrégation

Le fait que le modèle au niveau 1 soit une relaxation du modèle au niveau 2 a les implications suivantes:

- Le profit calculé au niveau 1 peut être utilisé pour accélérer la résolution du modèle de niveau 2 (voir Section 4.3.1.3) ;
- Toute solution faisable obtenue au niveau inférieur est assurément faisable au niveau agrégé ;
- Toute solution irréalisable au niveau agrégé est également irréalisable dans le cas de la planification détaillée ;
- Les deux modèles étant utilisés de façon intégrée, un certain niveau de cohérence entre ceux-ci et de confiance dans les résultats obtenus est assuré.

Enfin, il faut reconnaître que cette propriété d'agrégation n'empêche pas le fait qu'une solution faisable au niveau agrégé peut correspondre à une solution irréalisable au niveau détaillé. Puisque la formulation au niveau 1 est simplifiée, il n'est évidemment pas possible de garantir qu'une solution fournie par le modèle soit, lorsque désagrégée, optimale ou faisable au niveau détaillé [108, 153].

4.3.3 Application du cadre de planification hiérarchique « en ligne »

Cette section présente les résultats de l'application de l'approche de planification développée, dans le contexte de l'étude de cas. Ceux-ci démontrent les avantages pratiques de l'utilisation d'outils avancés d'aide à la décision pour supporter les processus de planification de la SC en P&P. Plus particulièrement, quatre principaux aspects sont abordés :

1) La caractérisation pratique des modèles en termes d'efficacité de résolution et des propriétés d'agrégation ;

2) Les bénéfices de la planification basée sur l'optimisation, dans le contexte des P&P ;
3) L'importance de l'intégration des niveaux de planification tactique et opérationnelle ;
4) La pertinence d'une approche « en ligne » tenant compte de la disponibilité graduelle des informations.

Tous les résultats obtenus ont été générés en implantant les modèles de planification décrits dans le logiciel GAMS [117]. Le cas de base, qui a servi de point de départ pour chacune des analyses effectuées dans cette section, a été défini à partir de données (définissant les paramètres de chacun des modèles) et d'une caractérisation de la SC faite en collaboration avec le partenaire industriel. Aussi, un total de 8 autres scénarios, qui sont des modifications du cas de base, ont été élaborés afin d'examiner davantage certaines perspectives de SCM (ces cas sont décrits au fur et à mesure de la discussion).

4.3.3.1 Analyse des modèles du niveau 1 et 2

Afin d'analyser la performance des modèles, ceux-ci ont été exécutés de façon indépendante et en considérant des situations semblables i.e. mêmes conditions endogènes et exogènes et même horizon de temps de 3 mois. Le Tableau 4.2 résume les informations essentielles à la comparaison des modèles. Comme on peut le voir, le modèle de planification agrégé est moins complexe. Il est donc résolu beaucoup plus rapidement que le modèle détaillé correspondant.

Tableau 4.2 : Efficacité de résolution des modèles de niveaux 1 & 2[19]

Problems	Binary Variables	Continuous Variables	Equations	Nodes	Iterations	Time (CPU s)	Relative Opt. Gap (%)	Profit ($)
Level 1 Aggregated Capacity Planning	1 644	3 005	4 400	2 180	25 375	15.4	0.0036	6 290 752
Level 2 Campaign Planning & Order Scheduling	4 320	20 251	16 345	3 562	358 252	1 000	1.008	6 183 861

De plus, il a été possible de confirmer que la formulation développée au niveau 1 est bel et bien une relaxation du modèle au niveau 2. Puisque les profits obtenus pour le modèle détaillé et le modèle détaillée auquel on a ajouté les contraintes du modèle agrégé sont similaires (voir Figure 4.5 (a)), la condition de faisabilité est respectée (les contraintes du niveau 2 sont moins restrictives car elles n'affectent pas le profit calculé). Aussi, la Figure 4.5 (b), qui présente quant à elle les profits calculés pour les modèles agrégé (*Model L1*) et détaillé (*Model* $L2^{+}$), montre que la formulation agrégée fournit effectivement une borne supérieure au profit calculé par la planification détaillée.

[19] Voir article 5.

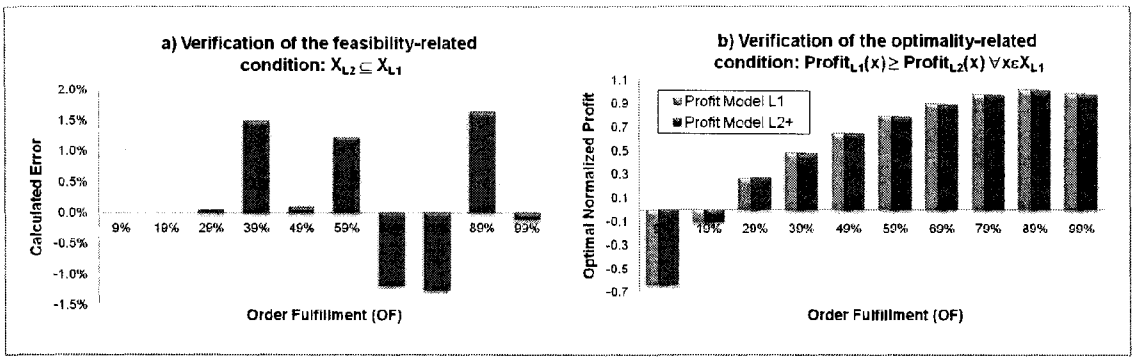


Figure 4.5 : Validation pratique des propriétés d'agrégation des modèles développés[20]

(écart relatif d'optimalité ≤ 2.5%)

4.3.3.2 Bénéfices de l'utilisation d'un outil avancé (optimisation) pour la planification de la SC en P&P

La planification de la SC peut aider à évaluer les compromis et à gérer la complexité de la SC en P&P. Dans cette section, ceci est illustré pour deux perspectives importantes aux usines de pâte commerciales.

<u>Cycles de production et de demande</u>

L'objectif visé est de montrer l'avantage, par rapport à l'approche de gestion centrée sur la production, de mettre l'emphase sur la rentabilité des opérations de la SC. Pour ce, trois cas ont été définis :

Cas # 1. Marché de pâte favorable (demande et prix forts) ;

Cas # 2. Marché de pâte défavorable (demande est prix faibles) ;

Cas # 3. Marché de pâte défavorable et difficulté temporaire d'approvisionnement en érable.

---

[20] Voir article 5.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.6 où chaque courbe représente l'évolution de la rentabilité de la SC en fonction du niveau fixé de satisfaction de la demande (« order fulfillment » - OF)[21]. Le profit optimal pouvant être réalisé dans chaque situation est identifié par un "X". Pour le scénario de demande optimiste, puisque l'utilisation maximale de la capacité de production à l'usine correspond à la rentabilité maximale de la SC (voir A, Figure 4.6), l'approche traditionnelle de gestion centrée sur la production est valide. Toutefois, lorsque la demande de pâte s'affaiblie, la rentabilité maximale de la SC n'est pas obtenue lorsque les équipements de production sont utilisés à pleine capacité. En fait, comme on peut le voir pour le deuxième et troisième cas, la rentabilité de la SC diminue si l'usine de pâte est forcée à produire pour des valeurs de OF supérieures à 80% (voir B, Figure 4.6). Cette situation, qui contraste avec l'intuition typique des planificateurs, exige clairement un changement en ce qui concerne la stratégie traditionnelle de gestion de la capacité en P&P. Compte tenu de la variabilité du marché de la pâte, il est essentiel, pour la compétitivité de tels producteurs, de posséder les outils nécessaires afin d'évaluer, à tout moment, la rentabilité des opérations de la SC.

---

[21] Le OF est définit comme étant le quotient du total de la pâte livrée aux clients et de la demande totale considérée. Autrement dit, si OF = 60%, alors 40% des opportunités de demande ne sont pas satisfaites.

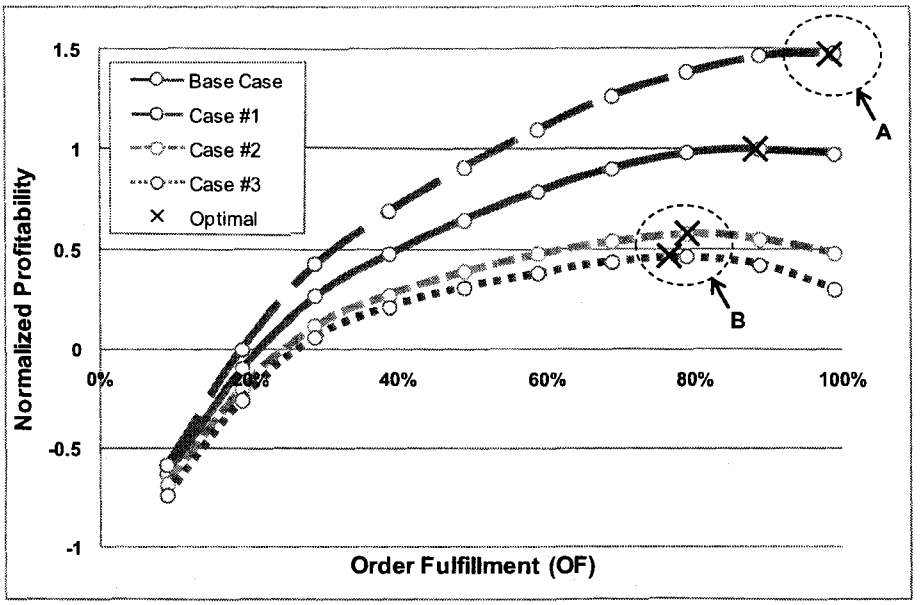


Figure 4.6 : Effet de l'environnement d'affaires sur la rentabilité de la SC[22] (niveau 2)

Cycles d'approvisionnement et de production

L'objectif visé est de montrer les avantages d'une approche holistique par rapport à la planification indépendante de la production à l'usine i.e. sans prendre en compte les décisions reliées à l'approvisionnement en fibres. Pour ce, deux approches ont été comparée : la première fixe les campagnes de production selon l'heuristique industrielle typiquement utilisée à l'usine[23] et la seconde, optimise la SC et aligne les stratégies de gestion de l'approvisionnement et de la production. Aussi, trois cas (modification du cas de base) ont été définis:

[22] Voir article 5.

[23] Celle-ci consiste à produire alternativement cinq semaines de grades d'érable et une semaine et demi de grades de bouleau (voir Figure 4.8).

Cas # 4. Difficulté temporaire (au début de l'horizon de temps) d'approvisionnement en érable ;

Cas # 5. Le cas précédent combiné à une réduction du niveau d'inventaire maximum permis (réduction du fond de roulement) ;

Cas # 6. Les deux cas précédents combinés à une réduction des inventaires initiaux (pour mettre l'accent sur les compromis à court-terme).

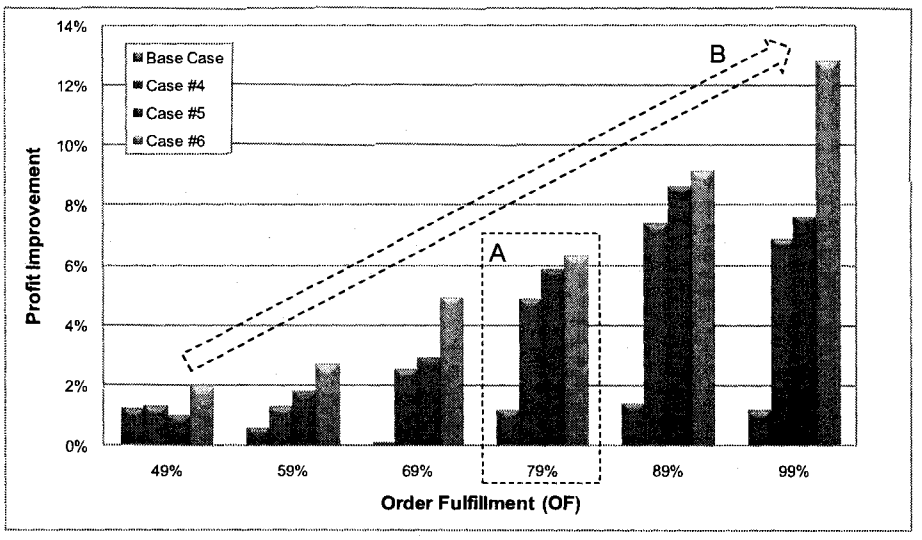


Figure 4.7 : Amélioration du profit réalisée en utilisant une approche de planification basée sur l'optimisation[24]

(comparée à l'application de l'heuristique industrielle, niveau 2)

Tel que présenté à la Figure 4.7, la différence entre l'utilisation de l'heuristique et de l'optimisation n'est pas significative pour le cas de base. Cela donne à penser que l'approche de planification couramment utilisées à l'usine est valable lorsque les conditions de la SC sont normales et stables (i.e. équilibre entre l'offre et la demande

[24] Voir article 5.

de fibre)[25]. En outre, on peut voir, en inspectant les résultats pour les Cas # 4, # 5 et # 6 (la seule exception étant pour OF = 49%), que plus les scénarios de SC considérés sont contraignants, plus il est bénéfique d'utiliser une approche de planification basée sur l'optimisation (voir A, Figure 4.7). Pour les mêmes raisons, le potentiel d'amélioration du profit augmente avec le niveau de satisfaction de la demande (voir B, Figure 4.7).

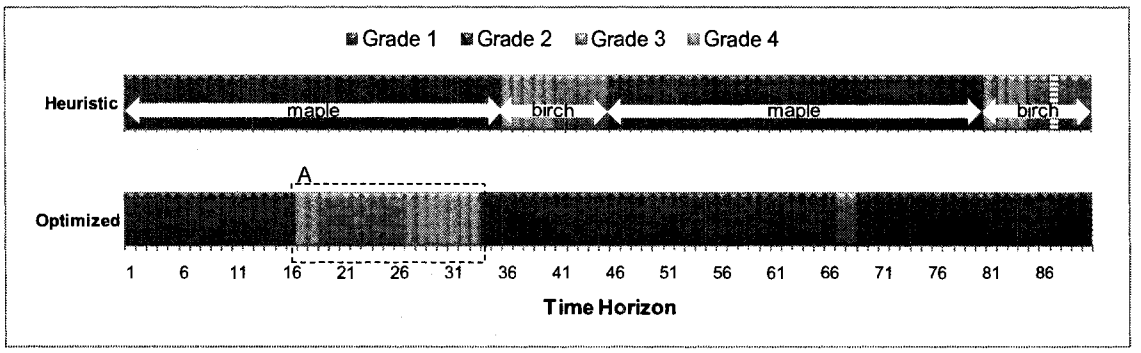


Figure 4.8 : Comparaison des plans de production selon l'heuristique et optimisé[26] (niveau 2, pour le Cas #6 et OF = 99%).

Lorsque les compromis au sein de la SC sont plus difficiles à évaluer, les heuristiques peuvent ne pas fournir de bons résultats. Quant à elle, la planification basée sur l'optimisation, qui considère la SC dans son ensemble, permet d'aborder systématiquement ces compromis et d'adapter la planification de la SC en fonction de l'environnement d'affaires. Par exemple, la Figure 4.8 montre comment le plan de production optimisé s'adapte à la situation particulière de d'approvisionnement. Contrairement aux indications fournies par l'heuristique, les grades de bouleaux (grades 3 et 4) sont produits plus tôt que prévu afin de tenir compte des difficultés

---

[25] Il est nécessaire de mentionner que, pour l'approche intégrant l'heuristique industrielle, les variables continues sont toutes optimisées. Cela peut, dans une certaine mesure, aussi expliquer pourquoi les profits des deux approches sont relativement similaires. Par conséquent, les avantages de l'approche basée sur l'optimisation sont potentiellement sous-estimés par rapport aux bénéfices réels.

[26] Voir article 5.

d'approvisionnement en érable en début de période et donc, de diminuer la pression sur l'approvisionnement en fibre (voir A, Figure 4.8).

4.3.3.3 Bénéfices de l'intégration des planifications tactique et opérationnelle

L'objectif visé est de montrer qu'en plus de fournir un appui sur mesure pour les décideurs à chaque niveau, l'approche hiérarchique de planification assure, via l'intégration des niveaux d'inventaires cibles, que les décisions à court terme puissent prendre en compte les tendances à plus long terme. Pour ce, deux cas ont été considérés[27] :

Cas # 7. Forte demande de pâte pour les grades de bouleau (mois 4 et 5) et d'érable (mois 6 et 7) ;

Cas # 8. Le cas précédent combiné à une pénurie de fibres pour les mois 5 à 7 (e.g. période printanière).

Le Tableau 4.3 montre les résultats obtenus lorsque les niveaux décisionnels de planification sont intégrés (i.e. le niveau 1 est exécuté et les cibles d'inventaire sont prises en compte lors de l'exécution du niveau 2) et non intégrés (i.e. le niveau 2 est exécuté indépendamment du niveau 1 qui doit lui-même s'adapter aux décisions prises à court terme). Pour les deux scenarios considérés, le profit optimal à long terme (niveau 1) est plus grand pour l'approche intégrée que pour l'approche non intégrée. Cela est dû au fait que, grâce à l'intégration des informations sur les inventaires, la planification à court terme est adaptée de sorte à fournir plus de flexibilité pour les opportunités à long terme. En fait, bien que le profit soit réduit à court terme (e.g.

---

[27] Ces cas ne diffèrent que par les situations définies au niveau 1. Les situations définies au niveau 2, pour les Cas #7 & #8, correspondent au cas de base.

production de pâte en prévision de la demande), on peut voir que cette stratégie permet de maximiser la rentabilité à long terme (niveau 1).

Tableau 4.3 : Comparaison des profits optimaux obtenus pour les approches intégrée et non intégrée[28]

Variations of test case		*Profit Level 1 (High Level) ($)*	*Profit Level 2 (Low Level) ($)*
Case #7	With Integration	30 187 147	3 095 322
	Without Integration	29 834 465	6 183 861
Case #8	With Integration	28 145 629	2 123 449
	Without Integration	27 838 890	6 183 861

La Figure 4.9 montre un exemple (pour le Cas #7) où la planification à court terme est adaptée afin de réaliser les opportunités à long terme identifiées par le modèle de niveau 1. Si on ne tient pas compte de la demande future, le plan de production obtenu à court terme (« without integration ») suggère qu'il existe un excédent de capacité de production disponible (voir A, Figure 4.9). Ce n'est évidemment pas le cas et, compte-tenu des fortes prévisions de demande, les cibles d'inventaires (voir B, Figure 4.9) assurent que l'usine fonctionne à pleine capacité. Aussi, comme on peut le voir pour le cas de la planification intégrée, une plus grande quantité de grade de bouleau (grades 3 et 4) est produite et ce, afin de tenir compte de la forte demande pour ces produits dans les quatrième et cinquième mois (voir C, Figure 4.9).

[28] Voir article 5.

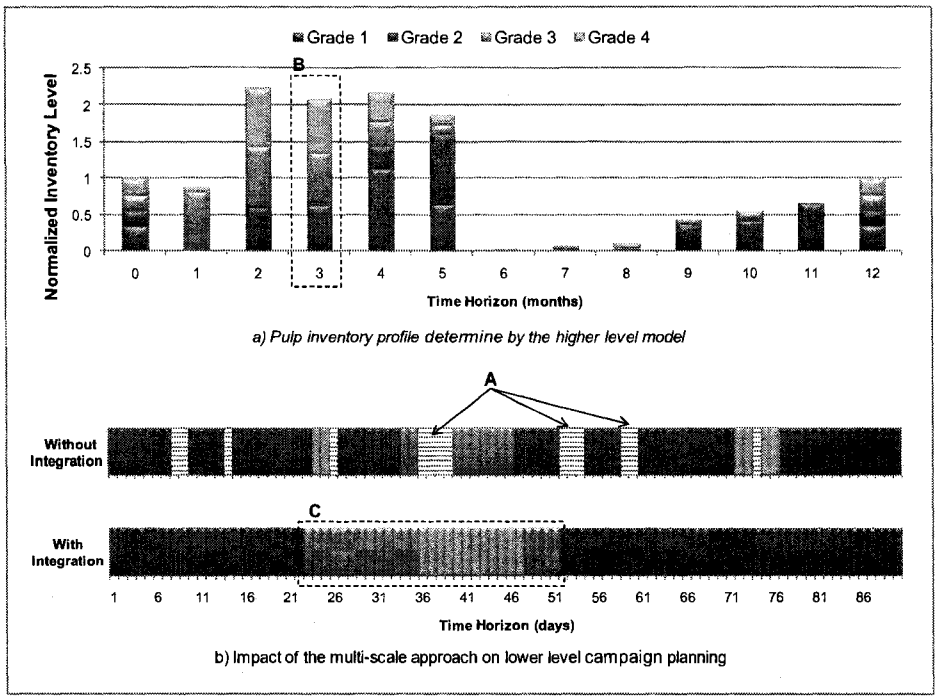


Figure 4.9 : Application de l'approche hiérarchique au Cas #7[29]

Enfin, la Figure 4.10 fournit un dernier exemple, celui-là dans le contexte de l'approvisionnement en fibre (Cas #8), soulignant l'importance de considérer la perspective à long terme. En inspectant les profils d'inventaires de copeaux de bois présentés on peut voir que, contrairement à l'approche non intégrée, l'approche intégrée permet de déterminer les cibles d'inventaires requises pour parer à la pénurie de fibres prévue pour les mois 4 à 7. Dans cette situation, afin de minimiser les coûts d'approvisionnement tout au long de l'année, la meilleure stratégie à court terme consiste à bâtir une certaine quantité d'inventaires de copeaux de bois (voir Figure 4.10).

---

[29] Voir article 5.

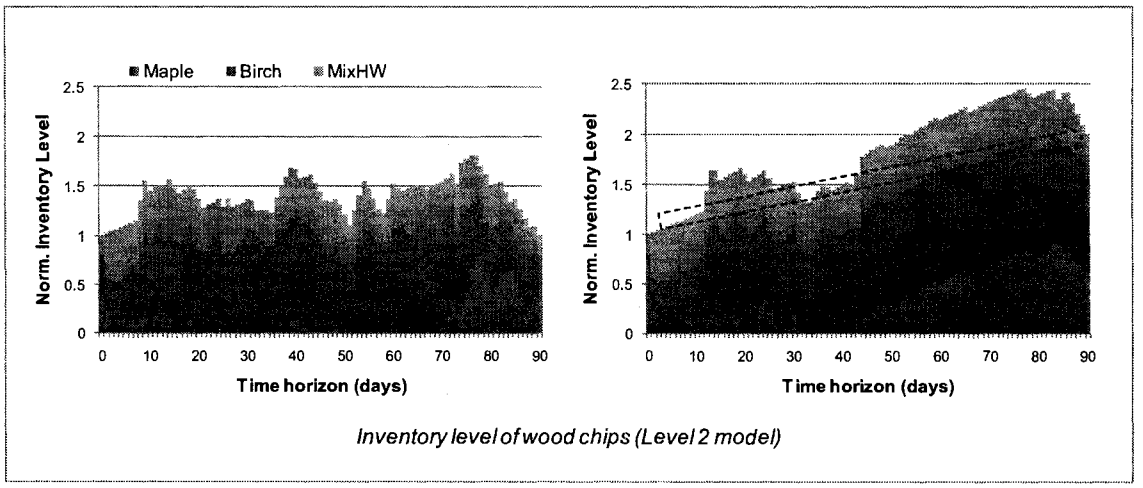


Figure 4.10 : Impact de la situation d'approvisionnement à long terme sur la stratégie de gestion des inventaires à court terme[30]

4.3.3.4 Bénéfice de l'approche de planification « en ligne »

L'objectif visé est d'illustrer comment le cadre hiérarchique peut être utilisé « en ligne » afin de mieux soutenir les processus décisionnels dynamiques et donc, de tenir compte du fait que toutes les informations pertinentes peuvent ne pas être disponibles lorsque les décisions concernant la planification doivent être prises. Pour ce, les résultats présentés ont été obtenus en simulant l'implantation « en ligne » du cadre de planification (voir Figure 4.3 à la Section 4.3.1.3) et ce, pour le Cas #7 définit à la section précédente. À chacune des étapes 2, 3, 4 et 5 (Figure 4.3, niveau 2), différentes commandes des clients ont été considérées afin d'imiter l'incertitude liée au manque d'information sur la demande (e.g. l'ajout de commandes qui n'étaient pas disponibles au début). En fait, la liste des commandes disponibles, qui évolue à chaque semaine, considère de nouvelles commandes, des commandes modifiées ainsi que des commandes fixées (qui ne changeront plus). Enfin, il est important de mentionner

[30] Voir article 5.

qu'après chaque exécution du modèle, les variables de décisions de la semaine courante ont été fixées pour les étapes suivantes (puisqu'en réalité la production déjà réalisée ne peut plus être changée).

On observe à la Figure 4.11 que, au fur et à mesure que de nouvelles informations sont disponibles, le plan de production est de mieux en mieux défini. Dès la première semaine, dû au manque d'information, il est difficile de déterminer avec confiance les campagnes de production pour tout l'horizon de temps (voir A). De la deuxième à la quatrième semaine, compte tenu de la meilleure connaissance des besoins des clients, le plan de production devient plus précis. Aussi, une des particularités de l'approche « en ligne » est que, compte tenu de l'horizon de temps glissant, seule la première semaine d'un plan de production déterminé est réellement mise en œuvre à l'usine (ainsi, les décisions correspondantes aux autres semaines ne seront jamais implantées mais plutôt révisées lors de la prochaine étape de planification) (voir B). Comme on peut le voir, cela fournit la flexibilité nécessaire pour réagir aux incertitudes liées au manque d'information précise.

Enfin, en comparant les résultats obtenus pour la dernière semaine (Figure 4.11, semaine 4) aux résultats du Cas # 7 (Figure 4.9 (b – « with integration »)), il devient clair que si une quantité insuffisante de renseignements préliminaires est fournie dès le début de l'horizon temporel, il y a un plus grand risque que les décisions proposées par la planification « en ligne » ne soient pas cohérentes avec les décisions qui serait "théoriquement" obtenues par une approche « hors ligne » fondée sur une connaissance parfaite des commandes des clients. Toutefois, bien qu'elle soit « mathématiquement » sous optimale par rapport à l'approche « hors ligne », l'approche « en ligne » est très intéressante car elle permet de fournir un outil d'aide à la décision pratique et compatible avec la nature des processus décisionnels et aussi, d'améliorer la

planification, au fil du temps, afin de faire face aux incertitudes et nouvelles informations disponibles.

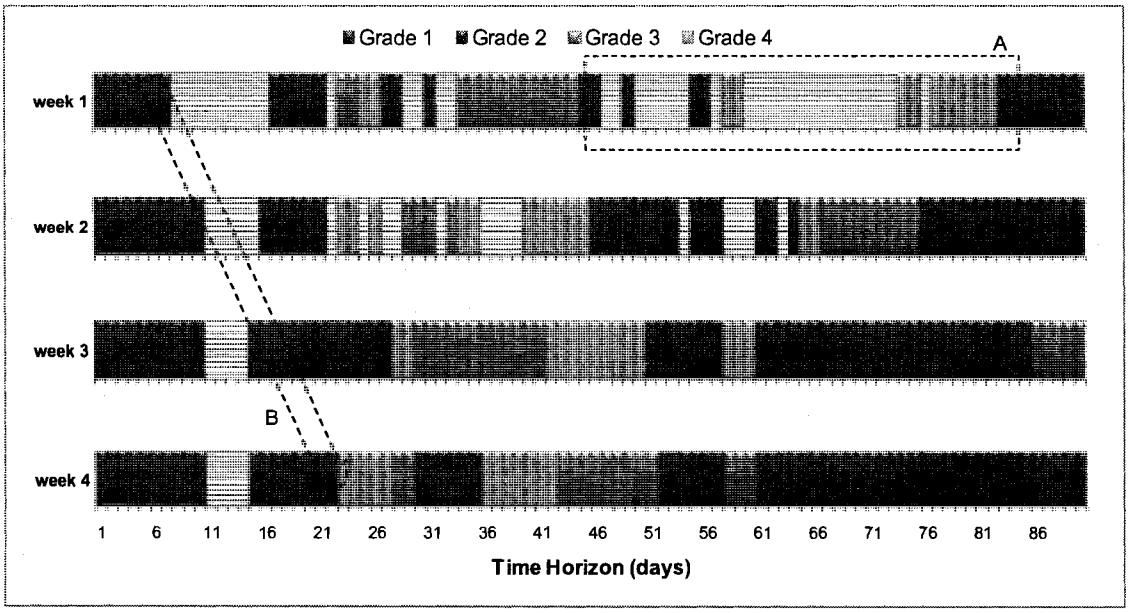


Figure 4.11 : Évolution du plan de production (niveau 2) au fur et à mesure que de nouvelles informations sur les commandes sont disponibles[31]

4.4 Modélisation des coûts axée sur les opérations (Phase B)

Les processus comptables aux usines, qui résument typiquement la performance des coûts du procédé sur une base mensuelle, ne fournissent pas les informations adéquates pour supporter la stratégie de gestion visant à incorporer la flexibilité des opérations manufacturières au sein de la SC (Phase C). Par conséquent, afin de clairement faire le lien entre les conditions d'opération et la structure de génération des coûts aux usines, une approche plus sophistiquée de modélisation des coûts a été élaborée dans le cadre d'une collaboration entre des ingénieurs et des comptables. Bien

[31] Voir article 5.

qu'inspirée des principes du ABC, la modélisation des coûts axée sur les opérations comporte une importante extension, dans le contexte des environnements continus de production, en ce qui a trait à l'analyse de la perspective procédé comme source de génération des coûts aux usines. À l'instar du ABC, développé pour la modélisation des processus générant des coûts indirects, elle met l'emphase sur l'analyse des liens entre l'utilisation des ressources par les activités et des activités par les objets de coûts[32]. Toutefois, en incorporant l'analyse des données de procédés, qui permet d'identifier et d'évaluer les inducteurs (« driver ») de ressources et d'activités dans le procédé, elle améliore la caractérisation des coûts manufacturiers directs en P&P (e.g. pour l'estimation des coûts de production des grades de pâte) et permet aux gestionnaires des opérations de mieux suivre et contrôler ces éléments de coûts.

4.4.1 Approche de modélisation

Les sept étapes suivantes sont requises afin de structurer et d'analyser les données clés de procédé et de développer un modèle de coûts ascendant adapté pour la caractérisation de la structure des coûts directs de production aux usines (Figure 4.12).

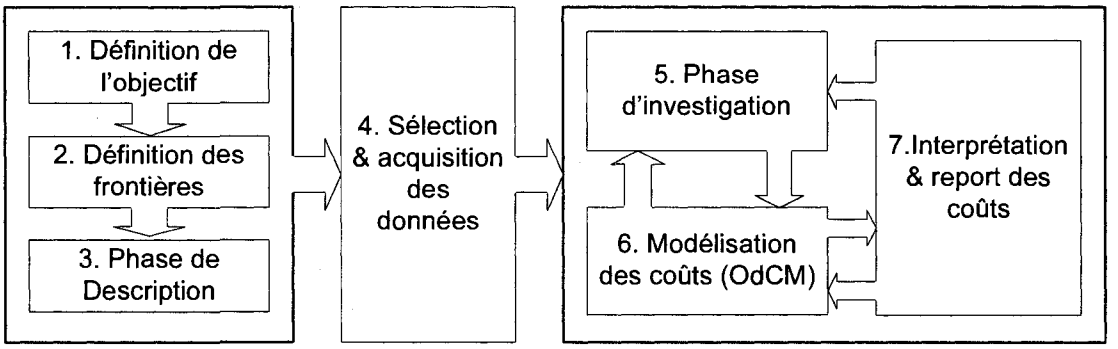


Figure 4.12 : Étapes pour la modélisation des coûts axée sur les opérations

[32] Un objet de coût peut être définit comme une unité fonctionnelle pour laquelle les coûts doivent être mesurés. Cela peut être une activité, un produit, un procédé, un service, etc.

4.4.1.1 Étape 1 : Définition de l'objectif

La définition claire de l'objectif visé et l'alignement entre cet objectif et la stratégie de modélisation est une condition nécessaire pour le développement d'un modèle de coûts utile à la prise de décisions. Il convient de préciser non seulement l'objet pour lequel le comportement des coûts doit être caractérisé (i.e. l'objet de coût) mais aussi, les besoins liés à la prise de décisions [133] i.e. comment et pourquoi le modèle sera utilisé. C'est basé sur ces informations qu'il est possible d'identifier les éléments à inclure dans le modèle et, donc le niveau de détails requis.

4.4.1.2 Étape 2 : Définition des frontières

La portée de l'étude est définie par une analyse holistique des procédés de production et de la structure des coûts de l'usine. Cela consiste à identifier, à partir des informations comptables du grand livre, les ressources devant être considérées *a priori* (selon l'objectif formulé) et aussi, à cartographier les principales opérations manufacturières. Basé sur cette analyse, les frontières à considérer lors de l'élaboration du modèle de coûts peuvent être établies. Elles dictent les principales opérations qui doivent être prises en compte et pour lesquelles les conditions d'opération seront analysées de façon détaillée à l'aide des données de procédé.

4.4.1.3 Étape 3 : Phase de description

L'analyse des données de procédé, combinée aux principes du ABC, aide à mieux comprendre les liens entres les coûts et la perspective procédé (Figure 4.13 (a)). La phase de description vise à identifier ce qui est nécessaire, nonobstant les données disponibles, afin de développer un modèle permettant de retracer efficacement la structure des coûts de production i.e. comment les conditions d'opération sont reliées à la consommation des ressources.

- **Inducteur de ressource:** Pour chacune des catégories de ressources sélectionnée, il est nécessaire d'identifier dans le procédé (à l'intérieur des frontières) quels sont les inducteurs correspondants. Ceux-ci déterminent le taux de consommation des ressources en fonction des activités de procédé.
- **Inducteur d'activités de procédé:** Ces inducteurs de deuxième niveau permettent de faire le lien entre les conditions d'opération d'une unité de procédé et la consommation des ressources. Ceux-ci caractérisent l'intensité d'une activité de procédé au sein d'un centre d'activités de procédé.
- **Inducteur de centre d'activités de procédé:** Chaque centre d'activité de procédé (PWC) regroupe un ensemble d'unités de procédé dont les conditions d'opération, par rapport à l'objet de coût, sont consistantes. Comme il fallait s'y attendre, ils correspondent souvent aux fonctions principales du procédé de production de l'usine (e.g. le prétraitement, le raffinage, etc.). Lors de la définition des frontières des PWC, et donc de la résolution du modèle, il est important de veiller à ce que les PWC contribuent à mieux expliquer la génération des coûts à l'usine. En d'autres termes, c'est en combinant trois niveaux d'inducteurs, i.e. inducteurs de ressources, d'activités de procédé et du PWC, qu'il est possible d'expliquer clairement le comportement des coûts pour les opérations manufacturières de chacun des PWC (voir Figure 4.13 (b)).

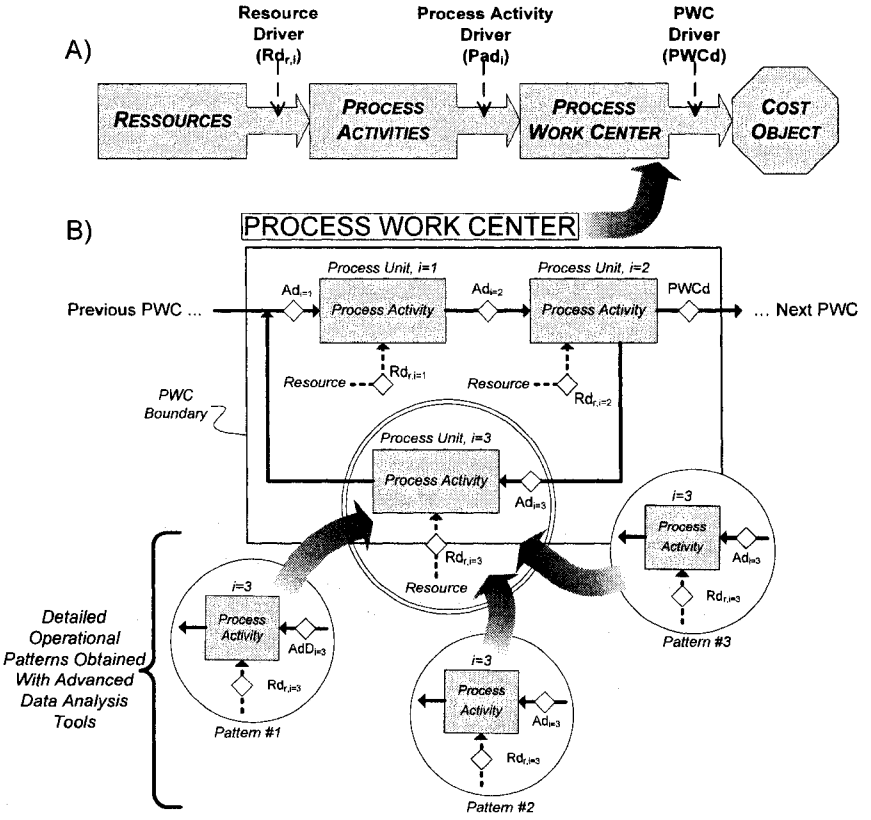


Figure 4.13 : Phase de description[33]

(a: liens entre ressources, activités et procédés, b: différents niveaux d'inducteurs pour les PWC)

4.4.1.4 Étape 4 : Sélection et acquisition des données

Cette étape consiste à déterminer les données de procédé disponibles, pouvant être téléchargées directement à l'usine, afin de fournir des mesures quantitatives pour les inducteurs identifiés. Puisque l'approche vise à intégrer « la connaissance du procédé » , si certaines données ne sont pas disponibles pour caractériser les inducteurs ou si la qualité des données n'est pas suffisante, alors des sources alternatives d'information (e.g. bilans de masse et d'énergie, estimations empiriques, etc.) devraient

[33] Voir article 3.

être utilisées afin de compléter le jeu de données nécessaire à la modélisation des coûts. Tant que ces estimations sont fondées sur une bonne « connaissance du procédé », les résultats fournis par le modèle de coûts seront utiles à la prise de décisions. Enfin, d'autres types d'informations contextuelles devraient être intégrées ; elles servent à décrire les opérations manufacturières (description des PWC) ou encore, lors de l'analyse des données de procédé.

Comparée aux approches typiques du ABC, où les « mesures observables » utilisées pour la caractérisation des activités sont déterminées par des entretiens et des sondages [155], l'approche proposée ici repose sur des données qui sont disponibles dans les PIMS des usines papetières. Ceci est un avantage important car ces systèmes offrent une grande quantité d'informations, relativement fiables, et qui peuvent être obtenues (et mises à jour) avec un minimum d'efforts. Toutefois, l'approche ne vise surtout pas à utiliser toutes les données disponibles mais plutôt, met l'accent sur les informations clés liées à l'amélioration de la prise de décisions.

4.4.1.5 Étape 5 : Phase d'investigation

<u>Préparation et traitement des données</u>

Bien que les entreprises reconnaissent l'importance de l'intégration des systèmes, les données proviennent souvent de diverses sources et possèdent des degrés différents de fiabilité. Une évaluation de la qualité et de l'intégrité des données devrait être effectuée. L'ampleur des efforts investis pour le traitement des données devraient être compatibles avec l'objectif établi et le niveau d'incertitude correspondant à la prise de décisions. Dépendamment des besoins, des techniques avancées de traitement de données de procédé, telles que la filtration [156] et la réconciliation [157] des données, peuvent être utilisées.

Intégration des données

L'ensemble des données (de procédé et contextuelles) est centralisé dans une base de données relationnelle (BDR). Elles sont stockées dans plusieurs tables reliées entre elles par des relations. Puisqu'elles peuvent être exploitées à l'aide de requêtes, ces dernières facilitent grandement l'analyse des données de procédés. Entre autres, il est possible d'utiliser les données contextuelles (e.g. le plan de production, les équipes d'opération, etc.) afin de créer des sous-ensembles de données de procédé à analyser.

Analyse des données

Cette étape fournit les informations clés sur la production, qui seront utilisées dans le modèle de coûts, afin de mieux évaluer les incidences sur ceux-ci des conditions d'opération à l'usine. Dans ce contexte, il ne s'agit pas d'une exploration « aveugle » des données mais plutôt d'une analyse dirigée, basée sur la connaissance du procédé, visant à identifier les régimes d'opération qui seront interprétés sur la base des coûts. Aussi, ce processus est itératif et implique le regroupement des données, l'exécution d'analyse, l'interprétation des résultats et l'extraction des régimes d'opération pertinents. Le plus souvent, une combinaison d'approches et de techniques est nécessaire pour obtenir les informations recherchées. L'analyse peut être appuyée par des outils plus communs, tel que les requêtes et analyses statistiques de base, ou encore, par des techniques de pointe telles la détection des régimes permanents et l'exploration de données (« data-mining », DM). Bien que ces derniers outils soient plus « automatiques », ils permettent, sous la direction d'un utilisateur expérimenté, d'extraire des informations parfois non intuitives et pertinentes à la caractérisation des régimes d'opération à l'usine.

4.4.1.6 Étape 6 : Modèle de coûts axée sur les opérations (OdCM)

Le cadre de modélisation des coûts développé permet de mieux réconcilier les perspectives d'affaires et de production dans les usines de P&P. De façon générale, la procédure implantée vise à exploiter les inducteurs de coûts, caractérisés pour divers régimes durant la phase d'investigation, afin de relier la consommation des ressources, les conditions d'opération dans le procédé et les objets de coûts. Afin d'assurer l'intégration efficace des données de procédé et de coûts ainsi que l'organisation et le traitement logique de l'information, le cadre de modélisation a été élaboré en considérant les exigences suivantes :

- Intégration ascendante[34] de l'information caractérisant les opérations manufacturières ;
- Procédure de calcul des coûts inspiré des principes du ABC ;
- Agrégation des coûts suivant le flux principal de fibre dans le procédé ;
- Structure standard, modulaire et flexible pour la modélisation des procédés ;
- Gestion efficace de l'information.

Le cadre de modélisation des coûts axé sur les opérations, qui est présenté de façon générique à la Figure 4.14, intègre deux éléments structurels importants. Le premier, appelé « process work center » (PWC), permet de modéliser les centres d'activités de procédé (tel que définis plus tôt) et de calculer les coûts directs de production. Dépendamment des besoins (i.e. objectifs et niveau de détails requis) les divers PWC nécessaires à la représentation des opérations à l'usine sont agencés en série et/ou en parallèle. Le second élément, appelé « overhead work center » (OWC), permet quant à lui d'incorporer les aspects liés aux frais généraux et aux coûts indirects

---

[34] Par opposition à l'utilisation de données agrégées sur la production à l'usine.

de production qui doivent être abordés différemment du point de vue des calculs et du traitement de l'information. Aussi, la Figure 4.14 illustre les principaux flux d'information qui sont nécessaires au bon fonctionnement du modèle. Toutes les données de coûts et de procédé utilisées sont stockées dans des tables spécifiques et proviennent des systèmes comptables de l'usine et de la phase d'investigation, respectivement. Lorsque le modèle général est exécuté, le calcul des PWC se fait séquentiellement, selon l'ordre préalablement établi. Les informations obtenues sont transférées d'un PWC à l'autre et, accumulées dans un élément structurel correspondant à l'objet de coût. Cette procédure assure que le flux des coûts dans le modèle, et donc l'agrégation, se fasse suivant la logique des procédés manufacturiers à l'usine.

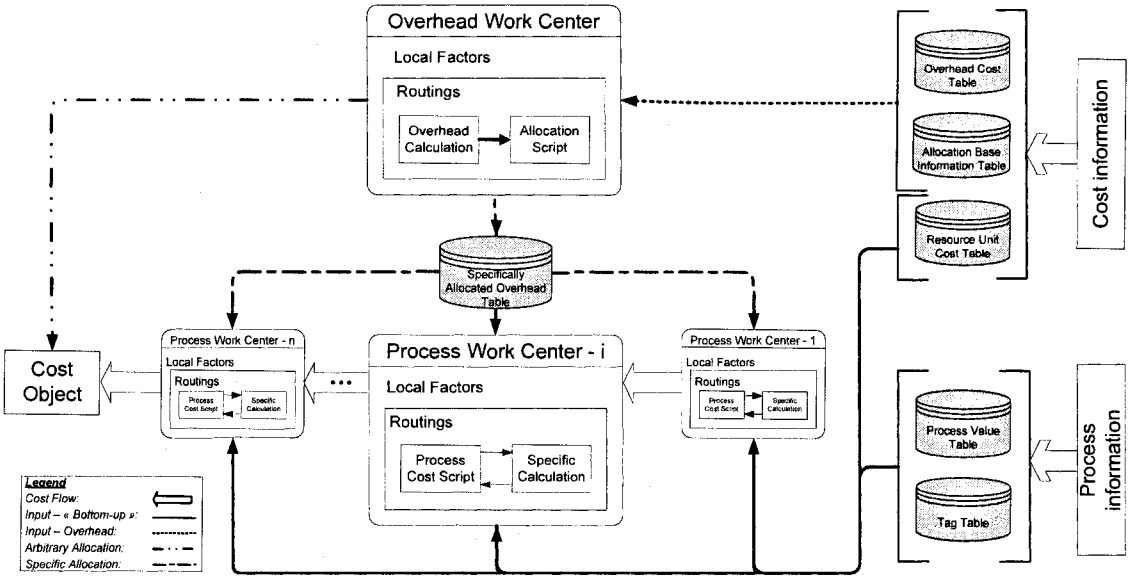


Figure 4.14 : Cadre de modélisation des coûts axée sur les opérations[35]

[35] Voir article 2.

Modélisation des PWC

C'est l'élément structurel PWC qui, au cœur de l'approche de modélisation des coûts développée, est utilisé afin de prendre en compte la perspective procédé. Il intègre les informations pertinentes sur les procédés manufacturiers eux-mêmes responsables de la consommation des ressources, et sur les conditions d'opération qui dictent le taux d'utilisation des ressources. Pour assurer le pragmatisme de l'approche[36], la structure développée encapsule les bonnes pratiques de modélisation des coûts pour les environnements continus de production et offre une architecture modulaire permettant la modélisation de divers systèmes.

L'élément PWC incorpore donc une procédure standard qui définit, étape par étape, les fonctions qui doivent être accomplies tant pour structurer, traiter et intégrer les informations de production et d'affaires que pour faire le calcul des coûts. Ce dernier point est illustré à la Figure 4.15 pour un exemple de PWC défini pour les opérations de raffinage des rejets. Tel qu'indiqué, les informations de procédé associées aux cinq points d'acquisition de données sélectionnés (appelés « tag ») sont stockées dans une table d'information de procédé et donc, disponibles afin de caractériser les inducteurs de coûts. La méthode générique de calcul des coûts, inspirée des concepts du ABC, utilisent plusieurs niveaux de ces inducteurs (i.e. de resources, d'activités de procédé, de PWC et de produits) pour fournir de l'information plus transparente sur la génération des coûts dans le procédé. C'est au cours de l'exécution de ce programme (voir « Process Cost Script » à la Figure 4.15) que les données de coût et de procédé sont réellement intégrées. Plus particulièrement, la séquence d'exécution consiste à six étapes principales :

---

[36] Un des objectifs visés lors du développement du cadre de modélisation était d'élaborer un outil versatile pouvant être applicable, sans grande modification, pour différents types de problème (e.g. pour la conception des procédés, pour la gestion des opérations, etc.), différents procédés manufacturiers (e.g. usine de pâte BCTMP, usine intégrée de papier journal, etc.) et différentes résolutions (i.e. système à haut niveau ou analyse plus détaillées).

A. Les informations contextuelles caractérisant le PWC sont rassemblées ;
B. Les informations de procédé pertinentes pour le PWC définit en A sont chargées ;
C. Le type de ressource associée à chaque tag est identifié ;
D. Le coût unitaire correspondant à chaque ressource sélectionnée est chargé ;
E. Les coûts sont calculés en utilisant une combinaison d'inducteurs (basé sur les principes du ABC) ;
F. Un accès rapide est fournit aux principaux résultats et les informations de coûts sont transférées au PWC suivant.

Enfin, bien que les PWC soient définis de façon générique, le cadre de modélisation élaboré incorpore une structure appelée « calculs spécifiques » qui fournit aux utilisateurs la flexibilité requise afin de répondre à des exigences particulières de calcul (voir Figure 4.15).

Modélisation du OWC

Bien que l'accent est mis sur la modélisation des coûts directs, une structure particulière, le OWC, a aussi été élaborée pour le traitement des coûts indirects et des frais généraux. Ces éléments de coûts sont importants pour les usines et, dans certains cas leur modélisation plus sophistiquée est nécessaire (e.g. pour l'évaluation de projets de conception en rétro-installation [152]). Toutefois, dans le contexte de la problématique de planification de la SC, un niveau minimum de détails est requis puisque l'information pertinente à intégrer consiste uniquement en la charge, en $/h, d'utilisation « du temps » de l'usine. Autrement dit, pour le problème de SCM abordé, les décisions à prendre ne sont pas influencées par la répartition des coûts indirects et des frais généraux à l'usine. L'inclusion du OWC dans le modèle de coûts permet néanmoins d'atteindre des objectifs plus pratiques tel que d'assurer de la consistance de l'outil développé avec les activités courantes de gestion des coûts à l'usine et aussi, de fournir un portrait complet de la structure des coûts facilitant les discussions entre les

comptables et les ingénieurs. Enfin, il est important de souligner qu'aucun calcul relié aux coûts indirects et frais généraux n'est exécuté localement dans les PWC et que ces derniers ne font qu'intégrer l'information provenant du OWC (voir Figure 4.14).

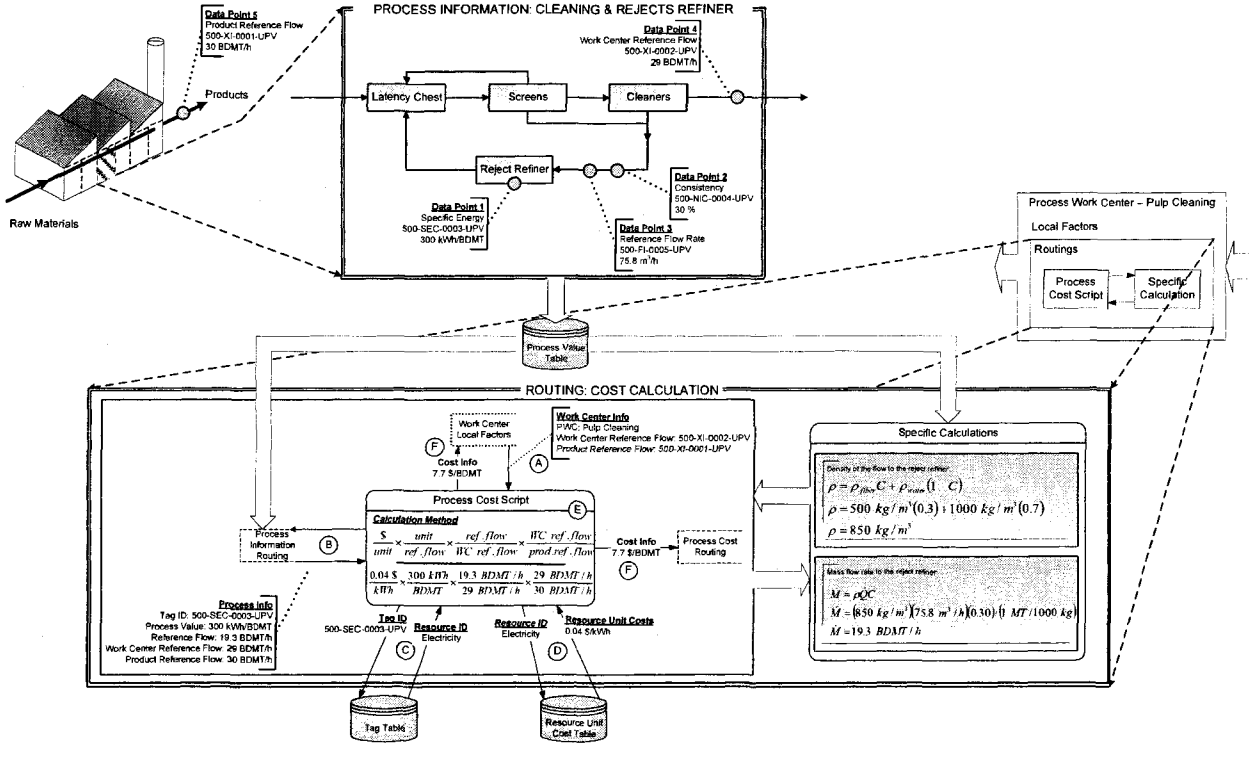


Figure 4.15 : Exemple illustrant les principales fonctions devant être exécutées pour le calcul des coûts d'un PWC[37]

[37] Voir article 2.

4.4.1.7 Étape 7 : Interprétation et report des coûts

Typiquement, basé sur l'interprétation des résultats obtenus, il est nécessaire de faire quelques itérations entre les étapes 5, 6 et 7 afin de réajuster la stratégie d'analyse des données ou, tout simplement, pour effectuer une analyse plus approfondie sur certains aspects des coûts (voir Figure 4.12). Les principaux bénéfices de l'approche analytique proposée ne sont pas réalisés simplement en rendant ces informations de coûts disponibles, mais plutôt en les utilisant de façon systématique pour aider la prise de décisions (e.g. pour la gestion des opérations de la SC (Phase C)). Il est donc essentiel, à ce stade, d'interagir avec le personnel à l'usine qui peut aider à l'interprétation et, à déterminer les implications pratiques des informations obtenues sur la génération des coûts à l'usine.

4.4.2 Application de l'approche axée sur les opérations pour l'étude de cas

Les résultats présentés dans cette section montrent les avantages de la modélisation des coûts basée sur l'analyse des données de procédé historiques. Plus précisément, trois principaux aspects sont abordés :

- La pertinence d'une approche qui, contrairement aux pratiques comptables traditionnelles, est plus consistante avec les besoins de caractérisation de la perspective procédé ;
- L'importance de faire le lien entre les conditions d'opération et la structure des coûts à l'usine ;
- Les bénéfices, pour la modélisation des coûts, d'une analyse plus avancée des conditions d'opération.

La Figure 4.16 illustre comment la méthode présentée dans la section précédente a été appliquée à l'étude de cas pour l'analyse de la structure des coûts de production des grades de pâte. Les données utilisées, qui correspondent aux opérations

d'une usine existante pour un trimestre donné, ont été obtenues grâce à la collaboration du partenaire industriel. Tous les résultats ont été calculés en implantant l'approche OdCM dans le logiciel Impact:ECS™ [158]. Enfin, à des fins de confidentialité, tous les résultats présentés ont été normalisés.

4.4.2.1 Nouvelles perspective de coûts axée sur les opérations

L'objectif visé est de montrer que l'approche OdCM amène une nouvelle perspective par rapport aux pratiques comptables couramment utilisées aux usines de P&P. Pour ce, la Figure 4.17 montre trois approches différentes pour la caractérisation des coûts directs de l'un des principaux grade de pâte à l'usine ; les coûts standards et réellement engagés (pour les trois mois considérés) obtenus à partir du système comptable à l'usine et les résultats calculés en utilisant l'approche OdCM pour chacune des campagnes de production du grade (« run »).

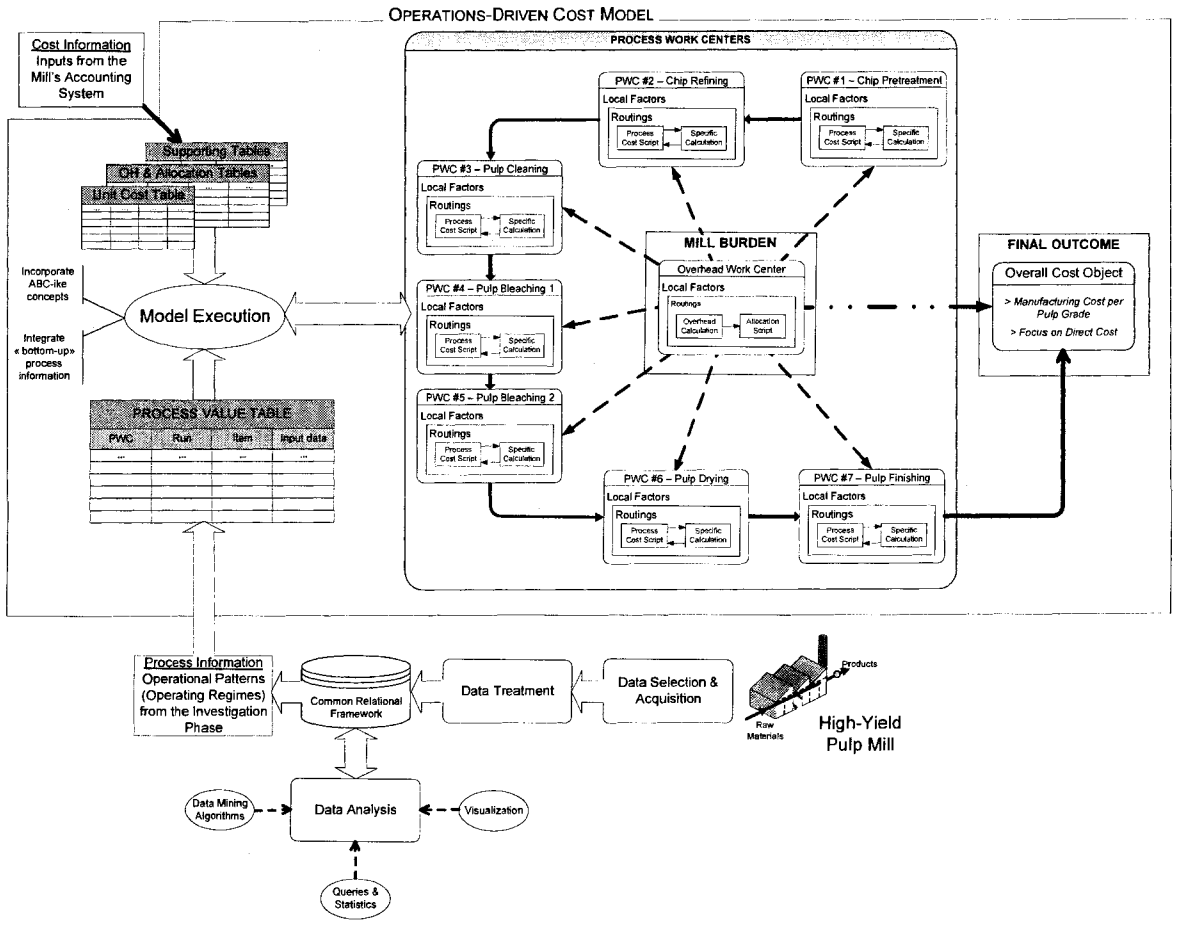


Figure 4.16 : Représentation schématique de l'application de la méthode OdCM pour l'étude de cas[38]

[38] Voir article 3.

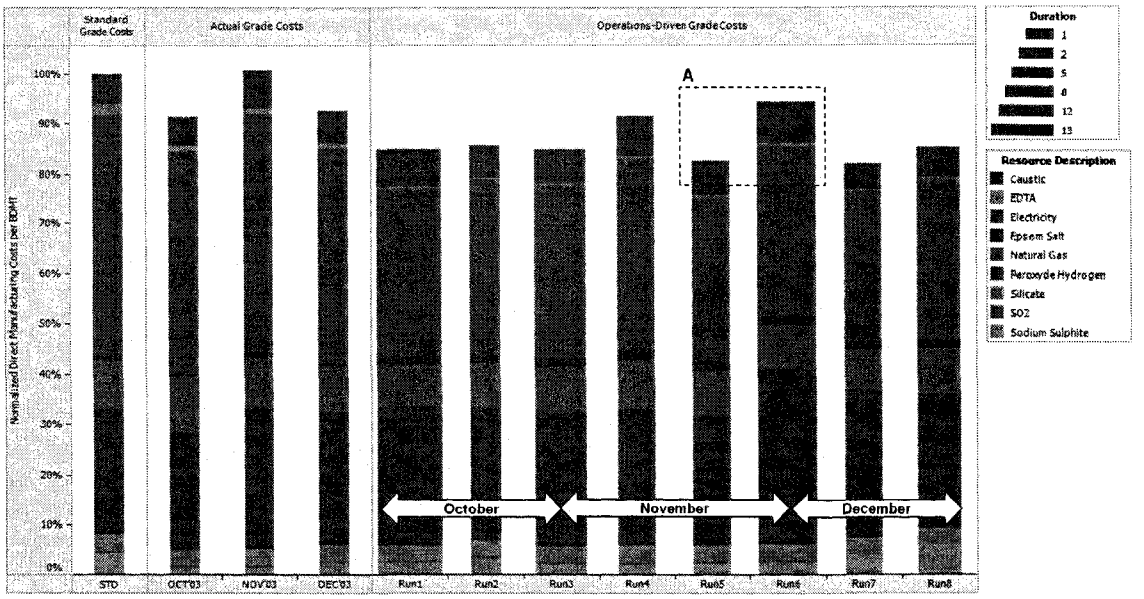


Figure 4.17 : Coûts manufacturiers directs de l'un des principaux grades de pâte[39]

(la durée est exprimée en jours)

Il ne s'agit pas ici de comparer les trois méthodes en tant que telles (car elles ne sont pas utilisées pour les mêmes raisons), mais plutôt de montrer qu'elles fournissent des informations et points de vue différents ayant divers degrés de pertinence pour la prise de décisions opérationnelles.

- **Coûts standard :** Ils sont ajustés selon les recettes et réfèrent à la manière dont les ressources auraient dû être utilisées pour la production de pâtes. Bien entendu, ceci peut ne pas refléter la réalité des opérations. Dans le cas présenté, le standard semble facile à faire (comparé aux coûts réels) et le grade de pâte est perçu comme étant plus cher à fabriquer qu'il ne l'est réellement [65].
- **Coûts réels :** Ils représentent la vraie valeur de l'argent dépensé pour rendre les ressources disponibles à la production. Cependant, étant donné le niveau

[39] Voir article 3.

d'agrégation de l'information et l'imputation des coûts à chacun des grades de pâte, cette approche n'offre pas suffisamment de visibilité pour comprendre les liens entre les conditions d'opération et la génération des coûts à l'usine. Par exemple, bien que les coûts réels de novembre soient les plus grands, une des campagnes de production les plus rentables (« run 5 ») s'est produite au cours de ce même mois).

- **Coûts OdCM :** Contrairement aux coûts réels qui se concentrent sur les ressources fournies à l'usine, l'approche développée met l'accent sur l'utilisation des ressources par le procédé de production. Puisqu'il considère systématiquement les inducteurs de coûts dans le procédé, ce cadre de modélisation permet de mieux comprendre la structure des coûts de production de l'usine. La Figure 4.17 montre clairement des variations de coûts importantes entre les différentes campagnes de production d'un même grade de pâte (voir A, Figure 4.17). Ceci souligne la nécessité d'utiliser ce type d'outil qui met l'accent sur le procédé lorsque l'objectif est d'identifier, d'interpréter et, éventuellement, d'agir sur les sources de coûts dans le procédé et ce, afin d'améliorer la rentabilité des opérations.

Les pratiques comptables traditionnelles sont essentielles à la gestion financière de l'usine. Toutefois, elles offrent des possibilités plus limitées en ce qui a trait à la gestion des opérations et des coûts. Tel que mentionné par Kaplan [139], « un système de coûts n'est pas suffisant » et donc, il est nécessaire d'adopter une nouvelle approche, mieux adaptée à la représentation des procédés manufacturiers (et ce, spécialement dans le contexte de l'approche de gestion de la SC proposée). Enfin, puisque la disponibilité des informations sur les coûts n'est pas fonction du cycle financier mensuel, l'approche OdCM peut aussi fournir une mise à jour plus rapide et utile à la prise de décisions e.g. chaque fois qu'une campagne est terminée.

4.4.2.2 Traçabilité des coûts directs dans les environnements continus de production

L'objectif visé est d'illustrer que l'intégration systématique des données de procédé et de coûts améliore la traçabilité de ces derniers dans l'usine et donc, fournit des informations plus transparentes pour leur interprétation basée sur la compréhension des opérations.

À l'instar des bilans massiques, le modèle agrège les coûts, au fur et à mesure des étapes du procédé, afin de déterminer les coûts totaux de production. La Figure 4.18 montre un exemple, pour la huitième campagne de production (« run 8 » introduit à la Figure 4.17), de cette « visibilité » tout au long du procédé. En P&P, la gestion des coûts est basée sur l'hypothèse que les produits sont homogènes et donc, que chaque tonne d'un grade donné a encouru les mêmes coûts directs de production à la sortie de l'usine [40]. Toutefois, tel qu'indiqué à la Figure 4.18, il peut exister d'importantes variations entre les différentes campagnes de production d'un même grade. Clairement, l'hypothèse d'homogénéité est loin d'être valable en ce qui concerne les coûts directs dans les environnements continus de production. Étant donné l'état actuel des technologies de l'information, les données de procédés disponibles devraient être intégrées à l'analyse des coûts. L'approche OdCM exploite celles-ci et, plutôt que de mettre l'emphase sur la mesure des coûts eux-mêmes (beaucoup plus facile à faire), mesure et caractérise la façon dont les ressources et activités de procédés sont « consommées » par chacun des PWC.

---

[40] Étant donné la complexité des opérations, le peu de données disponibles et le manque d'outils avancés de gestion des coûts, cette hypothèse a été pratique et raisonnable pendant longtemps.

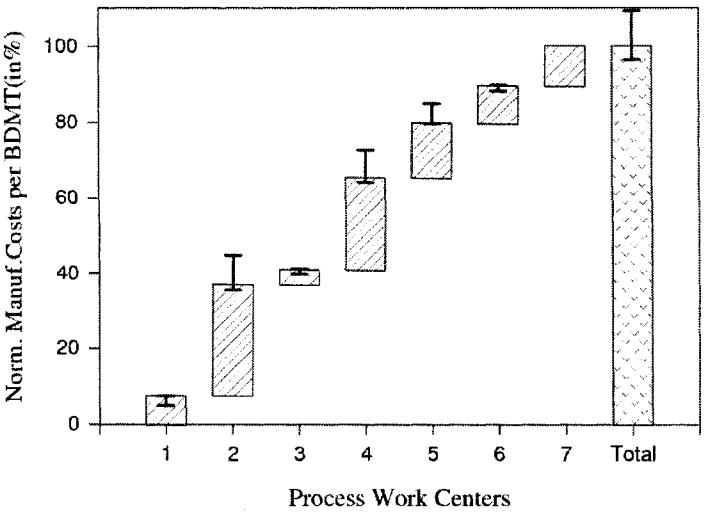


Figure 4.18 : Contribution de chaque PWC aux coûts directs normalisés de production (run 8)[41]

(Les barres indiquent les variations pour l'ensemble des autres campagnes de production. La nomenclature des PWC a été présentée à la Figure 4.16.)

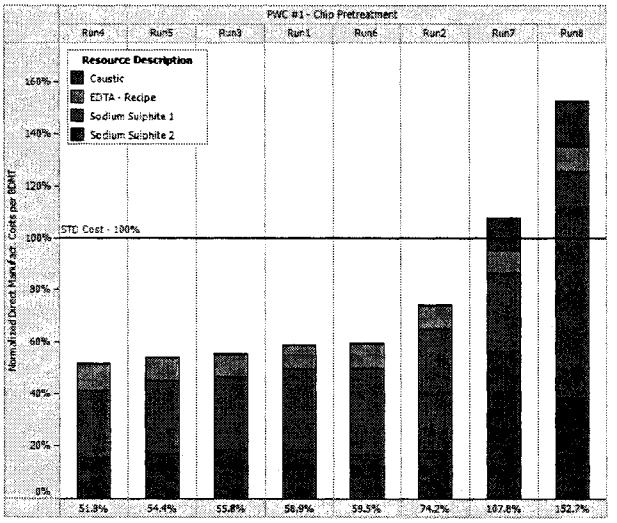


Figure 4.19 : Analyse particulière des coûts d'un PWC basée sur les conditions spécifiques à chaque campagne de production[41]

---

[41] Voir article 3.

Puisqu'il est possible de mesurer et de retracer les inducteurs de coûts avec les données de procédé, la contribution de chaque PWC peut être analysée sur la base des conditions d'opération spécifiques. Ceci est illustré à la Figure 4.19 qui montre les coûts directs du *PWC #1* (prétraitement des copeaux) calculés pour chacune des campagnes de production. Tout d'abord, il est possible d'observer que, la plupart du temps, le standard ne fournit pas une information de coûts consistante avec la réalité des opérations. La variation des coûts observée ici peut être expliquée par l'utilisation, ou pas, d'une unité de procédé (imprégnateur); selon la situation, les chimiques ajoutés ainsi que l'intensité du prétraitement appliqué sont adaptés.

Bien que les ingénieurs de procédé comprennent ces tendances, ils n'ont pas les outils nécessaires afin de quantifier l'impact sur les coûts de telles variations des conditions d'opération. Inversement, les comptables peuvent identifier les écarts de coûts, mais leurs modèles n'incluent pas les détails pour faire le lien avec les opérations. Enfin, un autre avantage important de cette approche multidisciplinaire, qui intègre les données de procédés et de coûts, consiste en une visibilité accrue fournie aux ingénieurs et comptables qui d'ordinaire ont un aperçu limité en ce qui a trait, respectivement, à la gestion des coûts et aux conditions d'opération des procédés à l'usine.

4.4.2.3 Caractérisation des coûts basée sur l'analyse des régimes d'opération

Le but est de montrer comment la structure du modèle de coût développé (inspiré du ABC) peut être pleinement exploitée pour l'interprétation des coûts de production, grâce à une analyse plus sophistiquée des données de procédé. Pour ce, les deux étapes décrites ci-dessous sont nécessaires.

Caractérisation des régimes d'opération

Les bénéfices pour la modélisation des coûts d'une analyse plus avancée des conditions d'opération de l'usine sont démontrés en utilisant des techniques de « data mining » (DM)[42] [159, 160]. Tous les objets considérés pour les analyses ont été caractérisés à partir de données extraites de la structure relationnelle centralisée (Figure 4.16) et ce, pour quatre principaux PWC. C'est en combinant deux techniques de DM (le « clustering » [161] et les arbres de décisions [162]) que quatre régimes d'opérations, et les attributs les plus discriminants correspondants, ont pu être identifiés. La Figure 4.20 montre que ces régimes sont clairement identifiables en fonction de la quantité d'énergie spécifique appliquée aux raffineurs primaire et secondaire. Puisqu'un ensemble multidimensionnel de données a été considéré, on peut également observer, à quelques endroits, un chevauchement des régimes. Par conséquent, l'énergie spécifique seule ne fournit pas suffisamment d'information pour la classification des objets dans un ou l'autre des régimes d'opération.

[42] D'autres approches et outils (e.g. la détection des régimes permanents) peuvent aussi être utilisés. Il est important de noter que, comparer à une approche basée sur la détection des régimes permanents, les résultats présentés ici incluent et sont influencés par les comportements dynamiques des opérations manufacturières.

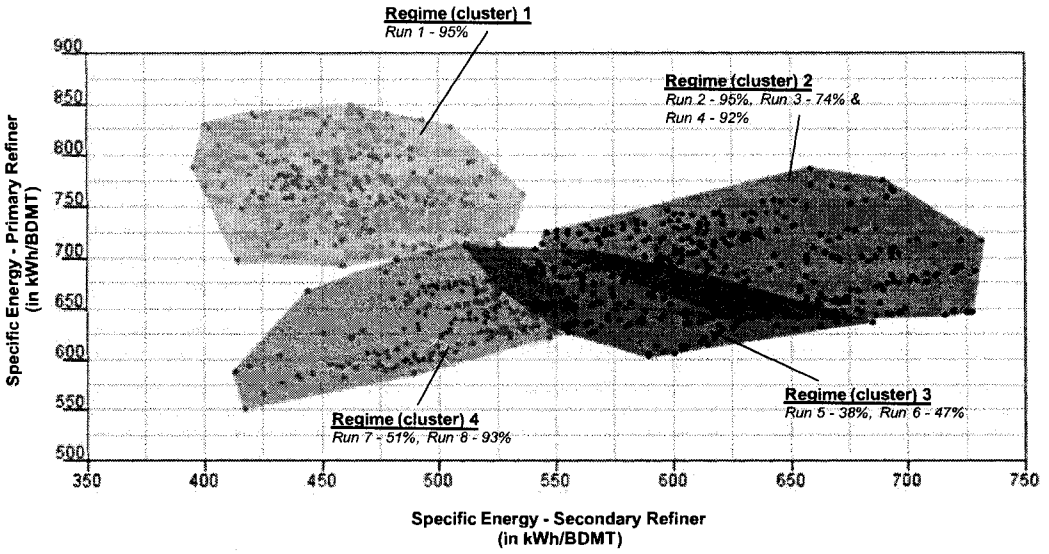


Figure 4.20 : Interprétation des régimes d'opération, sur la base des deux principaux attributs identifiés[43]

(La flèche en pointillés indique l'évolution chronologique des opérations au cours de la période considérée)

Modélisation des coûts basée sur les régimes d'opération

Pour chacun de ces régimes d'opération, les données caractérisant les objets inclus ont été extraites et utilisées dans la structure relationnelle centralisée afin de calculer les inducteurs de coûts. Ces dernières informations, caractérisant les régimes, ont ensuite été transférées dans la table « Process Value Table » du modèle de coûts ascendant (voir Figure 4.16). Les résultats obtenus, pour l'exécution spécifique du *PWC #2* (Raffinage des copeaux), sont présentés à la Figure 4.21 où les barres indiquent les coûts calculés pour chaque campagne et les lignes horizontales, les coûts associés à chaque régime identifié.

Comme on peut le voir, cette approche vise à offrir un autre point de vue que celui basé sur les données contextuelles et donc, à extraire des informations

[43] Voir article 3.

additionnelles améliorant notre connaissance des diverses conditions qui influencent l'utilisation des ressources dans le procédé. Autrement dit, elle permet de dégager les tendances sous-jacentes dans le procédé au travers des diverses campagnes de production et de fournir une perspective des coûts plus consistante avec les opérations réelles à l'usine. À l'image du ABC, l'intégration de ces informations supplémentaires permet de démystifier la génération des coûts à l'usine.

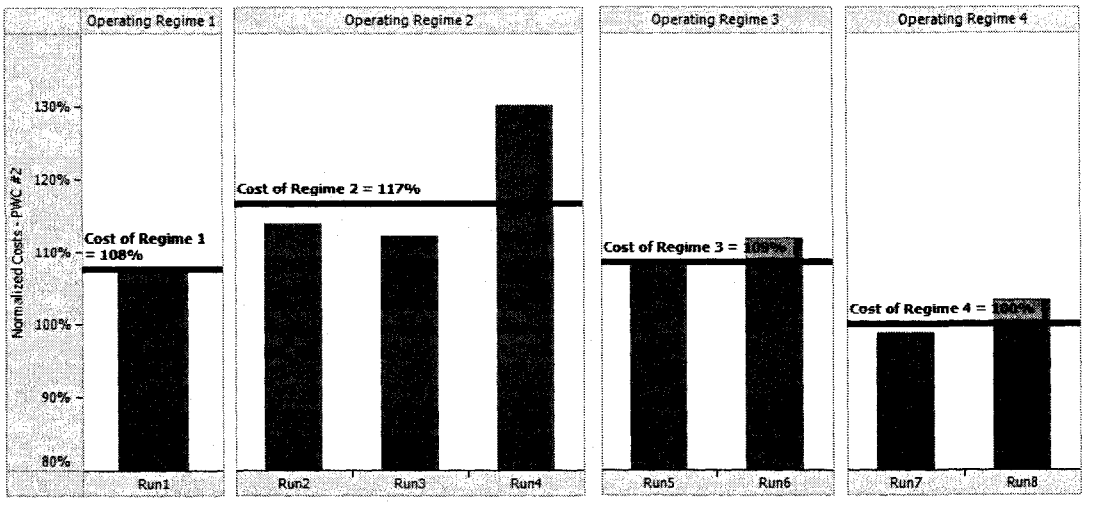


Figure 4.21 : Résultats de la modélisation des coûts basée sur les régimes d'opération identifiés[44]

4.5 Approche de gestion de la SC axée sur les marges (Phase C)

Cette section met l'emphase sur l'intégration de l'usine et au sein de la SC. L'objectif visé consiste à démontrer les avantages pour l'industrie des P&P d'incorporer la capacité de leurs procédés manufacturiers afin de supporter des stratégies de gestion de la SC qui, bien que non conventionnelles, offrent une opportunité intéressante d'amélioration de la rentabilité. Pour ce, deux applications potentielles définies en collaboration avec le partenaire industriel sont abordées: 1)

---

[44] Voir article 3.

l'utilisation d'une stratégie flexible de gestion de la capacité de production pour atteindre un alignement rentable entre la production et la demande de pâte et 2) l'exploitation de la flexibilité des opérations à l'usine afin de soutenir des stratégies d'approvisionnement en fibre plus rentables. Compte tenu de l'importance des compromis entre les perspectives de production et de la SC, l'application de telles stratégies nécessite, dans les deux cas, une meilleure représentation des procédés manufacturiers dans les problèmes de gestion de la SC. Ceci est abordé à l'aide d'une approche de planification de la SC combinant les techniques de modélisation des coûts et de planification de la SC présentées plus tôt (Phase A et B).

4.5.1 Gestion flexible de la capacité de production pour une usine de pâte commerciale

4.5.1.1 Contexte

Déterminer la meilleure façon de gérer la capacité de l'usine afin de répondre à la demande de produits est un processus complexe qui doit tenir compte de facteurs tels que la capacité de production disponible, les inventaires, les commandes des clients et les marges de profits réalisables. En P&P, la planification se fait souvent basée sur l'hypothèse que la rentabilité optimale de la SC est obtenue pour une utilisation maximale des équipements à l'usine. Les décisions prises sur cette base ont donc tendance à mettre l'emphase davantage sur les volumes de production que sur les marges de profits. De nos jours, il est de plus en plus reconnu que, pour améliorer la performance financière des usines, il est nécessaire de mettre l'accent sur la rentabilité de l'ensemble des opérations de la SC. Pour les producteurs de pâte commerciale, lorsque la demande et les prix sont faibles, il est primordial de pouvoir déterminer si la demande satisfaite améliore le profit global réalisé (voir Section 4.3.3.2). Dans une telle situation, il a été montré que les stratégies basées sur l'utilisation maximale de la capacité de l'usine mènent à une diminution de la rentabilité de la SC (voir Figure 4.6).

L'objectif visé par le cas d'étude suivant est donc d'explorer les bénéfices potentiels d'une stratégie de gestion flexible de la capacité, permettant d'aligner la capacité de production à la demande rentable.

4.5.1.2 Modélisation des coûts axée sur les opérations

Puisque les décisions reliées à la gestion de la capacité de production doivent être fondées sur une évaluation minutieuse des coûts et des revenus au sein de la SC, il est essentiel de déterminer comment la structure des coûts manufacturiers évolue selon les taux de production envisagés. Pour ce, l'approche de modélisation des coûts développée peut être utilisée pour calculer les coûts de production en fonction des conditions d'opération adaptées selon l'intensité de production. La Figure 4.22 présente les résultats obtenus pour un grade donné et pour la plage de taux de production correspondante. Du point de vue des conditions d'opération, ces coûts peuvent être expliqués par la combinaison de deux effets principaux:

- **L'effet énergétique :** l'augmentation du taux de production résulte en une diminution significative de la consommation spécifique d'énergie pour le raffinage.
- **L'effet de blanchiment :** l'augmentation du taux de production résulte en une augmentation de l'intensité spécifique du traitement chimique appliqué pour le blanchiment de la pâte.

Puisque l'amplitude de l'impact sur les coûts de ces deux effets est similaire, mais de direction opposée, la structure des coûts résultante reste pratiquement inchangée pour la plage considérée[45] (voir Figure 4.22). Ce résultat, a priori non intuitif pour les ingénieurs à l'usine, est fort utile dans le contexte de stratégies flexibles de gestion de la capacité. Aussi, les deux effets, pris indépendamment, ont également été

---

[45] Des résultats semblables ont été obtenus pour tous les grades de pâte produits à l'usine.

considérés (Cas #1 & #2 à la Figure 4.22) afin de démontrer l'importance de la caractérisation de la structure de coûts de l'usine. Enfin, en intégrant ces informations dans le problème de planification de la SC, il est possible de déterminer, en toute confiance, la stratégie de gestion de la capacité permettant de maximiser la rentabilité de la SC, pour différents contextes de demande.

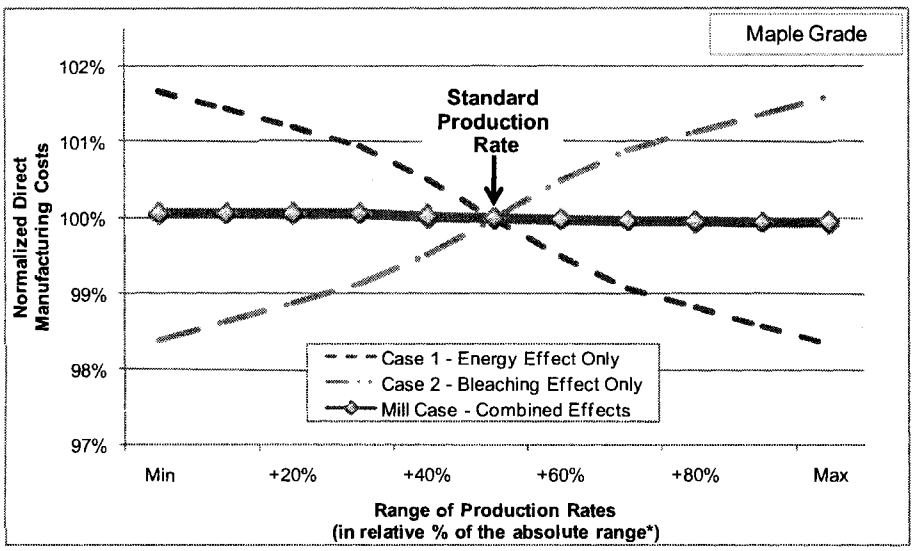


Figure 4.22 : Coûts manufacturiers basés sur l'analyse des conditions d'opérations[46]

(Pour le grade présenté, la plage absolue *Min-Max* correspond à ± 14% du taux standard de production)

4.5.1.3 Planification de la SC axée sur les marges

Le modèle utilisé consiste au problème de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes (niveau 2) présenté à la Section 4.3.1.2. Afin d'incorporer les structures de coûts non linéaires, celui-ci a été modifié légèrement en utilisant la technique d'approximation linéaire par morceaux (voir 0).

---

[46] Voir article 7.

Afin de démontrer les avantages d'aligner les cycles de production et de demande, les quatre approches de planification présentées au Tableau 4.4 ont été comparées, pour trois scénarios de demande : « *Normal Demand* », « *Demand @ -5%* » et « *Demand @ -10%* »).

Tableau 4.4 : Différentes stratégies de gestion de la capacité lorsque le marché de la pâte est défavorable[47]

Case Considered	Description
1- Capacity Management with Shutdown	- Production shutdowns are allowed - 30% of daily costs can be saved - Production rate set to maximum (i.e. max OEE when producing)
2- Capacity Management with Shutdown	- Production shutdowns are allowed - 15% of daily costs can be saved - Production rate set to maximum (i.e. max OEE when producing)
3- Flexible Capacity Management	- Flexible production rate (with the range earlier discussed) - No production shutdowns are allowed
4- Maximum Production	- Production rate set to maximum (i.e. max OEE) - No production shutdowns are allowed

OEE: « overall equipment efficiency » ou taux de rendement synthétique

Les résultats présentés à la Figure 4.23 indiquent clairement que l'approche basée sur la production maximale, où les décisions assurent une grande utilisation des équipements à l'usine, conduit à une baisse significative des profits comparée aux approches alternatives visant l'alignement de la production avec la demande. Cela est dû au fait qu'une partie de la pâte produite est vendue à un prix insuffisant pour couvrir

[47] Voir article 7.

les coûts engagés tout au long de la SC. En outre, pour tous les scénarios de demande envisagés, les plus grands profits sont obtenus pour les approches basées sur des arrêts temporaires de la production. Bien que cette stratégie permette aussi une réduction des coûts journaliers encourus par l'usine (e.g. main d'œuvre, fournitures, entretien, etc.), son principal avantage consiste au fait qu'il est possible de réaliser une adéquation parfaite entre la quantité de pâte produite et la demande rentable. Les résultats obtenus pour 15% et 30% mettent toutefois en évidence l'importance d'évaluer les coûts réels des équipements oisifs.

Puisque les décisions reliées aux arrêts temporaires de production sont typiquement difficiles à prendre (compte tenu de raisons sociales, des incertitudes et du fait que cela est « contre-intuitif » en P&P), l'approche basée sur la gestion flexible de la capacité est une alternative particulièrement intéressante pour les producteurs de pâte et ce, surtout si seulement une partie limitée des frais journaliers peut être sauvée dans le cas d'une fermeture temporaire. Dans ce cas, le taux de production à l'usine est ajusté selon la demande rentable et les bénéfices réalisés peuvent être maintenus sans fermer l'usine. Compte tenu de la plage de taux de production possible, l'approche basée sur la flexibilité des opérations peut ne pas suffire dans des circonstances très difficiles (e.g. demande $\leq$ - 10%) et, à terme, des arrêts de production peuvent également être nécessaires. Enfin, l'implantation de conditions d'opération plus flexibles offre aussi l'avantage pratique d'équilibrer la SC et d'éviter de mettre inutilement de la pression sur les autres cycles (e.g. approvisionnement en fibre, opérations de finition, etc.).

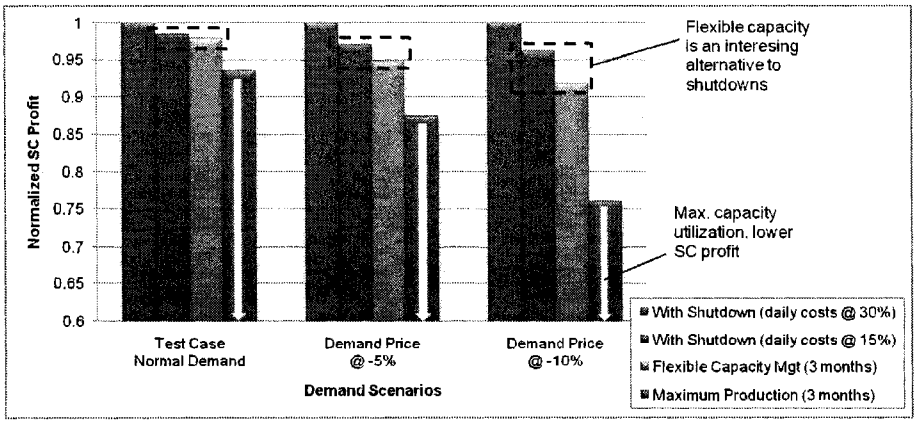


Figure 4.23 : Gestion de la capacité pour des situations d'affaires caractérisées par la faiblesse des prix de la pâte[48]

La Figure 4.24 illustre, pour le scénario *Demand@-5%*, comment l'alignement optimal peut être atteint grâce à la flexibilité des opérations. La courbe de profit présentée a été obtenue en déterminant séquentiellement le profit optimal pour divers taux de production de la plage considérée (et en autorisant aucun arrêt de production). Tel qu'indiqué, le plus grand profit a été obtenu pour le taux de production *Min+20%* ; cela est dû au fait que la quantité de pâte produite est alignée avec la demande rentable (voir A, Figure 4.24). Un taux de production réduit ne permet pas de profiter de toutes les opportunités de demande (demande rentable > pâte produite) et, par conséquent, le profit est nécessairement réduit (voir B). Pour des taux de production supérieurs à *Min+20%* (e.g. voir C), le profit réalisé est également réduit car une portion non rentable de demande est satisfaite (demande rentable < pâte produite).

---

[48] Voir article 7.

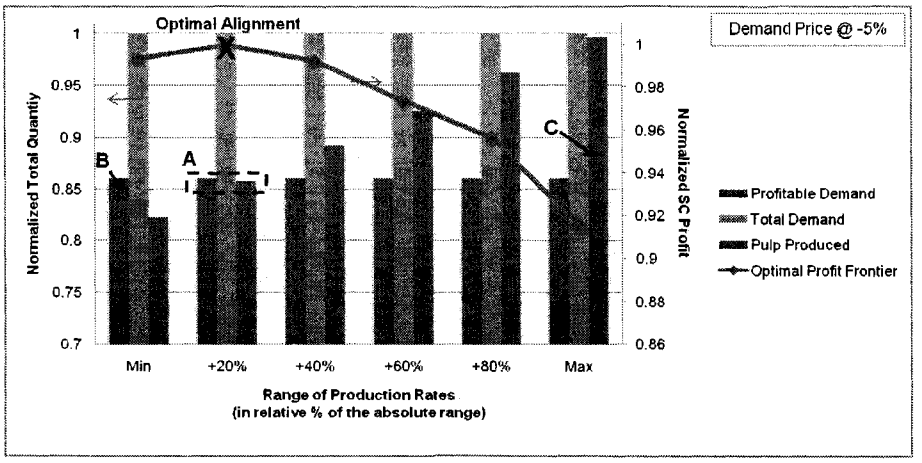


Figure 4.24 : Détermination de l'alignement optimal entre la capacité de production et la demande de pâte[49]

La structure de coûts de l'usine a également un impact significatif sur l'alignement optimal entre les cycles de production et de demande. Pour chaque scénario de demande considéré à la Figure 4.25, les profits optimaux obtenus pour les Cas #1 & #2 et l'usine sont presque similaires (≤ ±1%) ; cela indique que, dépendamment de la structure des coûts, différents alignements sont utilisés pour réaliser le même profit. Par exemple, lorsque la demande est faible, le Cas #1 doit satisfaire une plus grade portion de la demande totale afin d'assurer un taux de production plus élevé et ainsi, bénéficier des coûts de production les plus bas possibles (voir B, Figure 4.25). À l'opposé, lorsque la demande est forte, le Cas #2 doit satisfaire une moins grande portion de la demande totale afin de réduire au minimum l'impact de la hausse des coûts de production (voir C, Figure 4.25). Enfin, pour le scénario de demande normal, puisque le taux de production le plus approprié est approximativement au milieu de la plage indiquée à la Figure 4.22 (i.e. les trois cas

[49] Voir article 7.

considérés ont des coûts de production similaires), l'alignement optimal est semblable (voir A, Figure 4.25).

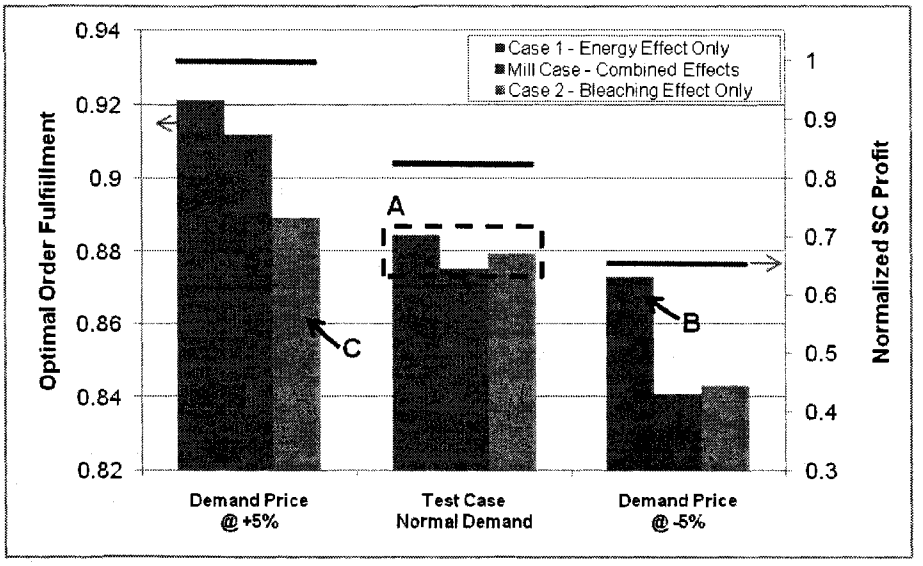


Figure 4.25 : Effet de la structure des coûts manufacturiers sur l'alignement optimal entre la capacité de production et la demande profitable[50]

Finalement, un autre aspect important à considérer lorsque la demande est faible consiste à l'évaluation de l'impact sur la rentabilité de chaque commande supplémentaire. Pour ce, il est aussi essentiel de tenir compte de la structure particulière des coûts de production à l'usine. La Figure 4.26 montre, pour le scénario *Demande@-5%*, les courbes optimales de profits obtenues pour les trois structures de coûts introduites plus tôt. Pour le Cas #1, si des commandes additionnelles sont acceptées, l'impact sur le profit réalisé sera relativement limité. En revanche, pour le Cas #2, le profit décroît beaucoup plus rapidement si des commandes supplémentaires sont admises. Ceci doit être pris en compte en particulier lorsque, par exemple, des commandes moins rentables sont acceptées pour maintenir la fidélité des clients ou

[50] Voir article 7.

encore, lorsque des compromis sont effectués sur les prix de vente afin d'obtenir des commandes supplémentaires pour assurer l'utilisation maximale de la capacité de production à l'usine.

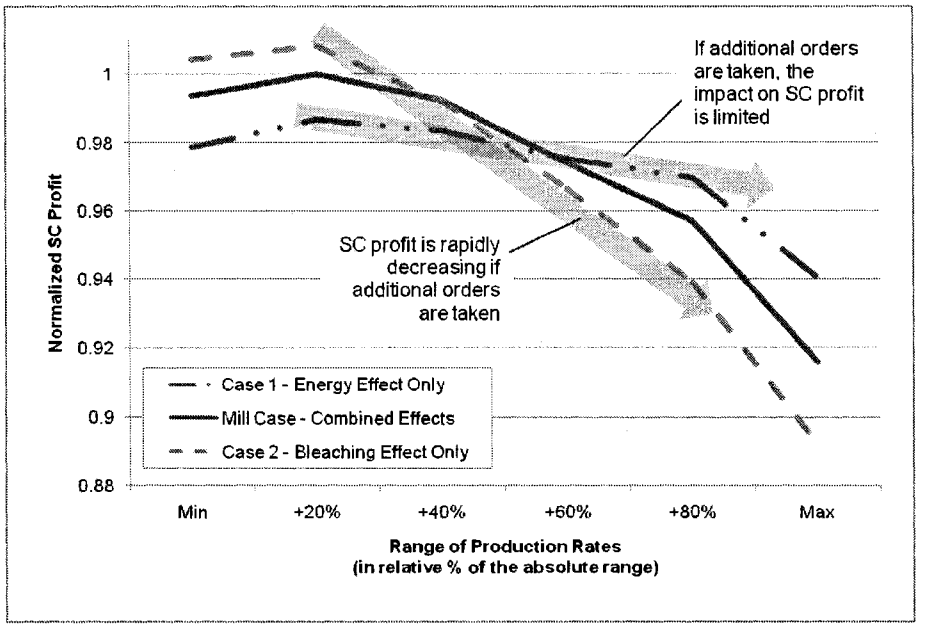


Figure 4.26 : Effet de la structure des coûts de production sur le profit réalisé lorsque des commandes supplémentaires sont acceptées[51]

4.5.2 Exploitation de la flexibilité des opérations pour une usine de pâte commerciale

4.5.2.1 Contexte

L'approvisionnement en fibres est un élément essentiel à la compétitivité des usines de pâte commerciale à haut rendement. Dans l'Est du Canada, en raison d'un certain nombre de problématiques, telles que la fermeture des scieries, les droits de coupe élevés, les coûts élevés de transport et de main d'œuvre et la réglementation

[51] Voir article 7.

forestière, la gestion de l'approvisionnement est particulièrement complexe et dynamique . Actuellement, les activités de planification se font basées sur le plan de production à l'usine qui prévoit les quantités à produire pour chaque grade de pâte. Les besoins spécifiques pour chaque essence de bois sont évalués à partir des ratios de copeaux indiqués par les recettes standard de chaque grade. Étant donné les opérations actuelles d'alimentation en copeaux et les systèmes d'information en place, il est difficile pour l'usine de faire un suivi précis (en ligne) des quantités relatives de chaque essence de bois utilisée pour la production de la pâte. Conséquemment, comparés aux proportions idéales spécifiées par les recettes standards, les ratios « réels » des copeaux alimentés au procédé varient considérablement. L'usine a développé une habileté à adapter ses conditions d'opération afin atténuer l'impact de ces variations et de rencontrer les spécifications requises de qualité de la pâte. L'objectif visé par le cas d'étude suivant est donc de démontrer les avantages à exploiter la flexibilité d'opération développée à l'usine (i.e. faire varier les recettes) afin d'aider à l'approvisionnement efficace en fibre.

4.5.2.2 Modélisation des coûts axée sur les opérations

Compte tenu de l'importance des compromis impliqués entre les cycles d'approvisionnement et de production, il est essentiel de quantifier l'impact des recettes sélectionnées sur la structure des coûts manufacturiers de l'usine. Pour ce, l'approche de modélisation des coûts développée peut être utilisée afin de calculer les coûts directs de production en fonction des conditions d'opération qui sont adaptées selon les ratios d'alimentation en copeaux.

Les scénarios discrets de recette identifiés pour chaque grade de pâte ont été obtenus en faisant varier les ratios de copeaux utilisés sur une plage pratique permettant de rencontrer les spécifications de qualité de la pâte. La Figure 4.27 présente, pour un des grades d'érable, les vingt-huit scénarios de recette qui ont été définis en fonction de

la combinaison de trois essences de bois i.e. l'érable (« maple »), le bouleau (« birch ») et des copeaux mixes (mix HW, majoritairement constitués de tremble). Pour chacun des scénarios, l'impact des ratios de copeaux sur les conditions d'opération a été caractérisé en termes d'énergie de raffinage et du traitement chimique appliqué pour le blanchiment. Tel qu'illustré à la Figure 4.27, en intégrant les perspectives de procédé et de coûts, il est possible de mieux comprendre comment (et dans quelle mesure) les coûts de production évoluent en fonction de la proportion utilisée de copeaux d'érable (voir A), de bouleau (voir B) et de mix HW. Basé sur ces informations de procédé, la structure des coûts de production a été évaluée pour chaque scénario de recette.

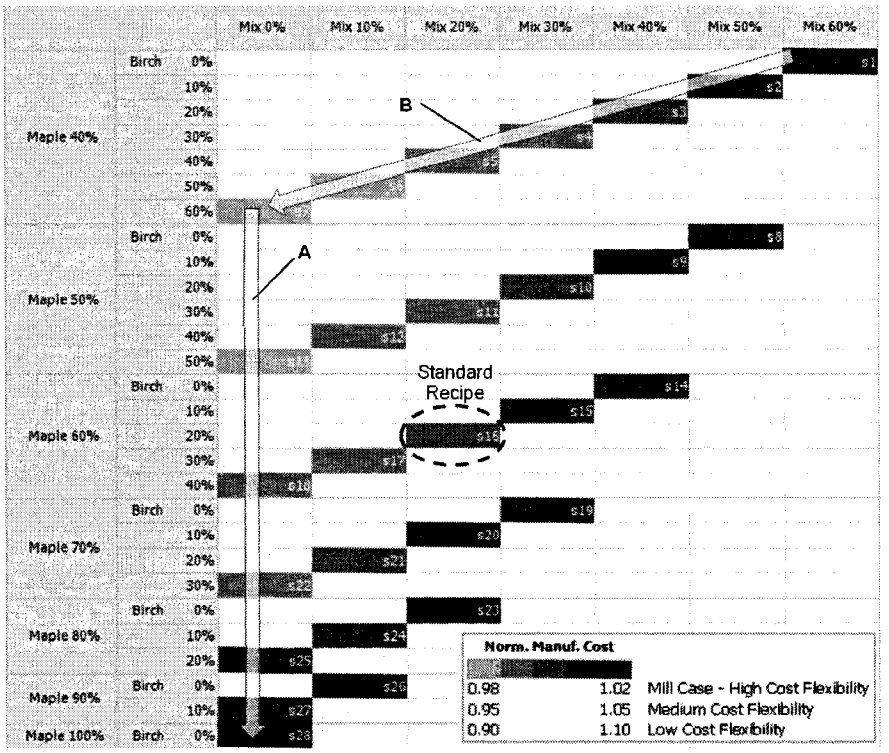


Figure 4.27 : Implication sur les coûts des ratios d'alimentation en copeaux[52]

(Les 28 scénarios de recette sont indiqués.)

[52] Voir article 8.

Comme on peut l'observer à la Figure 4.28, la plage des coûts de production est, pour l'ensemble des scénarios considérés, relativement étroite (i.e. ± 2% par rapport à s16). Par conséquent, on considère que, pour le cas de l'usine, la structure des coûts est flexible i.e. la variation des ratios de copeaux a un impact relativement limité sur les coûts manufacturiers à l'usine. Aussi, afin de mieux comprendre l'effet d'une structure moins flexible dans le contexte de la SC, deux cas additionnels, de flexibilité moyenne (± 5%) et faible (± 10%), ont été considérés (Figure 4.27). En intégrant ces informations au niveau de la SC, la sélection des recettes de production (i.e. des ratios de copeaux utilisés) peut être incorporée, en toute confiance, comme variable décisionnelle supplémentaire dans le problème de planification visant à assurer une meilleure adéquation entre l'offre et les besoins en fibres de l'usine.

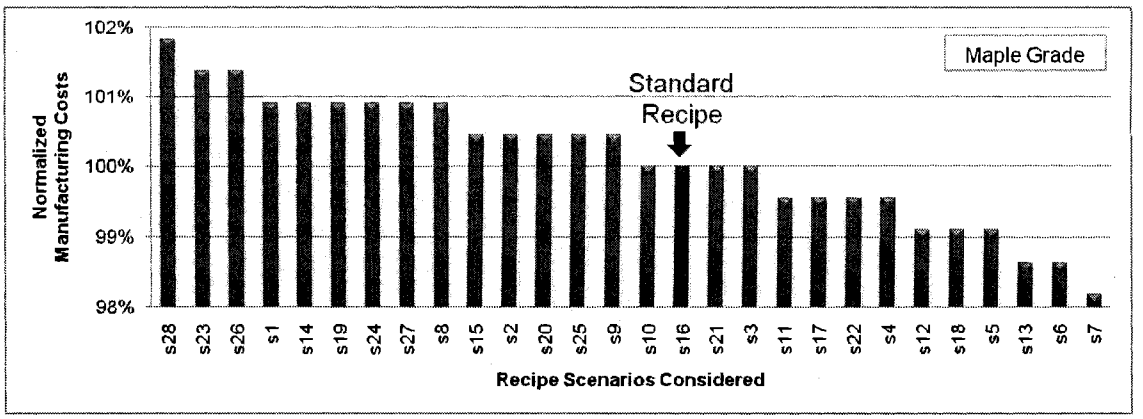


Figure 4.28 : Coûts de production calculés, basés sur les informations de procédé, pour chaque scénario de recette considéré[53]

4.5.2.3 Planification de la SC axée sur les marges

Le modèle utilisé consiste au problème de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes présenté précédemment (voir Section

[53] Voir article 8.

4.3.1.2). Il a été légèrement modifié afin de permettre le choix de la recette la plus appropriée (voir 0). La consommation de fibres (pour chaque essence de bois) et les coûts de production ne sont donc pas fixés pour un grade de pâte donné mais plutôt, calculés à partir des scénarios de recette sélectionnés. Afin de démontrer les avantages de gérer la complexité de la SC, les trois approches de planification présentées au Tableau 4.5 ont été comparées, pour trois situations d'approvisionnement en fibre décrites ci-après (Cas #1, Cas #2 et Cas #3).

Tableau 4.5 : Différentes approches de planification dans le contexte de l'approvisionnement en fibre[54]

Planning Approach	Description
Not Integrated (NI)	- Production campaigns at the mill are fixed according to industrial heuristic - Procurement of fibre must adapt accordingly - Recipes were fixed according to standard for each grade
Integrated (I)	- Procurement and production planning are optimized simultaneously - Recipes were fixed according to standard for each grade
Integrated with ratios (I^+)	- Procurement and production planning are optimized simultaneously - The best recipe can be chosen from the set of scenarios

Dans la première situation considérée (Cas #1), le contexte définit incorpore des opportunités d'approvisionnement en fibre relativement alignées avec les besoins de l'usine. Tel qu'indiqué à la Figure 4.29, il est donc possible, basé sur l'utilisation de l'heuristique industrielle et des recettes standard, d'atteindre un équilibre presque optimal entre les cycles d'approvisionnement et de production. Pour cette raison, on

[54] Voir article 8.

observe qu'il y a peu de possibilités d'amélioration dû à l'utilisation d'outils plus sophistiqués d'aide à la planification.

La deuxième situation (Cas #2), basée sur le contexte général définis au Cas #1, considère le cas d'un environnement d'affaires plus contraignant. Ceci a été défini 1) en réduisant le niveau maximum autorisé des inventaires, 2) en considérant de faibles inventaires initiaux et 3) en introduisant une pénurie temporaire de fibres d'érable au cours du premier mois de la période considérée. La Figure 4.29 montre que plus les opérations de la SC sont contraintes, plus il est avantageux d'utiliser des outils avancés d'aide à la décision permettant d'évaluer systématiquement les compromis entre les cycles d'approvisionnement et de production (tel que discuté à la Section 4.3.3.2). Puisque les résultats obtenus pour les approches *I* et *I+* sont semblables, on peut déduire que les bénéfices réalisés dans cette situation sont principalement dû à l'amélioration de la synchronisation des opérations entre les deux cycles de la SC. Ces résultats indiquent également, puisque le contexte général d'approvisionnement est le même pour les Cas #1 & #2, que l'utilisation des recettes standard fournit un alignement relativement bon entre l'offre et la demande de fibres.

Enfin, la troisième situation (Cas #3) considère le cas d'un changement significatif des opportunités d'approvisionnement en fibre. Cette problématique, particulièrement importante pour l'usine de pâte, est définie de sorte à ce qu'il ne soit pas possible d'obtenir, à un coût raisonnable, plus de la moitié de la capacité de fibres d'érable qui était disponible pour les Cas #1 & #2[55]. L'effet du désalignement entre les recettes standard et la nouvelle situation d'approvisionnement en fibre peut clairement être observé à la Figure 4.29. En fait, même l'approche intégrée (*I*), qui synchronise au mieux les cycles d'approvisionnement et de production, ne suffit pas à s'adapter à la situation nouvellement définie. Pour des contextes d'approvisionnement difficiles et

[55] Ceci est compensé par une plus grande disponibilité de fibres de bouleaux et de mix HW.

variables, seule l'approche de planification *I+*, qui permet la sélection des recettes les plus appropriées, peut assurer un meilleur alignement entre l'offre et la demande de fibres. En plus de coordonner les décisions au travers de la SC, cette approche exploite les avantages de la flexibilité des opérations à l'usine et tire le meilleur parti de tous les contextes d'approvisionnement.

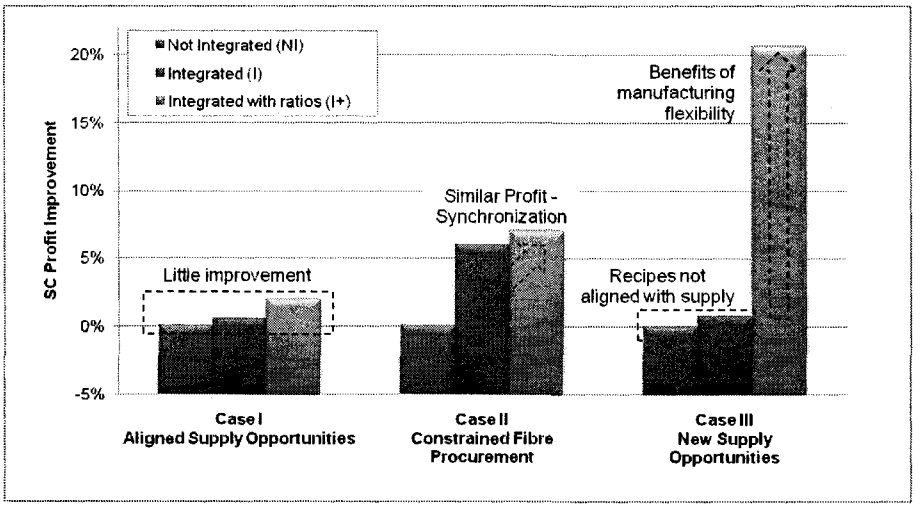


Figure 4.29 : Bénéfices liés à l'exploitation de la flexibilité des opérations[56]

Tel qu'illustré à la Figure 4.30, la capacité d'identifier les compromis entre les coûts de production et d'approvisionnement est un élément essentiel pour l'implantation d'une approche de planification basée sur la flexibilité des opérations. La courbe de profit présentée a été générée (pour le Cas #3) en déterminant le profit optimal qui peut être obtenu en fixant séquentiellement chacune des recettes (pour un ratio d'érable de 40%). La recette 4 (érable 40%, mix HW 30% et bouleau 40%) permet d'obtenir le plus grand profit en évitant les sources de fibre les plus dispendieuses et les coûts de production trop élevés. La sélection de toutes autres recettes se traduira nécessairement par une réduction du profit. D'une part, si la

[56] Voir article 8.

proportion de bouleau est augmentée (recettes 5 à 7), les coûts manufacturiers épargnés seront compensés par une augmentation des coûts en fibre. D'autre part, la réduction des coûts d'approvisionnement possible en augmentant de 10% la proportion de mix HW (recette 3) est plus que compensée par la hausse des coûts de production. Enfin, on peut voir que les coûts d'approvisionnement accroissent de manière significative vers les extrêmes du graphique (mix HW = 60% ou bouleau = 60%) ; pour disposer d'une grande quantité d'une même essence de bois, il est nécessaire d'obtenir des fibres de sources qui sont de plus en plus dispendieuses.

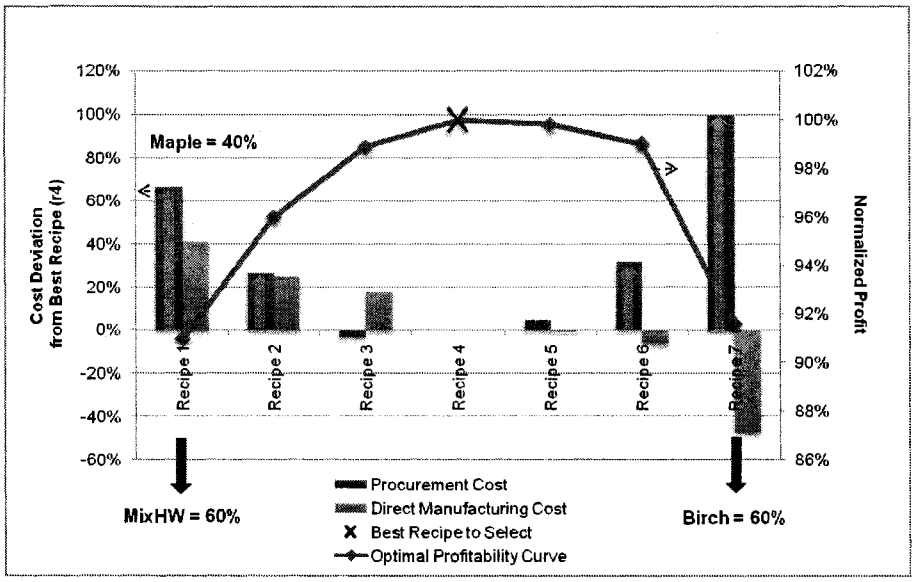


Figure 4.30 : Compromis entre les coûts d'approvisionnement et de production[57]

(Les recettes 1 à 7 correspondent respectivement aux scénarios s1 à s7 à la Figure 4.27)

Pour une plage de recettes (recettes 3, 4, 5 et 6), le bénéfice qui peut être réalisé est relativement constant (Figure 4.30). Du point de vue de l'approvisionnement, cela signifie que, tant que l'offre de fibres varie dans cette plage, l'impact sur la rentabilité

[57] Voir article 8.

de la SC peut être limité. Cette caractéristique peut être exploitée comme « outil» pour la gestion à court terme de problèmes d'approvisionnement. Pour ce, il est néanmoins primordial de bien identifier la structure des coûts de production (Figure 4.31). En fait, pour des structures de coûts moins flexibles (i.e. les coûts sont plus sensibles à une variation des ratios de copeaux), le plateau observé est réduit et le profit diminue plus rapidement lorsque la meilleure recette n'est pas sélectionnée. Comparé au cas de l'usine, il y a donc moins d'opportunité d'utiliser la sélection des recettes pour l'alignement à court-terme de l'offre et de la demande de fibre.

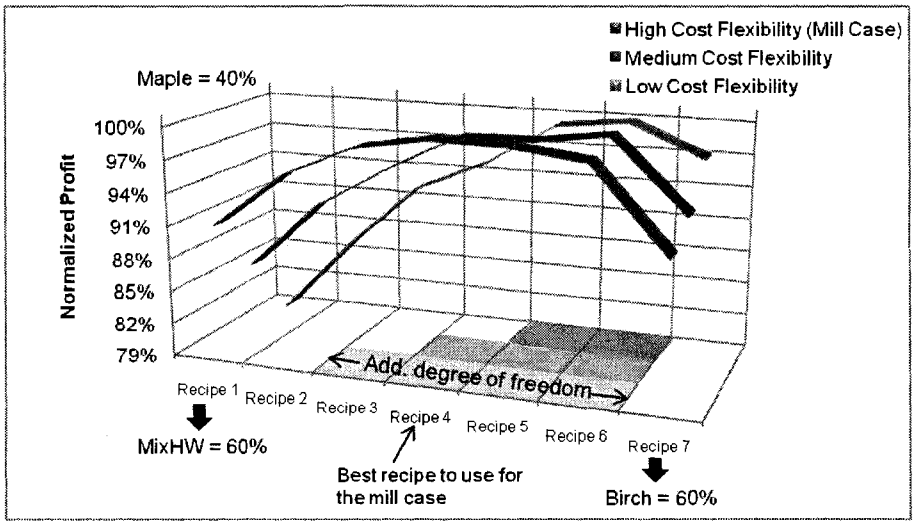


Figure 4.31 : Impact sur la rentabilité de structures de coûts moins flexibles[58]

Finalement, la Figure 4.32 présente un exemple pratique où la sélection des recettes à l'usine peut supporter une stratégie particulière d'approvisionnement à court terme. Le cas considéré consiste à une situation où, en raison de leurs faibles niveaux d'inventaire, les concurrents adoptent une stratégie plus agressive d'approvisionnement et offrent une prime à l'achat de fibre afin d'attirer une plus grande capacité des entrepreneurs régionaux. Cette pression accrue sur l'approvisionnement a été

[58] Voir article 8.

modélisée, à partir du Cas #3, en introduisant des augmentations des coûts de fibres de 10%, 20% ou 30% pour l'équivalent de 25% de la capacité d'approvisionnement en bouleau. Comme on peut l'observer à la Figure 4.32, il est plus difficile de maintenir le niveau de profit lorsque la flexibilité est moindre. Dans ces cas, puisque la modification des recettes affecte de façon plus significative la performance des coûts de production, il n'y a pas d'autre solution que de payer une prime pour obtenir les quantités requise de bouleau. Par contre, pour le cas de l'usine (« mill case »), la structure de coûts fournit la latitude nécessaire afin d'adopter une stratégie d'approvisionnement plus disciplinée i.e. éviter d'acheter des fibres de bouleau et de payer la prime. Cette stratégie est, d'un point de vue pratique, plus souhaitable car autrement, la concurrence pour les fibres contribue à maintenir artificiellement, pour une plus longue période de temps, des prix élevés de fibres sur le marché.

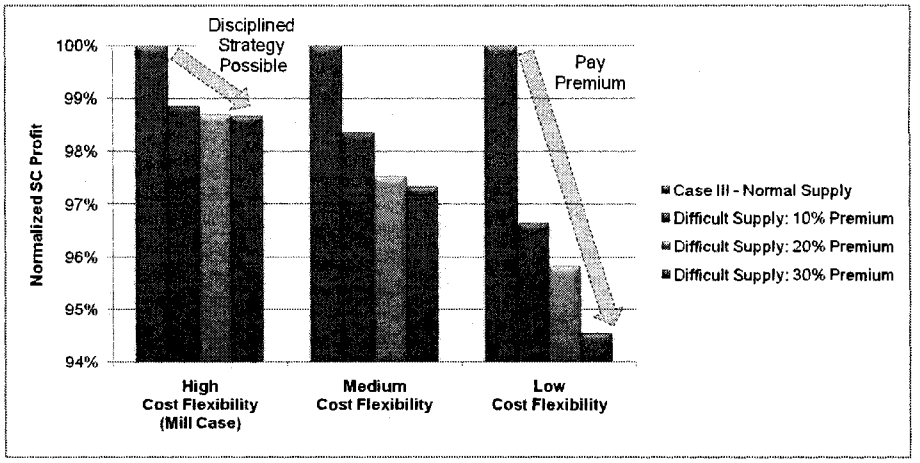


Figure 4.32 : Exemple démontrant que la flexibilité des opérations peut supporter des stratégies particulières d'approvisionnement[59]

[59] Voir article 8.

CHAPITRE 5: DISCUSSION GÉNÉRALE

« Everything you can imagine is real. »

Pablo Picasso, Peintre (1881-1973)

Cette section commente certains éléments de l'approche générale introduite au chapitre précédent.

5.1 Approche de gestion de la SC axée sur les marges

5.1.1 Justification de la démarche employée pour la démonstration de l'approche générale

La Figure 5.1 clarifie, de façon générale, comment les outils développés ont été utilisés, dans le contexte des travaux présentés, pour générer les principaux résultats. Cette division des tâches était, considérant les ressources disponibles et les contraintes pratiques liées à l'étude de cas industrielle, la meilleure option afin de répondre aux objectifs de recherche établis. Étant donné les trois raisons suivantes, les avantages de l'intégration de l'usine et de la SC ont été démontrés en appliquant uniquement les approches de planification opérationnelle et de modélisation de coûts.

1. Une problématique pertinente, et ayant le potentiel de montrer clairement les avantages de l'approche proposée, devait être identifiée à partir de l'étude de cas. Les deux cas identifiés (e.g. la gestion flexible de la capacité et la sélection des recettes) étaient mieux adaptés à la portée du modèle au niveau opérationnel qu'au niveau tactique.
2. Les approches de gestion des opérations définies en collaboration avec le partenaire industriel sont réalistes et pertinentes. Toutefois, elles ne sont pas actuellement

appliquées par celui-ci et, par conséquent, peu de données historiques de procédé étaient disponibles pour caractériser ces conditions d'opération non conventionnelles.

3. Compte-tenu de la résolution des modèles de SC (niveau de détails en ce qui a trait à la représentation des procédés de production) la planification opérationnelle est mieux adaptée pour faire le lien avec les structures de coûts utilisées pour refléter la performance des opérations manufacturières flexibles.

Finalement, il est important de noter qu'il a été démontré que chacune des approches associées aux étapes de la Figure 5.1 est pertinente pour l'industrie, faisable dans un contexte pratique et alignée avec la stratégie générale de gestion de la SC axée sur les marges.

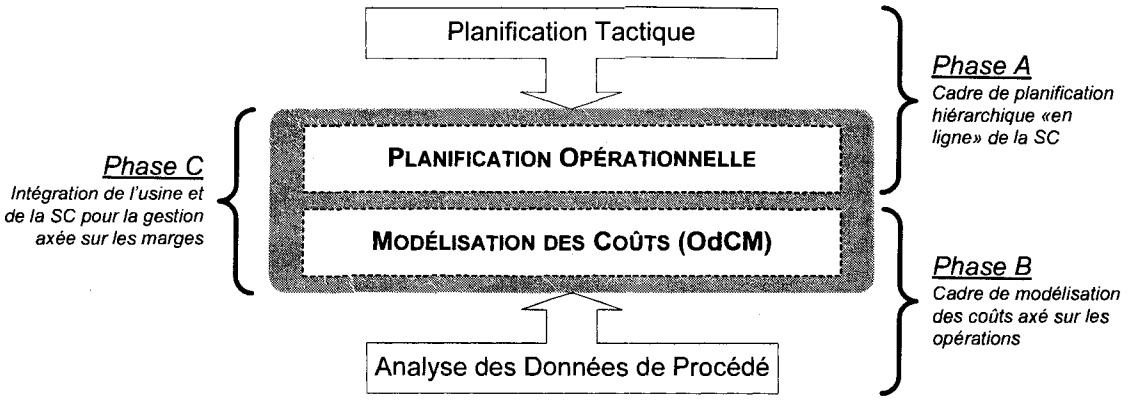


Figure 5.1 : Clarification de l'approche d'intégration des outils développés

5.1.2 Implantation de l'approche axée sur les marges

Le contexte du cas présenté à la Section 4.5.2, qui visait à exploiter la flexibilité des opérations pour aider à l'approvisionnement efficace en fibre, est particulièrement adapté pour illustrer comment l'approche proposée dans cette thèse pourrait être implantée à l'usine. L'architecture potentielle illustrée à la Figure 5.2, qui combine les outils de modélisation des coûts et de planification de la SC, pourrait fournir un support

tant pour la gestion des opérations (activité « en ligne ») que pour la conception des scénarios de recette (activité « hors ligne »).

Tel que mentionné précédemment, il est nécessaire, afin d'incorporer la sélection des recettes dans le problème de planification, de définir un ensemble de scénarios de recette possibles pour chacun des grades de pâte à l'usine (voir #1, Figure 5.2). Il est peu probable, à tout le moins au début de la phase d'implantation, que tous les scénarios établis puissent être caractérisés directement à partir des données de procédé. Dans ce cas, ils doivent être définis de façon préliminaire à partir de l'expérience des ingénieurs à l'usine, de simulations ou toutes autres approches mettant l'accent sur la caractérisation des conditions d'opération (voir #2). Basé sur les informations de procédés disponibles (historiques et préliminaires), les structures de coûts de production, pour les différents grades et pour l'ensemble des scénarios, sont calculées à partir du modèle de coûts axé sur les opérations (voir #3). Le modèle de planification de la SC est mis à jour dès que de nouvelles informations sur les structures de coûts sont obtenues (voir #4). Puisqu'il incorpore la flexibilité des opérations manufacturières, le cadre de planification permet d'évaluer les compromis entre l'usine et la SC et de fournir des indications visant à maximiser la rentabilité globale, pour un environnement d'affaires donné (voir #5). À partir des résultats de l'optimisation et basé sur d'autres informations provenant de sources plus traditionnelles, les gestionnaires prennent les décisions nécessaires qui guideront l'exécution des opérations de la SC (voir #6 & #7). Dès lors, les données de procédé sont extraites des PIMS, après chaque campagne de production, et utilisées pour la caractérisation des opérations réelles à l'usine (voir #8 & #9), tel que présenté à la Section 4.4.2.2. Pour le cas d'un scénario de recettes nouvellement implanté, les informations résultant de l'analyse des données historiques devraient remplacer, pour la modélisation des coûts, celles qui ont été définies de façon préliminaire. Chaque campagne de production subséquente devrait ensuite être considérée afin de mettre à

jour les structures de coûts utilisées. Enfin, à l'aide de techniques plus avancées de traitement des données (voir Section 4.4.2.3), il serait aussi possible d'approfondir l'analyse, d'interpréter les conditions d'opération observées pour les campagnes de production et donc, potentiellement, d'identifier des améliorations aux scénarios de recettes déjà expérimentés (voir #10).

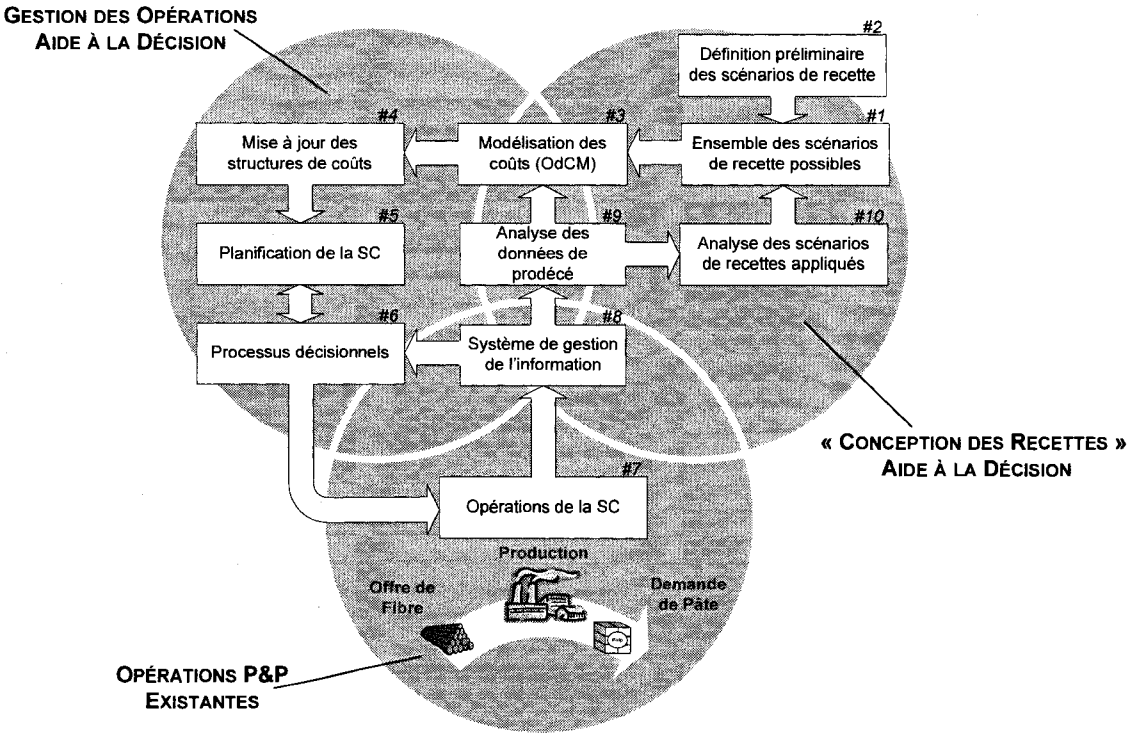


Figure 5.2 : Architecture pour l'implantation de l'approche globale axée sur les marges

(pour le cas où la sélection des recettes est incorporée au problème de planification)

Comparé aux pratiques actuelles, l'approche analytique proposée permettrait une plus grande réactivité pour faire face aux variations de l'environnement d'affaires. Cette structure, qui intègre les niveaux décisionnels et les cycles de la SC, permet de faire une veille constante en ce qui a trait aux difficultés potentielles et opportunités liées à l'optimisation du flux de fibre dans la SC. À l'usine, quoiqu'elle est loin d'être

exceptionnelle, la révision ou l'analyse d'une possibilité de modification des recettes se fait de façon discontinue et souvent, suite à des demande reliées à l'identification par la haute direction d'une opportunité (e.g. pour l'approvisionnement d'une nouvelle essence de bois). Les processus actuels considèrent les conditions d'opération de l'usine, la performance des coûts et la prise de décisions au niveau de la SC de façon beaucoup moins intégrée, transparente et holistique; l'usine et la haute direction mettent l'accent, respectivement, sur la faisabilité technique et le potentiel d'amélioration de la rentabilité. Enfin, bien que les ingénieurs à l'usine ont l'expérience des campagnes de production expérimentales, ils n'ont pas a leur disponibilité des outils d'analyse leur permettant de réconcilier les perspectives d'affaires et de production.

5.1.3 Caractérisation « hors ligne » des structures de coûts

Une des limitations de l'approche présentée à la sous-section précédente consiste au fait que la caractérisation des structures de coûts et la « conception des recettes » se font « hors ligne ». Bien que l'impact de cette limitation soit relativement limité étant donné la simplicité relative du cas d'étude, cela pourrait, pour des situations plus complexes, introduire des défis importants notamment en ce qui a trait:

- Aux difficultés liées à l'intégration de l'information, de différentes sources, natures et résolutions, à la structure modulaire présentée, qui incorpore l'utilisation de divers outils (PIMS, outils d'analyse des données, outils de modélisation des coûts et outils d'aide à la décision);
- Aux activités, beaucoup plus fastidieuses, de « conception des recettes » pour des usines incorporant plusieurs lignes de production/machines et/ou plusieurs grades/produits;

- Aux limitations « artificielles » imposées au problème d'optimisation dû au fait que, à aucun moment, celui-ci ne peut choisir une recette qui n'a pas été préalablement définie[60].

Paradoxalement, il est aussi important de souligner que, strictement du point de vue des coûts, plus les opérations seront complexes, plus il sera avantageux de les caractériser « hors ligne », à l'aide d'une approche OdCM adaptée à cet effet. Enfin, dépendamment du niveau de connaissance du procédé, il peut être bénéfique de définir, une à une, les recettes possibles et de les faire « pré-approuver » avant de les inclure comme variable décisionnelle et d'en faire l'utilisation.

5.2 Planification de la SC

5.2.1 Outil décisionnel pour réagir rapidement aux imprévus

L'intégration de l'information est un aspect critique à la gestion de la SC. Comme on peut le voir, en comparant les résultats obtenus pour les approches « en ligne » et « hors ligne » (respectivement, la semaine 4 à Figure 4.11 & la Figure 4.9), il devient clair que la qualité et la disponibilité de l'information peuvent avoir un impact significatif sur la qualité des décisions prises. Afin de bénéficier pleinement de l'approche de planification « en ligne », il est essentiel de faciliter le flux d'information dans la SC afin de fournir une visibilité accrue aux décideurs et leur permettre de réagir promptement aux changements de situations à l'aide du modèle.

Aussi, en plus de l'incertitude liée à l'approvisionnement et la demande, la planification doit tenir compte des incertitudes liées aux procédés de production. Les

---

[60] Dans le cas où un nombre relativement limité de scénarios serait définis (étant donné la complexité du système ou parce que les gestionnaires sont plus conservateurs), une solution, qui en réalité représenterait le meilleur choix possible, pourrait ne pas être identifiée par le modèle et donc, affecter la qualité des informations obtenues pour la prise de décisions.

décideurs ont typiquement peu d'outils pour déterminer comment les incidents à l'usine (e.g. arrêts non planifiés, déviations du plan de production, etc.) devraient être gérés dans le contexte de la SC [30]. Par exemple :

- Comment devrait réagir l'usine (i.e. adapter la planification) à la suite d'un arrêt non planifié se produisant à la fin d'une campagne de production?
- Est-ce que, suite aux réparations, la campagne en cours devrait être terminée ou est-ce qu'il serait préférable de débuter une nouvelle campagne production?
- Quelles seraient les implications, pour chacune de ces options, sur les cycles d'approvisionnement et de demande?

5.2.2 Défis liées à la résolution des problèmes

Les modèles de planification aux niveaux 1 et 2 sont formulés par programmation linéaire et en nombres entiers et incorporent une représentation discrète du temps. Bien qu'ils offrent la flexibilité nécessaire à la modélisation des divers aspects du problème de SC, un grand nombre de variables binaires et de contraintes doivent être définies. Ce problème combinatoire est difficile à résoudre et requiert généralement beaucoup d'efforts computationnels [108]. Il est bien reconnu que l'un des défis de la formulation des problèmes de P&S est de trouver le meilleur compromis entre la complexité et la précision des modèles. Dans ce contexte, les stratégies visant la simplification, l'approximation ou l'agrégation sont souvent nécessaire à la résolution des problèmes industriels [116, 163]. Par conséquent, en plus de fournir un outil compatible avec les processus d'affaires et niveaux de décisions impliqués dans la planification de la SC, le cadre de planification développé dans cette thèse, qui sépare le problème général en un modèle détaillé avec un horizon de temps plus petit et un modèle agrégé avec un horizon de temps plus long, facilite la résolution du problème dans des délais raisonnables et pratiques. Enfin, il est à noter que cet aspect serait

d'autant plus important si le cadre de planification était appliqué dans le contexte d'un système plus complexe.

5.2.3 Démonstration des propriétés d'agrégation

Il est important de souligner que l'analyse des propriétés d'agrégation a été faite pour le cas particulier d'une agrégation temporelle. Une démonstration similaire pour le cas, par exemple, d'un problème de planification incorporant une agrégation sur les produits (e.g. en famille) pourrait être beaucoup plus difficile à faire [153]. Dans ce cas, les difficultés rencontrées proviendraient en grande partie du fait que les recettes définies pour chaque famille ne correspondraient pas exactement aux conditions d'opération (e.g. taux de production) et à la consommation des ressources (e.g. chimiques) de chacun des produits en particulier. Bien que cela n'a pas été abordé dans le contexte de l'étude de cas présenté, l'agrégation des produits pourrait être nécessaire pour des usines de P&P plus complexes et ayant un plus grand degré de « divergence » à la sortie de l'usine (voir Tableau 2.2).

5.3 Modélisation des coûts

5.3.1 Approche de modélisation pour supporter les problèmes de SC

Pour ne pas introduire de distorsions lors de la prise de décisions, il est primordial de définir correctement la structure des coûts dans le problème de SC. Afin d'assurer la pertinence des liens entre les éléments de coûts et les variables de décisions, il peut être utile de considérer les concepts de hiérarchie des coûts[61] tel que présenté par Cooper & Kaplan [144]. Par exemple, les coûts des transitions, qui doivent être calculés à partir d'éléments tels que le coût du temps perdu à l'usine, le coût

---

[61] Quatre niveaux d'activités sont utilisés afin de refléter la complexité des opérations à l'usine: par unité, par lot, par produit et par installation.

d'opportunité et le coût des activités de production (qui dépend de la séquence), ne doivent pas être imputés directement aux grades produits à l'usine. En fait, la génération de ces coûts n'est pas fonction des quantités produites mais bien de l'occurrence de ces événements. Puisqu'elles représentent des activités par lots, les transitions sont donc modélisées à l'aide de variables discrètes dans le modèle de planification. Pareillement, il n'est pas approprié d'imputer les éléments de coûts, tel que les coûts indirects et frais généraux, sur la base du volume de production (où tout autre base arbitrairement définie). Pour le problème de SC, il ne s'agit pas de spécifier, d'une façon comptable, les coûts par grade, mais bien d'assurer la représentation adéquate de comment ces coûts sont générés en fonction des opérations de la SC et selon la portée des décisions prises. Si besoin est, pour des fins de gestion (e.g. budget), ces éléments de coûts peuvent être imputés, *a posteriori*, basé sur les résultats de la planification.

5.3.2 Gestion des coûts & étalonnage des usines

Beaucoup d'intérêt a été porté, de la part de l'industrie et des fournisseurs de IT, sur le potentiel lié à l'application de l'approche de modélisation des coûts et ce, strictement dans le contexte de la gestion des coûts aux usines de P&P. En fait, l'approche développée pourrait être utilisée pour l'évaluation des coûts, l'élaboration d'indicateurs de performance et l'étalonnage ("benchmarking") des différentes usines d'une même organisation. Bien que ce dernier soit un outil essentiel à d'amélioration de la performance manufacturière, il doit être basé sur une juste comparaison des usines. L'approche OdCM, qui intègre les perspectives de production et d'affaires de façon transparente (puisque basée sur les données de procédé), permettrait d'appuyer ces analyses i.e. en améliorant la visibilité des aspects liés aux technologies utilisées (équipements, configuration du procédé) et à la consommation des matières premières (conditions d'opération) aux usines.

5.3.3 Interprétation des régimes d'opération à l'échelle de l'usine

Les travaux d'analyse des données ayant mené aux résultats présentés à la Section 4.4.2.3 ont aussi permis de réaliser l'ampleur des défis en ce qui a trait à l'interprétation des régimes d'opération à l'échelle de l'usine. En effet, il s'est avéré très difficile de relier de façon plus holistique, les conditions d'opération observées pour les différents PWC à l'usine. Tel que montré, des analyses plus « locale » de chacun des PWC fournissent néanmoins des informations intéressantes sur ces conditions qui ont bel et bien eut lieu et qui ont des implications sur les coûts de production à l'usine. Par conséquent, bien qu'il peut être difficile d'en expliquer les relations de cause à effet à l'échelle de l'usine, il est à tout le moins pertinent de les identifier.

Dans ce contexte, deux limitations principales ont été identifiées. La première, qui est fonction des IT aux usines, consiste en la disponibilité et la qualité des données pour l'analyse des procédés. La seconde concerne quant à elle la capacité des outils technologiques utilisés versus la complexité des opérations manufacturières en P&P. Dans tous les cas, il est suggéré, basé sur l'expérience acquise, de mettre l'emphase sur la combinaison d'outils (« data mining », méthode de réconciliation des données, simulations, etc.) pour générer des informations qui sont sensées du point de vue des opérations, qui aident à mieux comprendre la génération des coûts à l'usine et qui sont pertinentes pour la prise de décisions d'affaires.

CHAPITRE 6: CONCLUSIONS

« "J'ai fait cela", dit ma mémoire. – "Impossible !" dit mon orgueil, et il s'obstine. Enfin de compte, c'est la mémoire qui cède. »

Friedrich Nietzsche, Philosophe Allemand (1844-1900)

6.1 Conclusions

En P&P, l'état d'esprit est de produire le plus possible afin de minimiser les coûts fixes par tonne. Considérant la conjoncture hautement compétitive à laquelle l'industrie canadienne est confrontée, cette pratique n'est plus acceptable et de meilleures stratégies d'affaires doivent être identifiées basé sur des approches de gestion holistiques. Contrairement à la croyance populaire, cette thèse démontre qu'il y a un bénéfice à appliquer les concepts de SCM dans le contexte d'une industrie de commodité. Les heuristiques de gestion typiquement appliquées ne sont valables que pour des situations spécifiques. En effet, dépendamment des environnements d'affaires qui sont hors du contrôle de l'entreprise, des approches alternatives doivent être considérées. En mettant l'emphase sur la rentabilité globale des opérations, l'optimisation de la SC améliore la coordination et la gestion des compromis entre les cycles d'approvisionnement, de production et de demande.

À ce jour, les systèmes avancés de SCM implantés par certaines papetières (notamment dans les papiers fins) ne considèrent pas systématiquement l'intégration des procédés manufacturiers. Puisqu'elles ne tiennent pas compte de la complexité de ces derniers, ces approches ne permettent pas d'aborder le problème de SC de façon exhaustive. Au mieux, elles manquent des opportunités d'amélioration de la rentabilité des opérations, au pire, elles conduisent à de mauvaises décisions car elles sont basées

sur une fausse idée de ce qu'est la capacité de production et la structure de coûts des usines.

La représentation détaillée des procédés est critique pour la gestion de la SC des industries de procédé axées sur les marges. Étant donné l'importance pour l'industrie des P&P de minimiser ses coûts et l'état actuel des technologies de l'information, il n'est plus logique, ni pour la gestion des coûts ni pour la gestion de la SC, d'adopter des approches basées sur les recettes standard. La méthode de gestion de la SC, ayant été démontrée dans ces travaux, incorpore la capacité des opérations manufacturières et ainsi, permet d'exploiter la flexibilité des procédés afin de tirer profit des compromis entre les opérations de l'usine et de sa SC selon l'environnement d'affaires dans lequel elle évolue. Tel qu'illustré dans cette thèse, ceci nécessite l'utilisation d'outils analytiques avancés pour l'analyse des conditions d'opération, la caractérisation des structures de coûts et l'optimisation de la SC. Il a été montré qu'une telle approche peut offrir des avantages non négligeables pour le cas d'un système industriel relativement simple (i.e. une seule usine, procédé manufacturier simple, un petit nombre de grades, etc.). On peut donc s'attendre à ce que les bénéfices soient plus significatifs pour des cas plus complexes (e.g. plusieurs grades, plusieurs usines, produits de spécialité). Bien qu'elle reconnaisse la SCM comme une avenue importante à exploiter, l'industrie papetière se doit d'être plus agressive vis-à-vis le développement de ses compétences à gérer la complexité. Outre l'amélioration de la rentabilité des opérations, l'implantation d'une capacité unique de SCM, intimement liée aux aspects organisationnels et stratégiques de l'entreprise, crée un avantage concurrentiel important et difficilement imitable.

Finalement, la collaboration peut représenter un défi important pour l'implantation d'outils d'aide à la décision et de nouvelles approches de SCM. Pour assurer le succès de l'application de ces concepts, il est donc primordial que toute

initiative tienne compte, entres autres, des structures organisationnelles et des individus.

6.2 Contributions

6.2.1 Cadre de planification de la SC axé sur les marges en P&P

En assurant la représentation adéquate du cycle manufacturier au sein de la SC, grâce à une approche analytique exploitant les données des PIMS dans un contexte d'affaires, l'industrie des P&P peut bénéficier d'une approche de gestion de la SC axée sur les marges :

- L'analyse des données de procédés historiques permet l'identification des conditions d'opération pour différents régimes à l'usine (e.g selon le grade, selon le taux de production, selon les ratios d'alimentation en copeaux, etc.);
- L'approche de modélisation des coûts axée sur les opérations, qui réconcilie les perspectives de production et d'affaires à l'usine, permet de caractériser la structure des coûts de production en fonction des conditions d'opération identifiées;
- Le cadre de planification de la SC, qui incorpore les informations pertinentes reflétant le cycle manufacturier, permet d'intégrer l'usine au sein de la SC et de soutenir la prise de décisions liées à la coordination efficace du flux de fibres dans la SC;
- L'approche globale axée sur les marges permet, contrairement aux pratiques de gestion « centrées sur la production » et basées sur les recettes, de mieux exploiter les compromis entre l'usine et la SC afin de maximiser la rentabilité des opérations de la SC.

6.2.2 Outils d'aide à la planification de la SC

L'utilisation d'outils d'aide à la décision basés sur l'optimisation, pour la planification tactique et opérationnelle en P&P, aide les décideurs à mieux évaluer les compromis et à gérer la complexité de la SC afin de maximiser la rentabilité de celle-ci en fonction de l'environnement d'affaires :

- Un modèle de planification agrégée de la capacité aide à déterminer, à plus long terme, une stratégie équilibrée de gestion d'approvisionnement de la fibre en fonction des prévisions de l'offre de fibres et de la demande de pâte ;
- Un modèle de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes aide à déterminer, à plus court terme, le plan détaillé d'approvisionnement, la séquence optimale des campagnes de production, et la sélection des commandes qui maximisent la rentabilité des opérations de la SC ;
- L'approche hiérarchique « en ligne » s'adapte aux processus de prise de décisions; elle tient compte de l'implication des différents décideurs responsables à chaque niveau et reconnaît la nature dynamique, dû à l'évolution de la situation d'affaires, des processus décisionnels de planification ;
- L'intégration des cibles d'inventaire, déterminées par la planification tactique, permet à la planification opérationnelle de tenir compte, lorsqu'elle détermine comment maximiser la rentabilité à court terme, des tendances à long terme liées à l'offre et la demande de fibres ;
- L'analyse des propriétés d'agrégation, qui démontre que le modèle agrégé est une relaxation du modèle détaillé, permet de comprendre les limites, en termes d'optimalité et de faisabilité, du cadre de planification ;
- L'approche élaborée pour l'évaluation du minimum possible du niveau d'inventaire moyen (AMI) pour une période agrégée fait en sorte que les coûts des inventaires

dans la formulation agrégée soient une borne inférieure aux coûts correspondants calculés dans le modèle détaillé, afin d'assurer la relaxation.

6.2.3 Modélisation des coûts axée sur les opérations

En mettant l'emphase sur la perspective procédé comme source de génération des coûts dans les environnements continus de production, l'approche de modélisation développée améliore la caractérisation des coûts directs en fonction des conditions d'opération dans les usines de P&P :

- Une méthode étape-par-étape, pour structurer et analyser les données clés de procédé et développer un modèle de coûts ascendant, aide à réconcilier les perspectives de procédés et d'affaires aux usines de P&P et à fournir des informations plus transparentes pour l'évaluation des inducteurs de coûts basés sur la compréhension des opérations ;
- Un cadre de modélisation axé sur les opérations qui intègre les données de procédé et de coûts à l'aide d'une procédure standard de calcul et qui met l'emphase sur l'analyse des liens entre l'utilisation des ressources, les activités dans le procédé et les objets de coûts, améliore la traçabilité des coûts directs des opérations manufacturières en P&P ;
- Les informations additionnelles fournies par l'analyse plus sophistiquée des données de procédé, qui améliore la compréhension des diverses conditions qui influencent l'utilisation des ressources par le procédé, permettent de pleinement exploiter la structure du modèle de coût développé (inspiré du ABC) et ainsi, d'aider à l'interprétation des coûts de production à l'usine.

6.3 Travaux futurs

6.3.1 Planification de la SC multi-usines

Une des extensions les plus pertinentes aux travaux présentés consisterait à élargir la portée du problème de planification de la SC et de considérer le réseau constitué de plusieurs usines de pâte. Puisqu'un même marché peut être desservi par plus d'une usine, davantage d'emphase devrait être mis sur l'évaluation des compromis entre les coûts de transport, l'efficacité de production et les opportunités régionales d'approvisionnement. Étant donné les synergies possibles, il est probable que cette approche offre des opportunités significatives d'amélioration de la rentabilité. Enfin, il serait aussi intéressant d'établir la meilleure stratégie reliée à l'implantation de l'approche hiérarchique et ce, en considérant les besoins de l'approche ascendante, la complexité de résolution des modèles et les aspects pratiques reliés aux processus décisionnels de l'entreprise.

6.3.2 Incertitudes liées à l'environnement d'affaires

Pour les problèmes de planification, plus l'horizon de temps considéré est long, plus les incertitudes liées à l'environnement d'affaires sont grandes. Par conséquent, une extension intéressante pour le problème de planification agrégée de la capacité (niveau 1) serait de développer une approche permettant d'ajouter des erreurs stochastiques sur les prévisions utilisées. En plus de limiter la propagation des incertitudes à long terme par les indications fournies au problème détaillé, une telle approche pourrait aider à identifier les problèmes potentiels reliés à l'équilibre de l'offre et la demande de fibre et à identifier des stratégies d'approvisionnement plus robustes tout au long de l'année.

6.3.3 Niveau 3 : vers l'optimisation en temps réel des opérations de l'usine

Les travaux présentés ont mis l'accent sur la SC de la fibre i.e. sur l'alignement entre les opportunités d'approvisionnement en fibre, la capacité de production et la demande de pâtes. Toutefois, il serait potentiellement avantageux d'incorporer certains autres aspects, tels que les utilités (vapeur, électricité) et les encours de production, afin de mieux tenir compte des différents points d'engorgement à l'usine. Pour ce, une approche possible consisterait à ajouter un troisième niveau au cadre de planification développé. Celui-ci s'intègrerait au niveau 2 et viserait à optimiser les opérations de l'usine en temps réel. Il pourrait, par exemple, dans le contexte d'une usine située dans un marché énergétique déréglementé, inclure les détails nécessaires afin de supporter des stratégies de gestion énergétique (consommation & production d'énergie, « load shifting », etc.) offrant une opportunité additionnelle d'amélioration de la rentabilité.

6.3.4 Intégration des aspects financiers

Afin de comprendre comment créer de la valeur pour les actionnaires, il est important de considérer les aspects financiers de l'entreprise. Il serait donc intéressant d'incorporer ces aspects à l'approche générale de SCM. Au lieu de maximiser le profit pour une période donné, il s'agirait plutôt d'optimiser la génération du flux de trésorerie disponible (« free cash flow ») en tenant compte d'éléments tels que le fond de roulement, le cycle commercial (« cash cycle »), le coût du capital, etc. L'approche de modélisation des coûts développée, qui intègre déjà bon nombre d'informations provenant des systèmes comptables de l'usine, pourrait être adaptée pour supporter une telle approche de gestion.

6.3.5 Raffinement du modèle de coûts élaboré

Les aspects suivants pourraient être abordés afin de poursuivre le développement de l'outil et/ou de montrer les bénéfices de son application dans d'autres contextes :

- Appliquer l'approche pour la caractérisation de structures de coûts plus complexes e.g. pour une usine de cellulose de spécialité produisant plusieurs produits ;
- Investiguer davantage les aspects liés à l'intégration des perspectives procédé et produit pour la gestion des coûts dans les usines de P&P e.g. transitions, spécifications des clients, etc. ;
- Analyser l'impact de la perspective procédé sur la génération des coûts indirects aux usines e.g. entretien et réparation ;
- Utiliser l'approche OdCM pour le développement d'indicateurs clés de performance; au niveau de l'usine pour définir des cibles basées sur les meilleures opérations et au niveau de l'entreprise pour comparer la performance des usines ;
- Déterminer comment la structure du modèle devrait être adaptée de sorte à ce qu'elle soit plus ouverte pour l'intégration avec des outils d'aide à la décision et d'analyse des procédés.

6.3.6 Qualité des données de procédé

Dès lors que les décisions d'affaires (pour la gestion des coûts ou de la SC) sont prises à partir d'une caractérisation des opérations basées sur les données de procédé, un des défis important à relever consiste à assurer la qualité de ces dernières. Pour ce, les approches basées sur la réconciliation des données pourraient être des plus utiles; pour chaque régime permanent qui serait détecté, il serait possible de vérifier, basé sur des bilans, l'état de la qualité des données. Ces approches offrent aussi certaines

opportunités (e.g. les techniques de détection et d'analyse des régimes permanents) en ce qui a trait à la modélisation des coûts. Enfin, l'application pratique de ces méthodologies, à l'échelle de l'usine, comporte de nombreuses difficultés.

RÉFÉRENCES

[1] Investissement au Canada, "Wood Processing," *[web] http://proquest.umi.com/pqdweb?index=3&did=1453186881&SrchMode=2&sid=2&Fmt=2&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1219094157&clientId=43390, Consulté le 08-08-08*, 2008.

[2] Forest Products Association of Canada, "FPAC Annual Review 2007," Forest Products Association of Canada (FPAC), Ottawa (Canada) 2007.

[3] R. J. Eamer, "The road to recovery facing the brutal facts," presented at International Finance Forum for the Pulp, Paper, and Allied Industries, Atlanta, USA, 2003.

[4] FPAC, "Annual Review," Forest Products Association of Canada (FPAC), Ottawa, Canada 2006.

[5] J. McNutt, D. Cenatempo, and B. Kinstrey, "State of the North American Pulp and Paper Industry," presented at 2004 TAPPI Paper Summit - Spring Technical and International Environmental Conference, May 3-5 2004, Atlanta, GA, United States, 2004.

[6] A. Orzechowska, "Saving the Canadian industry: Discussing possible solutions," *Pulp and Paper Canada*, vol. 106, pp. 25-27, 2005.

[7] McKinsey&Company, "Market challenges for natural resources and raw materials," *Ad hoc group 10 - Discussion material*, vol. STO-cnPB-20070321-BioEnergy Opportunities, 2007.

[8] PricewaterhouseCoopers, "CEO Perspectives - Viewpoints of the CEOs in the forest, paper & packaging indsutry worldwide," 2008.

[9] M. J. M. Janssen, "Retrofit design methodology based on process and product modeling," in *Chemical Engineering*, vol. PhD. Montreal (Canada): Ecole Polytechnique, 2007.

[10] H. Stadtler and C. Kilger, *Supply chain management and advanced planning : concepts, models, software, and case studies*. Berlin ; New York: Springer, 2000.

[11] J. B. Ayers, *Making supply chain management work : design, implementation, partnerships, technology, and profits*. Boca Raton, Fla.: Auerbach Publications, 2002.

[12] S. Chopra and P. Meindl, *Supply chain management : strategy, planning, and operation*, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2007.

[13] J. G. A. J. Van Der Vorst, "Effective Food Supply Chains - Generating, Modelling and Evaluating Supply Chain Scenarios ", vol. PhD: Wageningen University, 2000, pp. 305.

[14] R. B. Handfield and E. L. Nichols, *Introduction to supply chain management.* Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999.

[15] L. M. Ellram, "Supply-Chain Management: The Industrial Organisation Perspective," *International journal of physical distribution & logistics management*, vol. 21, pp. 13-22, 1991.

[16] C. T. Maravelias and C. Sung, "Integration of production planning and scheduling: overview, challenges and opportunities," *Proceedings 5th International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO 08)*, pp. 13-22, 2008.

[17] American Production and Inventory Control Society., "APICS dictionary," 11th ed. Alexandria, VA: APICS-The Educational Society for Resource Management., 2005, pp. 126.

[18] M. C. Cooper, "Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 8, pp. 1, 1997.

[19] N. Shah, "Process industry supply chains: Advances and challenges," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 29, pp. 1225-1236, 2005.

[20] B. M. Beamon, "Supply chain design and analysis:: Models and methods," *International Journal of Production Economics*, vol. 55, pp. 281-294, 1998.

[21] S. Kreipl and M. Pinedo, "Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice," *Production and Operations Management*, vol. 13, pp. pp. 77-92, 2004.

[22] D. M. Lambert, "Issues in Supply Chain Management," *Industrial marketing management*, vol. 29, pp. 65, 2000.

[23] R. Lummus, Vorkuka, R., "Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 99, pp. 11, 1999.

[24] L. H. Harrington, "Building the sense and respond company," *Inbound Logistics*, pp. 90-98, 2004.

[25] J. M. Wassick, "Enterprise-wide optimization in an integrated chemical complex," *Proceedings 5th International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO 08)*, pp. 53-62, 2008.

[26] A. Lockamy III, "The impact of process maturity and uncertainty on supply chain performance: an empirical study," *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 15, pp. 12-27, 2008.

[27] L. G. Papageorgiou, "Supply chain optimisation for the process industries: advances and opportunities," *Proceedings 5th International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO 08)*, pp. 33-42, 2008.

[28] M. C. Cooper, "Characteristics of Supply Chain Management and the Implications for Purchasing and Logistics Strategy," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 4, pp. 13, 1993.

[29] S. Seuring and M. Goldbach, *Cost management in supply chains*. Heidelberg ; New York: Physica-Verlag, 2002.

[30] S. R. McLean, "Supply chain management for pulp and paper companies," presented at PPI's First Latin American Congress, Sao Paolo, Brazil, 1999.

[31] S. McLean, "Finding strategic advantage through SCM," *PPI*, vol. 41, pp. 28, 1999.

[32] J. Kenny, "How wide is the technology gap?," *Solution!*, vol. 85, 2005.

[33] T. Teras, "Supply Chain and Market Dynamics," presented at Global Forest and Paper Summit 2005, Vancouver, 2005.

[34] P. Berg, "The real impact of Asia on world pulp and paper markets," presented at Senior Management Symposium, Asian Paper, 2006.

[35] R. James, "Sappi strives for supply chain excellence," *Pulp and Paper International*, 2000.

[36] P. Lail, "Achieving supply chain and IT project success," *Pulp & Paper*, vol. 78, pp. 25, 2004.

[37] M. Collins, "The business case for real time integration of MES systems in the paper industry," Suntec, Singapore, 2004.

[38] K. Hagy, "Supply chain management: Balancing the organization, suppliers and customer," *Pulp & paper Canada*, vol. 101, pp. 15, 2000.

[39] J. Kenny, "SCM: Are you ready for the future?," *PPI*, vol. 41, pp. 31, 1999.

[40] M. Mommersteeg, "Changing the chain to strengthen supplies," *PPI*, vol. 43, pp. 23, 2001.

[41] K. Ferguson, "Can abitibi take your order?," *Pulp and Paper*, vol. 79, pp. 41-45, 2005.

[42] J. Kenny, "Taking your place on the chain gang," *PPI*, vol. 41, pp. 50, 1999.

[43] K. Maxwell, "Executive study assesses current state of ERP in paper industry," *Pulp and Paper*, vol. 73, pp. 6, 1999.

[44] S. Scharpf, "ERP & MES: framing a new information architecture," *PIMA's Papermaker*, vol. 81, pp. 33-36, 1999.

[45] S. Scharpf, "ERP & MES: Information revolution sparks an IS evolution," *PIMA's Papermaker*, vol. 81, pp. 5, 1999.

[46] J. Rhiannon, "Sappi strives for supply chain excellence," *PPI*, vol. 42, pp. 17, 2000.

[47] C. Jewitt, "Sappi Fine Paper North America adopts ERP system used at European mills," *Pulp and Paper International*, vol. 76, 2002.

[48] B. Yeager, "Mead's ERP system integrates "best of breed" software," *PIMA's Papermaker*, vol. 82, 2000.

[49] M. Shaw, "Fast-track ERP project integrates business functions for Madison Paper Industries," *Pulp & Paper*, vol. 77, 2003.

[50] P. Lail, "ERP and the Paper Industry: Where is the Fit," *PIMA's Papermaker*, vol. 82, 2000.

[51] R. Royer, "North Amerian Cost Competitiveness," presented at Pulp & Paper Week Global Outlook Conference, New York, 2003.

[52] T. Uronen, "Acheiving supply chain excellence," *Pulp and Paper International*, vol. 48, 2006.

[53] D. R. Carlsson, M., "Supply chain management in forestry - Case studies at Sodra Cell AB," *Supply Chain Management and Advanced Planning European Journal of Operational Research*, vol. 163, pp. 589-616, 2005.

[54] I. Kissani and A. Martel, "Design du réseau logistique des entreprises de pâte et papier " *Actes du 5ième Congrès International de Génie Industriel*, pp. p. 1-10., 2003.

[55] J. Bottiglieri, "Supply chain management: so what's the problem?," *PIMA'S Papermaker [H.W. Wilson - AST]*, vol. 82, pp. 60, 2000.

[56] C. Jewitt, "Joining up the links in the supply chain," *PPI*, vol. 44, pp. 30, 2002.

[57] P. W. Lail, *Supply chain best practices for the pulp and paper industry*. Atlanta, GA: Tappi Press, 2003.

[58] J. Fogelholm, "Cost Function Modelling in the Paper Industries," in *Industrial Management and Work and Organizational Psychology*, vol. PhD. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2000, pp. 102.

[59] J.-M. Lehtonen, "Supply chain development in process industry," Espoo, Finland :Finnish Academy of Technology, 1999.

[60] J. Fogelholm, "Cost modeling in the Paper Industries," *Proceedings of Fourteenth European Meeting on Cybernetics and System Research (Vienne)*, vol. 2, pp. p.501-507, 1998.

[61] K. Apostolatos, "Simplifying the complex issue of doing business," *PPI*, vol. 41, pp. 39, 1999.

[62] D. R. Dennis and J. R. Meredith, "An analysis of process industry production and inventory management systems," *Journal of Operations Management*, vol. 18, pp. 683-699, 2000.

[63] J. F. Shapiro, *Modeling the supply chain*. Pacific Grove, CA: Duxbury-Thomson Learning, 2001.

[64] Z. Sebestyén and V. Juhasz, "The impact of the cost of unused capacity on production planning of flexible manufacturing systems," *PERIODICA POLYTECHNICA SER. SOC. MAN. SCI.*, vol. 11, pp. 185-200, 2003.

[65] R. T. Yu-Lee, "1-Limitations of Cost Accounting," in *Explicit cost dynamics: an alternative to activity-based costing*. New York: Wiley, 2001, pp. 1-22.

[66] D. Carlsson, S. D'Amours, A. Martel, and M. Rönnqvist, "Supply Chain Management in the Pulp and Paper Industry," *Interuniversity research center on enterprise networks, logistics and transportation, Working Paper DT-2006-AM-3*, pp. 39, 2006.

[67] D. Bredstrom, J. T. Lundgren, M. Ronnqvist, D. Carlsson, and A. Mason, "Supply chain optimization in the pulp mill industry - IP models, column generation and novel constraint branches," *European Journal of Operational Research*, vol. 156, pp. 2-22, 2004.

[68] G. Everett, A. Philpott, and G. Cook, "Capital planning under uncertainty at Fletcher Challenge Canada," Rotorua, New Zealand, 2002.

[69] D. Hultqvist and L. Olsson, "Optimization of raw material procurement at pulp and paper mills - the influence of weather-related risks," *International Journal of Systems Science*, vol. 37, pp. 253-269, 2006.

[70] T. C. Maness and S. E. Norton, "Multiple period combined optimization approach to forest production planning," *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 17, pp. 460-471, 2002.

[71] N. Rizk, A. Martel, and S. D'Amours, "Multi-item dynamic production-distribution planning in process industries with divergent finishing stages," *Computers & Operations Research*, vol. 33, pp. 3600-3623, 2006.

[72] M. Sesh, A. Rama, G. Richard, K. Pinar, and et al., "Cooperative multiobjective decision support for the paper industry," *Interfaces*, vol. 29, pp. 5, 1999.

[73] A. Philpott and G. Everett, "Supply chain optimisation in the paper industry," *Appita Journal*, vol. 54, pp. 121-125, 2001.

[74] S. Murthy, R. Akkiraju, R. Goodwin, P. Keskinocak, J. Rachlin, F. Wu, S. Kumaran, J. Yeh, R. Fuhrer, A. Aggarwal, M. Sturzenbecker, R. Jayaraman, and B. Daigle, "Enhancing the decision making process for paper mill schedulers," presented at Proceedings of the 1998 Finishing and Converting Conference, Oct 4-8 1998, Minneapolis, MN, USA, 1998.

[75] N. Lasslett, "Production scheduling for pulp mills," presented at Proceedings - PulPaper 2004 Conferences, Efficiency, Jun 1-3 2004, Helsinki, Finland, 2004.

[76] D. Beaudoin, Lebel, L., Frayret,J-M., "Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis," *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 37, pp. 128-140, 2007.

[77] G. Weigel, S. D'Amours, A. Martel, and P. Watson, "A model for maximizing value creation in pulp and paper mills," *Paprican University Report*, vol. PUR 865, 2005.

[78] T. Santoso, M. Goetschalckx, S. Ahmed, and A. Shapiro, "Strategic design of robust global supply chains: two case studies from the paper industry," presented at TAPPI 2004 Conference, Atlanta, 2004.

[79] H. Andersson and P. Varbrand, "Decision support for distribution chain management: the Swedish pulp industry," presented at Intelligent Transportation Systems, 2004. Proceedings. The 7th International IEEE Conference on, 2004.

[80] D. Bredstrom and M. Ronnqvist, "Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry," presented at System Sciences, 2002. HICSS. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on, 2002.

[81] A. Martel, "Optimizing the structure of production-distribution networks," presented at PAPTACT 91st Annual Meeting, Montreal, 2005.

[82] M. A. Rodriguez and A. Vecchietti, "Hierarchical purchase decisions with generalized disjunctive programming in the paper supply chain: a first step towards supply chain integration," *Proceedings 5th International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO 08)*, pp. 473-476, 2008.

[83] S. S. Chauhan, A. Martel, and S. D'Amours, "Roll assortment optimization in a paper mill: An integer programming approach," *Computers & Operations Research*, vol. In Press, Corrected Proof.

[84] J. D. Kelly, "Modeling Production-Chain Information," *Chemical engineering progress*, vol. 101, pp. 28, 2005.

[85] Y. Crama, Pochet, Y., Wera, .Y, "A discussion of production planning approaches in the process industry," *CORE Discussion Paper*, vol. 42, 2001.

[86] J. M. Reeve, "Cost management in continuous-process environments," *Journal of Cost Management* pp. 22-34, 1991.

[87] V. Jovan, "The specifics of production scheduling in process manufacturing," *Elektrotehniski vestnik 69(5): 305-310, 2002*, vol. 69, pp. 305-310, 2002.

[88] D. E. Shobrys and D. C. White, "Planning, scheduling and control systems: why cannot they work together," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 26, pp. 149-160, 2002.

[89] I. E. Grossmann, "Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 29, pp. 29-39, 2004.

[90] R. W. H. Sargent, "What is Chemical Engineering?," *CAST Newsletter*, vol. 14, pp. pp.9-11, 1991.

[91] M. M. El-Halwagi, *Pollution prevention through process integration : systematic design tools*. San Diego: Academic Press, 1997.

[92] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, "Process Integration [En ligne]." http://www.tev.ntnu.no/iea/pi/definition.html (page consultée le 2004-07-26), 2000.

[93] W. Marquardt, L. V. Wedel, and B. Bayer, "Perspectives on Lifecycle Process Modeling," *FOCAPD, 5th International Conference on Computer-Aided Process Design, AIChE Symposium Series 323 96 (200)*, pp. 192-214, 2000.

[94] D. E. Seborg, T. F. Edgar, and D. A. Mellichamp, *Process dynamics and control*, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2004.

[95] M. Janssen, Laflamme-Mayer, M., Zeinou, M.-H., Stuart, P.R., "Survey indicates mills' need to exploit IT systems with new business model," *Pulp and Paper*, vol. 78, pp. 46-51, 2004.

[96] M. S. Janssen, P.R., "Business model framework for using real-time process data for design decision making," *Accepted by Journal of Engineering Design and Innovation*, 2007.

[97] I. Grossmann, "Enterprise-wide optimization: A new frontier in process systems engineering," *AIChE Journal*, vol. 51, pp. 1846-1857, 2005.

[98] S. M. S. Neiro and J. M. Pinto, "Supply chain optimisation of petroleum refinery complexes," *Proceedings of the fourth international conference on foundations of computer-aided process operations* pp. 59-72, 2003.

[99] H. M. S. Lababidi, "Optimizing the supply chain of a petrochemical company under uncertain operating and economic conditions," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 43, pp. 63, 2004.

[100] E. P. Schulz, "Supply chain optimization of large-scale continuous processes," *Computers & chemical engineering*, vol. 29, pp. 1305, 2005.

[101] H. S. Stefansson, Nilay, Jensson, Pall., "Multiscale planning and scheduling in the secondary pharmaceutical industry," *AIChE Journal*, vol. 52, pp. 4133-4149, 2006.

[102] N. Shah, "Single- and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges," *AIChE Symposium Series*, vol. 320, pp. 75-90, 1998.

[103] J. D. Camm, "Blending OR/MS, judgment, and GIS: Restructuring P&G's supply chain," *Interfaces*, vol. 27, pp. 128, 1997.

[104] E. H. Sabri, "A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design," *Omega*, vol. 28, pp. 581, 2000.

[105] G. Guillén, F. D. Mele, M. J. Bagajewicz, A. Espuna, and L. Puigjaner, "Multiobjective supply chain design under uncertainty," *Chemical engineering science*, vol. 60, pp. 1535, 2005.

[106] P. Forget, S. D'Amours, and J.-M. Frayret, "Multi-behavior agent model for planning in supply chains: An application to the lumber industry," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, pp. 664-679, 2008.

[107] R. García-Flores, "A multi-agent system for chemical supply chain simulation and management support," *OR Spektrum*, vol. 24, pp. 343, 2002.

[108] I. E. Grossmann, S. A. v. d. Heever, and I. Harjunkoski, "Discrete optimization methods and their role in the integration of planning and scheduling," *Proceedings of the AIChE Symposium Series No. 326*, vol. 98, pp. 150-168, 2002.

[109] J. Kallrath, "Planning and scheduling in the process industry," *OR Spectrum*, vol. 24, pp. 219-250, 2002.

[110] B. L. Harkins, Middleton, E.S., Mushin, D.A., "Linking the plant floor to the enterprise: the benefits & pitfalls," *Hydrocarbon Processing*, 1999.

[111] M. Stobbe, Löhl,T., Schulz, C., Engell, S., " Model Based Manufacturing Consolidated Review of Research and Applications 8. Planning and Scheduling in the Process Industry," *Process Control Laboratory, University of Dortmund*, 2002.

[112] C. A. Floudas and X. Lin, "Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 2109-2129, 2004.

[113] J. D. Kelly, "Formulating productlon planning models," *Chemical Engineering Progress*, vol. 100, pp. 43, 2004.

[114] E. Kondili, C. C. Pantelides, and R. W. H. Sargent, "A general algorithm for short-term scheduling of batch operations--I. MILP formulation," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 17, pp. 211-227, 1993.

[115] S. J. Wilkinson, A. Cortier, N. Shah, and C. C. Pantelides, "Integrated production and distribution scheduling on a Europe-wide basis," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 20, pp. S1275-S1280, 1996.

[116] H. J. Stefansson, Pall. Shah, Nilay., "Integration of multi-scale planning and scheduling problems," presented at 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering Germany, 2006.

[117] A. Brooke, Kendrick, D., Meeraus, A. Raman, R., *GAMS A Users Guide*. Washington DC: GAMS Development Corporation, 2005.

[118] L. G. Papageorgiou and C. C. Pantelides, "Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 2. A Mathematical Decomposition Approach," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, pp. 510-529, 1996.

[119] M. E. Dogan and I. Grossmann, "A decomposition method for the simultaneous planning and scheduling of single-stage continuous multiproduct plants," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 45, pp. 299, 2006.

[120] G. Guillen, M. Badell, A. Espuna, and L. Puigjaner, "Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 30, pp. 421-436, 2006.

[121] A. D. Dimitriadis, N. Shah, and C. C. Pantelides, "RTN-based rolling horizon algorithms for medium term scheduling of multipurpose plants," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 21, pp. S1061-S1066, 1997.

[122] M. M. Qiu and E. E. Burch, "Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, multi-machine environment," *International Journal of Production Research*, vol. 35, pp. 3023-3042, 1997.

[123] M. J. Liberatore and T. Miller, "A hierarchical production planning system," *Interfaces*, vol. 15, pp. 1, 1985.

[124] A. C. Hax, Meal, H.C., "Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling," in *Studies in Management Sciences - Logistics*, vol. 1, M. A. Geisler, Ed. Amsterdam: North-Holland Publishing Company : distributed by American Elsevier, 1975, pp. xvi, 184 p.

[125] J.-H. Ryu, V. Dua, and E. N. Pistikopoulos, "A bilevel programming framework for enterprise-wide process networks under uncertainty," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 1121-1129, 2004.

[126] J. R. Jackson and I. Grossmann, "Temporal decomposition scheme for nonlinear multisite production planning and distribution models," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 42, pp. 3045, 2003.

[127] M. Williamson and H. Lasander, "Linking operations to business goals," *Pulp and Paper International*, vol. 48, 2006.

[128] J. Fraser, "State-of-the-market report:ERP-to-plant floor systems integration," Insdustry Directions October 1997.

[129] M. Shaw, "Untangling the supply chain," *Pulp & Paper*, vol. 81, pp. 24-27, 2007.

[130] N. G. Carr, "IT Doesn't Matter," *Harvard business review*, vol. 5, pp. 41, 2003.

[131] Anonymous, "Optimising paper production," *Process Engineering*, pp. 29, 2005.

[132] C. E. Bodington, *Planning, scheduling, and control integration in the process industries*. New York ; Montrâeal: McGraw-Hill, 1995.

[133] G. Coppus and A. Strashok, "Manufacturing information systems for the process industry—Responding to the plant management challenges of the 90's," *ISA transactions*, vol. 34, pp. 119, 1995.

[134] P. Loos and T. Allweyer, "Application of production planning and scheduling in the process industries," *Computers in industry*, vol. 36, pp. 199, 1998.

[135] C. T. Horngren, G. Foster, and L. S. Bamber, *Cost accounting : a managerial emphasis*, 7th ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1991.

[136] R. Cooper, "Cost Management: From Frederick Taylor to the Present," *Journal of Cost Management*, pp. 4-9, 2000.

[137] R. S. Kaplan and R. Cooper, *Cost & effect : using integrated cost systems to drive profitability and performance*. Boston: Harvard Business School Press, 1998.

[138] V. Thormählen, "Suitability of Oracle Applications for Standard and Activity Based Costing," presented at Proceedings of the German Oracle Application Group (DOAG) conference, Fellbach, Germany, 1998.

[139] R. S. R. Kaplan, "One Cost System Isn't Enough," *Harvard Business Review*, vol. 66, pp. 61, 1988.

[140] A. Gunasekaran, Marri,H.B., Yusuf,Y.Y "Application of activity-based costing: some case experiences," *Managerial Auditing Journal*, vol. 14, pp. 286-293, 1999.

[141] J. Emblemsvåg and B. Bras, *Activity-based cost and environmental management : a different approach to ISO 14000 compliance*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[142] M. Steen and T. Steensland, "Real-time profit monitoring and activity-based cost management," *TAPPI Journal*, vol. 77, pp. 105-111, 1994.

[143] MIKON Systems, "Activity Based Costing and Real Time Cost Monitoring, White Paper," January 2003

[144] R. Cooper, "Profit priorities from activity-based costing," *Harvard business review*, vol. 69, pp. 130, 1991.

[145] J. G. V. Miller, T.E. , "The hidden factory," *Harvard business review*, vol. 63, pp. 142, 1985.

[146] A. Boons, "Product costing for complex manufacturing systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 55, pp. 241-255, 1998.

[147] J. A. Brierley, C. J. Cowton, and C. Drury, "A comparison of product costing practices in discrete-part and assembly manufacturing and continuous production process manufacturing," *Engineering costs and production economics*, vol. 100, pp. 314, 2006.

[148] B. Yeager, "Costing software helps Sappi mills make the grade more efficiently," *Pulp and Paper*, vol. 73, pp. 63-66, 1999.

[149] R. K. Yin, *Case study research : design and methods*, 2nd ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 1994.

[150] Y. Zhou and E. Cannell, "Bleached high yield pulp: processes, installations and end uses," *PAPTAC 91st Annual Meeting*, pp. D529-D538, 2005.

[151] G. A. Smook, *Handbook for pulp & paper technologists*, 3rd ed. Vancouver: Angus Wilde Publications, 2002.

[152] M. Janssen, Naliwajka, P. Stuart, P.R., "Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part II: Retrofit process design application," *Submitted to International Journal of Production Economics*, 2008.

[153] R. Leisten, "An LP-aggregation view on aggregationin multi-level production planning," *Annals of Operations Research*, vol. 82, pp. 233-250, 1998.

[154] L. A. Wolsey, *Integer programming*. New York ; Toronto: Wiley, 1998.

[155] R. S. R. Kaplan, Anderson, S. R., "Time-Driven Activity-Based Costing," *Harvard business review*, vol. 82, pp. 131, 2004.

[156] H. Liu, S. Shah, and W. Jiang, "On-line outlier detection and data cleaning," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 1635-1647, 2004.

[157] S. Bellec, T. Jiang, B. Kerr, M. Diamond, and P. Stuart, "On-line processing and steady-state reconciliation of pulp and paper mill process data," *Pulp and Paper Canada*, vol. 108, pp. 36-40, 2007.

[158] 3C Software, "www.3Csoftware.com," 2007.

[159] R. Wirth, Hipp, J., "CRISP-DM: Towards a Standard Process Model for Data Mining," presented at Proceedings of the Fourth International Conference on the Practical Applications of Knowledge Discovery and Data Mining, Manchester, UK, 2000.

[160] C. Apte, "Data Mining: An Industrial Research Perspective," *IEEE computational science & engineering*, vol. 4, pp. 6, 1997.

[161] R. Xu, "Survey of clustering algorithms," *IEEE transactions on neural networks*, vol. 16, pp. 645, 2005.

[162] U. Fayyad, Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P., "From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases," *AI Magazine*, vol. 17, pp. 37-54, 1996.

[163] S. Engell, Märkert, A., Guido, S., Schultz, R., Schulz, C., "Online scheduling of multiproduct batch plants under uncertainty," in *Online optimization of large scale systems*, M. Grötschel, S. O. Krumke, and J. Rambau, Eds. Berlin ; New York: Springer, 2001, pp. xii, 801 p.

ANNEXES

ANNEXE A

Methodology for using real-time process data for cost modeling and supply chain decision support in the pulp and paper industry

By M. Laflamme-Mayer, J. Linkewich and P.R. Stuart

Abstract: With the implementation of mill-wide information management systems, process and cost data have become increasingly available. Careful analysis and use of this data to model critical production processes can be useful for supply chain (SC) optimization. This paper presents a modeling approach which integrates both process and cost information. Operations-driven costing is used to represent how resources are consumed by process activities, and how process activities are related to cost objects. The "bottom-up" methodology is illustrated for the SC optimization of a pulp mill, for different levels of logistical management.

The growth potential for the pulp and paper industry in North America is limited. Industry leaders are faced with the challenge of defining business and technology strategies that will not just help the industry survive, but also prosper in the long run. Some proposed strategies for success include advanced product and process automation, debottlenecking of processes, supply chain optimization, and maintaining high environmental standards [1]. The industry, which must provide consistently good returns to shareholders and invest carefully in business and technology strategies, generally recognizes three main overall business strategies [2]:

1. Survival in commodities,
2. Buy/build in emerging markets,
3. Diversify core business with marketing and technological partners.

In the supply chain management context, the first strategy entails developing tools and systems to optimize the overall supply chain in order to join ranks with the most cost-effective producers. With the second strategy, significant benefits may be achieved by exploiting the potential synergies of a worldwide network of assets using supply chain concepts. The third strategy is related to the maximization of the existing carbon value chain, in order to optimally capture the value of a tree, including bark, lignin and wood fibre for paper, energy, and chemicals [3].

One of the basic and most essential elements for these strategies is to operate efficiently, reduce costs and inventories, and capture the synergy of intra- and inter-company integration and management. This can be achieved using supply chain management (SCM) concepts for the optimization of the enterprise and its supply chain. Supply chain (SC) is defined by Chopra and Meindl [4] as "the complete set of activities, resources and information needed to plan, source, manufacture, store, sell and deliver products to customers", (Fig. 1). Therefore, SCM involves the design, coordination, and management of business units and flows with the aim of maximizing global profitability and competitiveness [5, 6].

Many pulp and paper companies are recognizing the potential for supply chain management, and are beginning to develop and invest in their supply chain. Lail [7] identifies some of the main differences that the pulp and paper manufacturing environment has, as compared to discrete batch/repetitive manufacturers.

Study objective

The goal of this study was to elaborate an operations-driven (or "bottom-up") cost modeling approach which integrates both process and cost information from a pulp and paper mill, and allows representation of process capabilities at the supply chain level for its optimization.

"Bottom-up" approach to supply chain management

For large-scale commodity and capital-intensive process industries like the pulp and paper industry, a tighter integration of operations at the plant level is required in order to fully address the enterprise and supply chain optimization [8]. Process integration, which

M. LAFLAMME-MAYER,
NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration
École Polytechnique de Montréal
Montréal, Canada

J. LINKEWICH,
Tembec Inc.
Témiscaming, Canada

P.R. STUART,
NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration
École Polytechnique de Montréal, Canada
paul.stuart@polymtl.ca

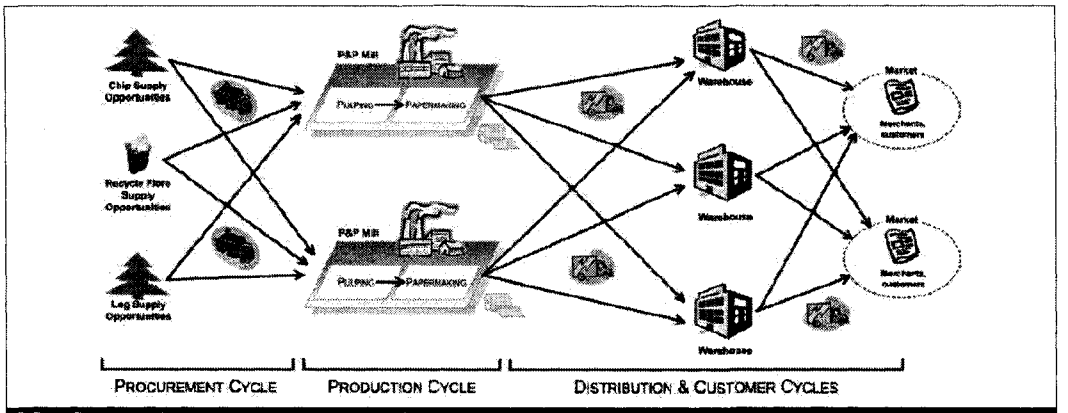


FIG. 1. Conceptual representation of a supply chain.

consists of the application of methodologies and system-oriented approaches for integrated process design and operation analysis, is concerned with the improvement of the decision-making processes across the supply chain. The aim of process integration is not to focus on a process unit, but rather to integrate the process units, plant, site, and enterprise levels for decision making using a holistic and bottom-up approach that includes the use of process data available in real time, knowledge of manufacturing processes, and process integration tools.

Depending on the time horizon and the importance of the decision that has to be taken, many authors have identified three different SC decision levels, namely the strategic, the tactic and the operational, each of which has a significant impact on the success and profitability of the SC. These SC decision levels, combined with the levels of process control hierarchy, are conceptually represented in Fig. 2. The SC levels usually operate over relatively long time scales (e.g., years for strategic SC decisions), whereas process control activities, such as optimization, control, monitoring, and data acquisition, function at shorter time scales (e.g., seconds for regulatory control), with more frequent decisions affecting the process.

In the process industries, and more specifically in pulp and paper, the SC level decisions tend to be decoupled from activities at the lower levels. Ideally, there would be bi-directional communication between levels, with higher levels setting goals for lower levels and the lower levels communicating constraints and performance information to the higher levels. Therefore, the objective of the process integration approach proposed in this study consists of integrating lower level process data (flows, temperatures, pressures, compositions, etc.) and enterprise data (commercial and financial information) in an operations-driven or bottom-up cost model, in order to represent process capability at the higher level for SC decision making.

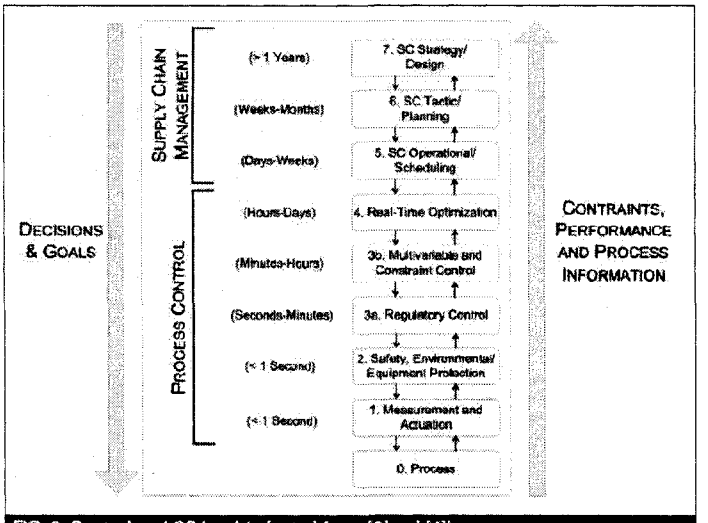


FIG. 2. Control and SC level (adapted from [9]and [4]).

In order to elaborate such a cost model, it is important to consider the three levels of the so-called management paradigm: the managed system, the information system, and the managing system, Fig. 3. The first one, the managed system, refers to the production processes themselves and corresponds to analyses based on information such as process flow diagrams and mass and energy balances. The second level refers to process and accounting data available from the information management systems at the mill. Finally, the managing system refers to the way process operations are managed, and its analysis is based mainly on interviews with the mill engineers and managers.

As illustrated in Fig. 3, the proposed model concept has two important dimensions, namely process and cost. In fact, process and accounting data, generated by the manufacturing processes and the enterprise, are at the basis of the model and are used to analyze process operations and the cost structure at the mill, respectively.

The supply chain, which can be viewed as a number of interrelated systems or business units, can itself be represented as a holistic system having its own rules, i.e. SCM concepts. Using the bottom-up cost modeling approach to represent the SC subsystems, it is possible to incorporate process knowledge within a SC model, so that it can be optimized and used as a decision-support tool, Fig. 4. Therefore, it is possible to ensure consistency across the manufacturing processes, and for large changes in data time scales.

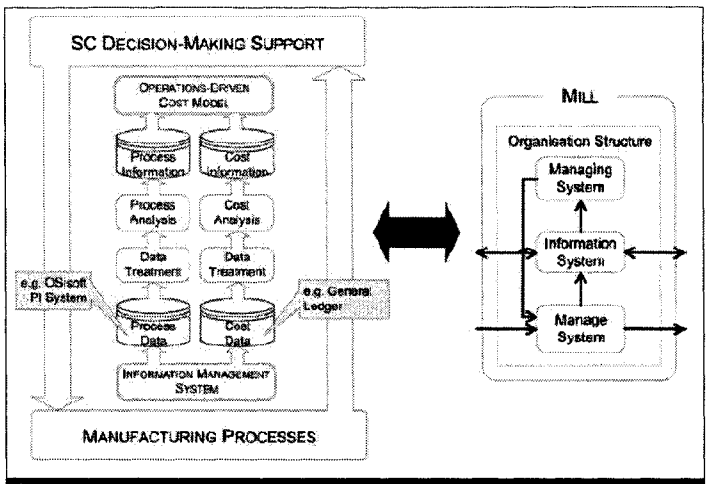


FIG. 3. Bottom-up cost model approach.

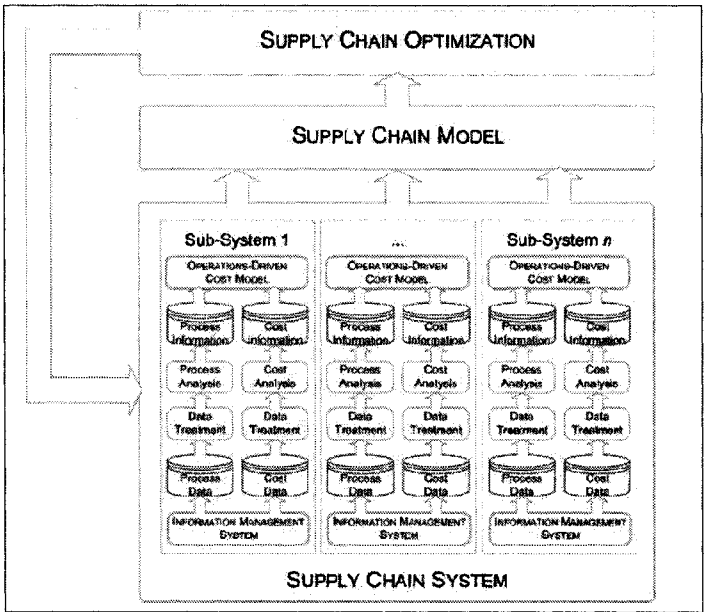


FIG. 4. SC decision support based on the bottom-up approach.

Process Data Available in Real Time

The bottom-up cost model concept, as presented above, requires the acquisition, analysis, and use of significant amounts of data, especially process data. However, the challenges related to the data intensiveness of this approach have been facilitated with the advent of information management systems (IMS). Nowadays, real-time process data has become widely available at mills through the implementation of mill-wide data management systems that acquire, store, and manage data [10]. Although most pulp and paper mills have access to significant amounts of data and information from their IMS, they have not fully exploited the data since no systematic and precise modeling has been done in order to turn these data into knowledge for decision making [11]. The most common benefit from IMS is derived from the *ad hoc* analysis of operations due to increased access to mill-wide data.

Data quality is a critical issue for the bottom-up approach proposed in this study. Therefore, in order to ensure the quality of real-time process data from process data management systems, process data treatment techniques are necessary to ensure the accuracy and precision of measurements. Data processing and reconciliation techniques can be used to correct for various sources of error, including random noise, abnormalities, and inconsistencies, resulting in better quality data for decision making. Furthermore, the systematic application of on-line data processing at near steady-state conditions will enable users to compile data for different process operating regimes, and determine the probability of occurrence of operating parameters [12]. Such information will improve decision support for manufacturing operations management.

Financial Data and Operations-Driven Costing

A cost management system implemented at the mill captures enterprise

and financial data, however, they are rarely integrated systematically with process data. Often, cost management is carried out at an aggregated level and the costs are allocated downward to the detailed level, with data distortion occurring as a result. Costing and data consistency can be improved by the bottom-up calculation of costs, similar to process data aggregation [13]. Activity-based costing (ABC) [14] is a cost accounting method based on the principle that resources are consumed by activities that are part of a process necessary to deliver a particular cost object (service or product). Therefore, it is thus possible to monitor how resources relate to activities, which in turn relate to the cost object. Resource and activity *drivers* respectively determine these relations. In the context of a mill, a similar approach can be used that links resource consumption to production activities at the mill, allowing for the integration of business data and the complexity of the mill operations. Finally, although the consumption of some resources is closely related to the manufacturing operations, other resources are a function of other variables, e.g., the number of changeovers. For this reason, activities are organized following a hierarchy that helps in dealing with the complexity of the mill: unit-level (raw materials, energy), batch-level (changeover, set-up activities), product-level (R&D, marketing), and facility-level (general management activities) [15].

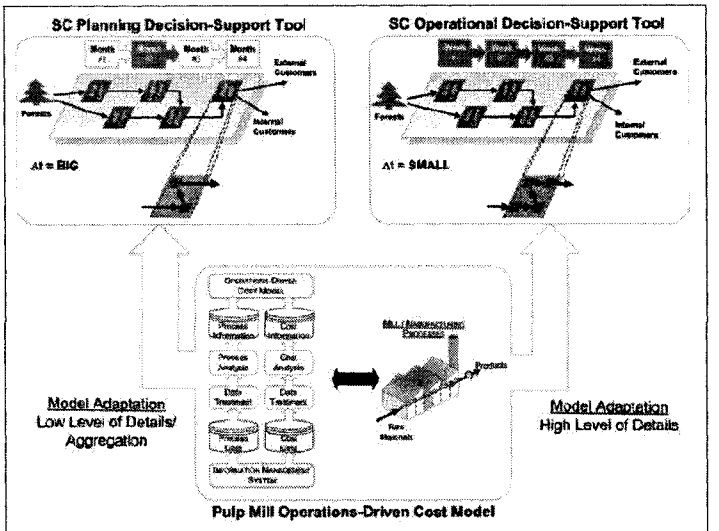


FIG. 5. General approach to SC decision making based on an operations-driven cost model.

Case study: high-yield pulp mill

Background

The case study consists of the fibre procurement and production cycles of a high-yield pulp mill. The procurement cycle corresponds to the planning of fibre supply opportunities in order to ensure the fulfillment of fibre requirements at the mill, chip quality, and minimization of the total delivery cost of raw materials. On a shorter-term basis, it also facilitates the management of the procurement network in order to meet inventory targets at the limited on-site and local storage areas, and to ensure logs and wood chips are transported in the right amount and at the right time to the pulp mill. The production cycle consists of first establishing the requirements for each pulp grade, which are a function of both the targeted stock levels and the market pulp demand, and then determining the most profitable production plan for the mill.

In the case study, the mill being considered produces high-yield pulp from hardwood chips using a bleached chemi-thermomechanical pulping (BCTMP) process involving three main production steps: chemical pretreatment, pressurized refining of fibres, and pulp bleaching. In order to determine the right production plan, three main factors must be considered: inventory level (safety stock, cycle inventory), production costs, and production capability. The production capability refers not only to the throughput of the mill, but also to changeovers between campaigns, the constraints and bottlenecks in the production processes, planned shutdowns for maintenance, unplanned shutdowns due to equipment failure, etc.

Pulp production is a capital-intensive process, and therefore process and capacity utilization is a critical issue. Since material utilization has often been considered to be of secondary importance, large inventories can result. However, due to limited fibre availability, increasing pressure is being placed on fibre procurement activities related to quality, cost, and logistics. There is an opportunity for the optimization of the procurement and production cycles of pulp mills and, given the increasing availability of process information and decision support tools, it is now possible to better represent and reflect the production capability. Although detailed production knowledge should be considered, they introduce additional complexities for the modeling of the supply chain and, depending on the scope of the planning formulation, the resulting models may not be solvable within a reasonable amount of time. For this reason, a bottom-up cost model, describing specific and detailed production processes and operations that reflect the complexities of the manufacturing cycle, will be used as a basis for consistent modeling and optimization between the different levels of logistical management. Depending on the scope of the SC planning question, the mixed integer linear model will incorporate suitable aggregations of inputs from the cost model and, thus, process knowledge included in the SC problem at different aggregation levels will always have a consistent representation, whatever the SC decision level, Fig. 5.

Cost Modeling Methodology

The general steps necessary to build the bottom-up cost model can be divided into the description phase and the investigation phase. As illustrated in Fig. 6, for the first phase, one has to analyse general cost and process information in order to determine which relevant elements should be included in the cost model and, therefore, require a systematic investigation. Then, the systematic investigation involves the acquisition and analysis of detailed process and cost data in order to elaborate the structure of the bottom-up cost model.

Description Phase

The first step of the description phase consists of the development of a holistic understanding of the manufacturing processes of the pulp mill. More specifically, the aim is to determine how process units and activities are linked to the consumption of main resources used in the production process (energy, chemicals, etc.). In order to perform the analysis, three dimensions must be addressed, Fig. 7. First, using available process flow diagrams of the pulp mill, one must determine the process configuration. This mapping step consists mainly of the identification and characterization of machinery used, material flows, and main inputs and outputs of the production processes. Next, it is necessary to determine how the process operates for each grade produced. Usually, recipes available at the mill provide most of the important general information regarding specified production capacity, fibre mix, chemical consumption rate, specific energy of the refiners, consistencies, temperature, quality, etc. Finally, an important step is to capture manufacturing know-how at the pulp mill in order to gain general process knowledge of equipment, production path, and operating conditions. This last step, which consists of discussions with process engineers, superintendents, and the mill manager, allows for the consolidation of general production information concerning both process configuration and operation.

The second step of the description phase consists of the determination and classification of the different resources that have to be considered for the manufacturing of each grade. Using the general ledger, it is possible to differentiate resources and to separate the different aggregated costs that are more related to the enterprise (i.e., general administrative activities sustaining the mill) from those that are related to the production process. Then, within the latter category, one must differentiate further between resources that can be linked directly to the production process (generally using mass and energy balances), and resources related to daily and fixed production costs (e.g., maintenance, supervisory, etc.).

Finally, by examining which resources are linked with costs in the traditional general ledger system and how these resources are linked to the production processes for the production of a specific pulp grade, it is possible to determine the elements that should be considered in the cost model formulation. The production process was subsequently represented by ten cost centres. Eight of these were directly related to the specific activities required to produce different pulp grades: chip pre-treatment process, refiners, screens and cleaners, reject refiner, pulp bleaching, pulp washing and dewatering, dryers and finishing line. The two others, the wastewater treatment process and reboiler, are supporting activities that are closely related to the main process line.

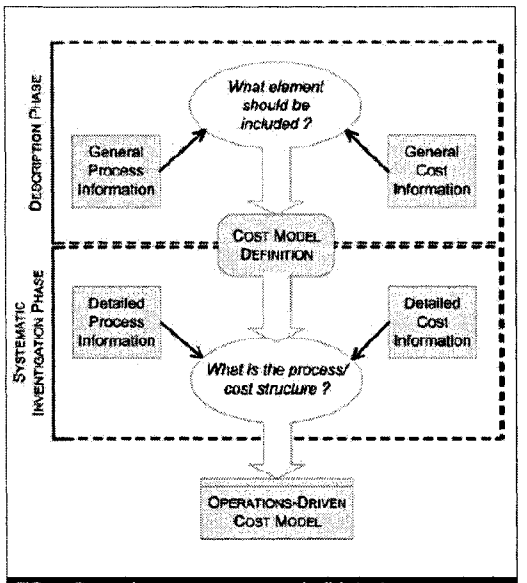


FIG. 6. General steps necessary to build the bottom-up cost model.

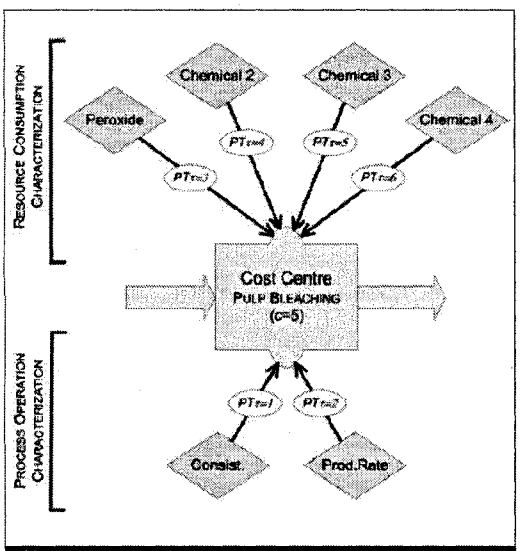


FIG. 7. Important process tags considered for the bleaching process.

TABLE I. Process value matrix for the bleaching process.

	Cost Center - Pulp Bleaching (c=5) Process tags, index τ					
Pulp Grades (index g)	**$PT_{\tau=1}$ (%)**	**$PT_{\tau=2}$ (BDMT/h)**	**$PT_{\tau=3}$ (kg/T)**	**$PT_{\tau=4}$ (kg/T)**	**$PT_{\tau=5}$ (kg/T)**	**$PT_{\tau=6}$ (kg/T)**
A	$PV_{5,A,1}$	$PV_{5,A,2}$	$PV_{5,A,3}$	$PV_{5,A,4}$	$PV_{5,A,5}$	$PV_{5,A,6}$
B	$PV_{5,B,1}$	$PV_{5,B,2}$	$PV_{5,B,3}$	$PV_{5,B,4}$	$PV_{5,B,5}$	$PV_{5,B,6}$
C	$PV_{5,C,1}$	$PV_{5,C,2}$	$PV_{5,C,3}$	$PV_{5,C,4}$	$PV_{5,C,5}$	$PV_{5,C,6}$
D	$PV_{5,D,1}$	$PV_{5,D,2}$	$PV_{5,D,3}$	$PV_{5,D,4}$	$PV_{5,D,5}$	$PV_{5,D,6}$

TABLE II. Unit cost of resources.

Resources (index r)	Unit Costs ($/kg)
Peroxide	$C_{r=1}$
Chemical 2	$C_{r=2}$
Chemical 3	$C_{r=3}$
Chemical 4	$C_{r=4}$

TABLE III. Cost value matrix for the bleaching process.

	Cost Center - Pulp Bleaching (c=5) Resources, index r ($/T)			
Pulp Grades (index g)	**H_2O_2**	**Chemical 2**	**Chemical 3**	**Chemical 4**
A	$CV_{5,A,1}$	$CV_{5,A,2}$	$CV_{5,A,3}$	$CV_{5,A,4}$
B	$CV_{5,B,1}$	$CV_{5,B,2}$	$CV_{5,B,3}$	$CV_{5,B,4}$
C	$CV_{5,C,1}$	$CV_{5,C,2}$	$CV_{5,C,3}$	$CV_{5,C,4}$
D	$CV_{5,D,1}$	$CV_{5,D,2}$	$CV_{5,D,3}$	$CV_{5,D,4}$

Investigation Phase

The objective of the investigation phase is to determine the process capability and the process-based cost of the production process for each grade. The 10 cost centres and their associated activities are systematically analyzed with respect to the different pulp grades produced. As mentioned previously, process capability refers to the detailed description of how the process is operated for each grade (capacity, flow rate, etc.) and the operations-driven costs are calculated based on the detailed description of the resource drivers.

By consulting the different sources of information about the mill's processes (P&ID, DCS, PI ProcessBook), the first step consists of determining the necessary data collection points (commonly called PI tags) among the data available in real-time. As an example, for the cost centre (index c) corresponding to the bleaching process, or c=5, as illustrated in Fig. 7, the important process tags (PT, index τ) with respect to the process capability are the consistency and the production rate ($PT_{\tau=1}$, $PT_{\tau=2}$). In respect to the process-based cost, the important resources to consider at this cost centre are the different chemicals used for bleaching ($PT_{\tau=3}$, $PT_{\tau=4}$, $PT_{\tau=5}$, $PT_{\tau=6}$).

For each chosen process tag τ, the available data are downloaded for a given period (for instance, 3 months) and, knowing the historical production plan, it is possible to classify the data per grade and per production run. Using process knowledge, or more sophisticated data treatment tools like wavelet-based data processing and reconciliation techniques, it is necessary to treat the data in order to improve data quality and to obtain the relevant steady-state periods for each grade. Then, by statistical analysis, it is possible to determine the average process value ($PV_{c,g,\tau}$) for each selected data collection point τ, for each grade produced at the mill (index g). As a result, illustrated by Table I for the bleaching process (c=5), the process value matrix obtained represents a "process snapshot" of the operation in the cost centre, for each of the grades produced.

In order to determine the operations-driven cost, the unit costs of the resources used are determined by first examining the available cost information in the accounting system of the mill. The resource drivers are then selected from the process-value matrix. In the case of the bleaching process, the relevant process values used as resource drivers are $PV_{5,g,\tau}$ $\forall g,\tau \in \{3,4,5,6\}$, (Table I). The costs are then determined by multiplying the corresponding unit costs, C_r in Table II, and resource drivers and this, for each grade produced. This is represented by the following equation, where $TR_{\tau,r}$ is the set of association between process tags and resources (index tr).

$$CV_{5,g,r} = C_r \cdot \sum_{\tau | tr} PV_{5,g,\tau} \; \forall g,r$$

The resulting cost value matrix consists of a "cost snapshot" corresponding to the "process snapshot" of the operation in the cost centre, for each of the grades produced, Table III.

As shown in Fig. 8, each process producing a particular grade is split into different activities performed in the ten cost centres. All of these activities are represented, including the specific supporting activities that are not directly related to pulp production, but are closely linked. This bottom-up approach must be performed for all production activities at the mill. The set of process value matrices is used to characterize the process capability, as well as to determine the resource drivers and a set of corresponding cost value matrices. Together, they represent the production process for each of the grades produced and constitute an important part of the operations-driven cost model. In the cost model schematic, this is represented by the process values ($PV_{c,g,\tau}$) and cost values ($CV_{c,g,r}$) for each activity performed for a specific grade at a particular cost centre.

Finally, the enterprise-based resources, as well as the production-based resources that only have an implicit relation with the production processes, will be considered in a simpler manner. These costs, related to the enterprise and all ten cost centres, influence the profitability of the mill and therefore must be included in the analysis. They can be treated in an aggregated $/h charge that each

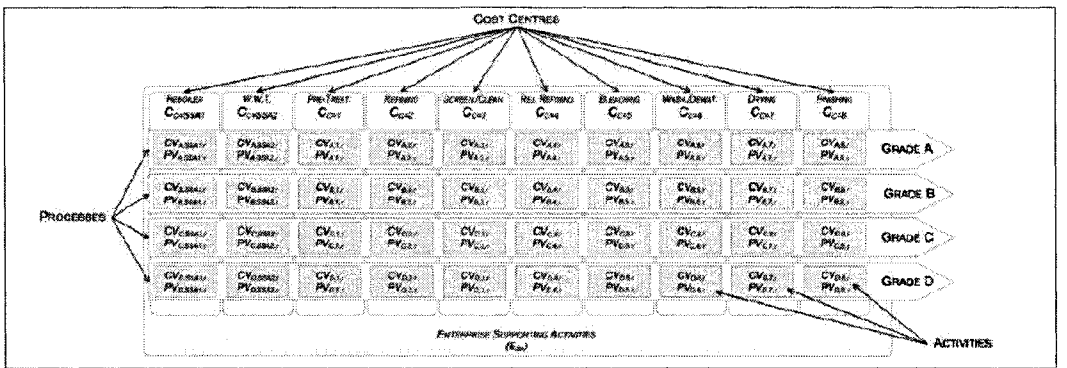


FIG. 8. Operations-driven cost modeling approach including process and cost values for each grade.

grade will incur when being produced. These are represented by $C_{c=SSA1}$, $C_{c=SSA2}$, $C_{c=1}$, ..., $C_{c=8}$ in the case of the production-based resources, and E_{SA} for resources linked to the enterprise supporting activities, Fig. 8.

Special Case of Grade Changeovers

Grade changeovers represent an important element in the operation of the mill. These batch-level activities have important associated costs. Three main elements must be taken into account during a changeover period: a) lost opportunity, b) the fixed hourly cost, and c) the cost of the activities performed to produce the mix grade pulp (or grade waste). The importance and impact of these elements are closely related to the total changeover time (in the two first cases) and the total amount and properties of the mix grade pulp (in the latter case). Therefore, the changeover sequence, i.e., the pulp that was produced and the pulp that will be produced, is very important. Moreover, using available production data and process knowledge at the mill, careful analysis of the changeovers must be carried out as precisely as possible in order to determine the relevant characteristics for each changeover possibility (with respect to the changeover time, mixed resources consumption, mix grade pulp produced, technical feasibility, etc.)

The first element, which relates to the lost opportunity of producing and selling pulp during the changeover time, can easily be taken into account by the SC optimization problem. In fact, this will be represented by sequence-dependent transitions and by taking into account the *effective production window*, which depends on the fixed changeover time (between the pulp produced and the pulp to be produced) and the production flexibility (optimal number of changeovers for a given set of conditions).

The fixed hourly costs (in $/h), which have been established for the production, also need to be taken into account because they are incurred by the cost centres and the enterprise even though a changeover is executed. This places an emphasis on the cost of using "production time" at the mill and on reducing the time required to carry out changeovers. As seen in Fig. 8, these costs are represented by E_{SA}, and C_c and are the same as during normal production time.

The third main element is the cost of the activities performed in the cost centres to produce the mix grade pulp (or grade change waste). The resources drivers are difficult to identify and their value is somewhere between each of the two grades involved (e.g., $PV_{A\rightarrow B,g,\tau}$, $CV_{A\rightarrow B,g,\tau}$). Clearly, process and cost values will depend on the specification and properties of the two types of pulp involved in the changeover. For instance, a changeover between two grades having different wood species will more likely give rise to big process operation changes and a longer changeover time than a changeover between two grades having different brightness specifications (especially if customer specifications can be overlapped).

Finally, using process analysis and the bottom-up approach, it is possible to provide information for each relevant changeover sequence at the mill and to determine both the total changeover fixed charge and process-related costs. Therefore, these batch-level activities can be included in the SC planning formulation.

Implications of the bottom-up approach to SCM

In the pulp and paper industry, with the product price being determined mostly by market conditions, the profitability is strongly influenced by the efficiency of usage of the manufacturing capability and of resources along the entire SC (e.g., raw materials, energy). The bottom-up approach to SCM has the following advantages:

- Compared to more traditional approaches that typically use nominal production rate, the bottom-up cost model framework uses process data available in real-time, allowing a better representation of manufacturing complexity. The treatment and analysis of process data can provide a better characterization of the manufacturing process (constraints, bottlenecks) and therefore a more advanced model for decision-support tools.
- This approach helps to elicit detailed information on operating conditions and resource drivers and, combined with a systematic process-based cost analysis, can provide detailed cost models to determine

transparent production costs for each grade produced.

• The process view, which considers each activity performed for the production of a particular grade, allows the identification of cause-and-effect relationships (resources drivers) between the consumption of resources, the activities performed, and the particular pulp grade produced.

• The bottom-up approach helps to incorporate important batch-level activities within the production planning, such as changeovers, by careful analysis of process information and existing knowledge in order to determine the cost behaviour.

Finally, the bottom-up framework allows for a detailed view of the activities performed at each cost centre, and gives a structured framework providing the required visibility in the supply chain for shorter-term pulp mill scheduling as well as longer-term fibre procurement planning.

Conclusion

In today's challenging business environment, the availability of both process and cost data has given the pulp and paper industry the opportunity to be able to learn from process and cost history, to analyze their manufacturing processes and their supply chain as a whole, and to create added value accordingly. This paper outlines a methodology for the representation of process complexity and capability within the supply chain context which incorporates value from real-time process data. The cost modeling approach highlights the necessity of adopting a multidisciplinary operations-driven (or bottom-up) approach, integrating both process and cost information from a pulp mill. Finally, a deeper analysis of the data available and the use of consistent cost and process models allow for an increased visibility and understanding of the supply chain, and the development of adequate knowledge for shorter-term (pulp mill scheduling) and longer-term (fibre procurement planning) SC decision support.

Acknowledgements

This work was supported by the NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration at École Polytechnique de Montréal.

Literature

1. EBELING, K., Globalisation opportunities for R&D in capital intensive industries. Presentation at the 6CP workshop on internationalisation of R&D, Helsinki (2004).
2. ORZECHOWSKA, A., Saving the Canadian industry: Discussing possible solutions. *Pulp & Paper Canada* 106(1):25-27 (2005).
3. STUART, P. The forest biorefinery: Survival strategy for Canada's pulp and paper sector? *Pulp & Paper Canada* 107(6):13-16 (2006).
4. CHOPRA, S., MEINDL, P. *Supply chain management: strategy, planning, and operation.* 3rd ed., Upper Saddle River, NJ.: Pearson Prentice Hall. xv, 536 p. (2007).
5. STADTLER, H., KILGER, C. *Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software, and case studies.* Berlin; New York: Springer. xiii, 371 (2000).
6. AYERS, J.B. *Making supply chain management work: design, implementation, partnerships, technology, and profits.* Boca Raton, FL: Auerbach Publications. xx, 726 p. (2002).
7. LAIL, P.W. *Supply chain best practices for the pulp and paper industry.* Atlanta, GA: Tappi Press. 205 (2003).
8. GROSSMANN, I.E. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. *Computers & Chemical Engineering* 29(1):29-39 (2004).
9. SEBORG, D.E., EDGAR, T.F., MELLICHAMP, D.A. *Process dynamics and control.* 2nd ed., Hoboken, NJ: Wiley. xv, 713 p. (2004).
10. JANSSEN, M.S., STUART, P.R., Business model framework for using real-time process data for design decision making. Accepted by *Journal of Engineering Design and Innovation* (2007).
11. JANSSEN, M., LAFLAMME-MAYER, M., ZEINOU, M.-H., STUART, P.R., Survey indicates mills' need to exploit IT systems with new business model. *Pulp and Paper* 78(6):46-51 (2004).
12. BELLEC, S., et al., On-line processing and steady-state reconciliation of pulp and paper mill process data. *Pulp & Paper Canada* 108(6):36-40 (2007).
13. STEEN, M., STEENSLAND, T. Real-time profit monitoring and activity-based cost management. *TAPPI Journal* 77(2):105-111 (1994).
14. KAPLAN, R.S., COOPER, R. *Cost & effect: using integrated cost systems to drive profitability and performance.* Boston: Harvard Business School Press. xi, 357 p. (1998).
15. FOGELHOLM, J. Economic steering on different hierarchical levels in paper mills. *Paper Technology* 43(4):51-54 (2002).

Résumé: [illegible]

Reference: LAFLAMME-MAYER, M., LINKEWICH, J., STUART, P.R. Methodology for using real-time process data for cost modeling and supply chain decision support in the pulp and paper industry. Pulp & Paper Canada XXX(X):TXX-XXX (date of magazine). Paper presented at the 91st Annual Meeting in Montreal, QC, Canada, February 7-10, 2005. Not to be reproduced without permission of PAPTAC. Manuscript received on January 3, 2005. Revised manuscript approved for publication by the Review Panel on January 14, 2008.

Keywords: INFORMATION SYSTEMS, PULP MILLS, SUPPLY CHAIN, OPERATIONS-DRIVEN COST MODELING.

ANNEXE B

DEVELOPMENT OF AN OPERATIONS-DRIVEN COST MODEL FOR CONTINUOUS PROCESSES

PART I: Framework for Design and Operations Decision Making

Martin Laflamme-Mayer[a], Matty Janssen[a], Paul Naliwajka[b], Paul Stuart[a*]

[a] NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration,

Department of Chemical Engineering, École Polytechnique de Montréal,

Montréal, Québec H3C 3A7 Canada

[b] 3C Software Inc., Atlanta, Geogia 30339 USA

Abstract

Given the implementation of information systems, it is now possible to more accurately represent and reflect continuous production processes for process design and operations. This paper presents a systematic methodology, established by collaboration between engineers and accountants, for developing a versatile tool to represent and understand the costs of complex production environments such as pulp and paper mills. The integration of process and cost information, contained in a "bottom-up" calculation engine, and the process-based aggregation of costs allow for easier modeling of complex cost relationships, by identifying how resources are consumed by activities and how activities are related to cost objects. Case studies for the application of the operations-driven cost modeling for retrofit process design and process operations management are presented in *Part II* and *Part III*.

Keywords

OPERATIONS-DRIVEN COST MODELING, RETROFIT PROCESS DESIGN, PROCESS OPERATIONS MANAGEMENT, DECISION SUPPORT, PULP AND PAPER

* To whom all correspondence should be addressed. Contact: Tel.: +1 514-3404711 x3484; Fax: +1 514-340-5150; Email: paul.stuart@polymtl.ca

Introduction

As a consequence of the challenging business environment, Canadian pulp and paper companies have the difficult task of defining new business strategies to improve their competitive position over the longer term [20]. These strategies consist of increasing profitability either through the improvement of operational practices or by capital projects. Many pulp and paper companies recognize supply chain management (SCM) as one of the most promising solutions to preserve industry value, and to be better able to compete with global cost-effective producers on local and international markets [4]. In the case of capital spending projects, selection of the most profitable strategies for the modification of current manufacturing processes (retrofit design) is a critical challenge that must be addressed by the industry in order to adapt to the changing business environment and/or benefit from new opportunities during a prolonged period of limited capital expenditures.

The implementation of mill-wide data acquisition systems in the pulp and paper industry has opened the door to vast amounts of data from which information about processes and products can be extracted. Although this has enhanced *ad hoc* problem solving in mills [8; 9] and plays an important role in providing information to decision makers, a structured framework for advanced operations and design decision making support is needed in order to better exploit these data. As discussed by Lail [18], creating added value by systematically looking at the "obvious" – processes, knowledge and data available at the mill – is the key for successful supply chain projects and, we think, also for process design.

Even though many initiatives have been undertaken by process engineers, accountants, and information managers at mills, there is an important need for the development of best practices to help mills better use data for decision making. This paper presents an operations-driven cost model, established through collaboration between engineers and accountants, that integrates data across disciplines and mill areas, and considers cost accounting subtleties that can help mills to turn data into information aiding the decision making process. This paper first discusses the importance of the process perspective for cost management in continuous-process manufacturing. The bottom-up approach proposed by this work is described, followed by details of the operations-driven cost model. The model structure and data quality issues are discussed, as well as the potential for using this approach to add value to mill operations.

Cost Management in Continuous Process Manufacturing

It is essential to distinguish between accounting approaches often used at mills, and management-based accounting approaches such as the one presented in this paper. At mills, financial accounting can typically be characterized by the focus on external reporting (e.g. for shareholders) and on consistent representation of manufacturing costs over time. In the case of management accounting, the emphasis is to allow the analysis of historical cost data providing useful and relevant information for decision making, planning, control and performance evaluation [7]. It also recognizes the need to integrate cost information with production knowledge for more in-depth analysis and interpretation of the data.

Continuous process manufacturing has specific characteristics that have been identified and discussed by various authors (for the process industry in general [3; 21] and specifically for the pulp and paper industry [5; 17]). The direct application of cost management tools to the pulp and paper industry that have been

primarily developed in the context of discrete-part manufacturing can be challenging and may not provide the expected benefits when applied to continuous manufacturing. It is critical to understand the specific manufacturing needs of a given process in order to develop management-based accounting tools adapted to a particular manufacturing environment.

As discussed by Reeve [17; 21], effective cost management systems for continuous process manufacturing must consider both the product and process perspectives. He recognizes the importance of process-related activities that often cannot be easily related to product strategy for the analysis and explanation of cost generation in mills. This is an essential distinction to make since, in most cost management approaches developed for discrete-part manufacturing, the product is considered to be the primary cause of activity generation within the plant. To better understand cost behaviour in pulp and paper mills, it is necessary to take into account the perspectives described as follows.

Product Perspective

In pulp and paper, similar to many continuous manufacturing processes, we can distinguish between two main types of operations: main processing operations (e.g. pulping and papermaking) and converting and finishing operations (sheeting, packaging, etc.) [14]. For discrete manufacturing, cost driver relationships within the plant are typically well explained using a product perspective. On the other hand, in pulp and paper, product-related activities are more useful to describe the cost behaviour of operations that are downstream of the main processing operations, where large product diversity is created. In fact, from the converting and finishing operations to the customers, a product perspective is adequate in order to evaluate the effect on cost of product specifications (trim, core, wrapping, labelling, etc.), channels (next-day delivery, direct shipment, shipment to distribution center) and customers (vendor-managed inventory, special contractual arrangements, etc). This is also the main reason why Reeve [21] suggested that, for continuous manufacturing, the implementation of traditional activity-based costing concepts should focus on the "demand side" of the supply chain.

Process Perspective

Particularly for main processing operations, it is often more relevant to consider the process perspective in order to be able to explain cost generation. Nevertheless, the process and product perspectives are not mutually exclusive and both perspectives may be required to explain some cost items, e.g. although transition costs are sequence-dependent - product perspective, batch-level – the explanation of the costs incurred requires an in-depth process analysis using a process perspective.

Production Process – A large part of indirect manufacturing costs at mills are caused by activities such as maintenance, that are more related to the production process itself than the product manufactured. Since these cost items are normally allocated to products, it does not provide any useful insight for cost management and continuous improvement [21]. Instead, cost driver relationships should be identified based on the analysis of process-related aspects such as maintenance and operating policies. In addition, the production process perspective is also necessary to understand how process activities generate cost within the main processing operations. It provides key information about the configuration of the process, the important flows, the type of processes involved (mixing, heating, reaction, etc.) and other relevant qualitative and quantitative inputs that may be required to characterize the structure of the manufacturing process.

Operating Conditions – In discrete manufacturing, it is relatively easy to calculate direct manufacturing costs because it is usually possible to measure the level of activity and resource consumption for each particular unit, and also because these activities can be traced to the final product (via routing and bill-of-material). In continuous processing, operating conditions at each step of the process are responsible for resource consumption. Even though they can often be measured with some precision, it is often not feasible to keep track of the resources used with the principal flow of material. Thus, for simplicity, product homogeneity is typically assumed [12] and the costs are calculated based on standard recipes. These specify raw material usage (additives, chips, energy, etc.) as well as target operating conditions for producing the final product within the required specifications. The resulting cost information does not correspond to reality, and variance analysis only provides aggregated information that fails to give the required visibility for decision making. Given the variations within the manufacturing process, the real operating conditions are not fixed to the standard levels and should be used to analyze direct manufacturing costs. Contrary to discrete-part manufacturers, the development of a cost management framework for continuous processes should emphasize the use of process variables to characterize cost generation within the plant [21], particularly for the main processing operations.

While it may seem natural for process engineers to consider these aspects, they are generally not understood or recognized in the cost management literature, and have not yet been commonly applied in cost systems that are implemented in the pulp and paper industry.

The development of new costing models in the 1990s focused on overheads and business processes, and little attention was paid to primary activities in complex manufacturing environments. Thus, simplified approaches are used for the treatment of direct manufacturing costs and operational activities [2]. For the pulp and paper industry, this treatment is a critical issue since direct manufacturing costs are charged to the product based on a more or less systematic approximation of the process conditions and process-related activities in the mill. Similar to the discussion on overheads that led to the development of activity-based costing in "The hidden factory" [19], the pulp and paper industry uses methods (e.g. standard costing) to relate direct manufacturing costs to product, but these methods do not always provide a useful explanation about how costs are really generated within the main processing operations. Technological challenges as well as the lack of guidelines and systematic methods have constrained the industry from addressing this data-intensive challenge. However nowadays with the advent of information management systems (IMS), this challenge has become less restrictive. Using systems-oriented and multidisciplinary approaches, it is now possible to analyse process and cost data in an integrated manner in order to better understand the main processing operations. This would not only provide an improved basis for cost management, but would also help with the application of higher-level decision support tools such as supply chain optimization or multi-criteria decision-making for retrofit process design.

Objective

The primary goal of this study was to develop a framework for creating an operations-driven cost model that integrates process and cost information in order to characterize the manufacturing costs of the processing operations in pulp and paper mills. Specifically, the three following requirements were considered for the elaboration of the cost model:

1. It should emphasize a bottom-up thinking where, rather than providing aggregated cost information, the information coming from the process can be systematically integrated to better reflect the capability of the main processing operations.

2. Given their importance in pulp and paper mills, the approach should also include a structural element to incorporate overhead costs within the model.

3. The framework should not be problem-specific. An approach should be used in order to represent various processes in order to provide a general framework for process operations and process design decision making.

More generally, the aim of this work was to discuss how process systems engineering tools, which emphasize visibility of information and structural flexibility, can help to manage, analyze, and interpret information to support decision making for process design and operation.

"Bottom-up" Approach

The operations-driven business modeling approach [9; 11; 16], schematically represented in Figure 1, is based on "bottom-up" thinking, consisting of using lower-level process data and detailed process analysis to better reflect manufacturing capability for higher-level decision-making. Therefore, the overall approach aims first to characterize the manufacturing operations (descriptive) and second, at providing advanced decision support (prescriptive). To achieve these goals, four main steps are considered: data acquisition, systematic analysis, process and cost modeling, and decision-support modeling. Process and cost data, typically provided by information management systems at mills, may come from various sources such as process simulations, general ledgers, etc. Many tools and approaches can be used to collect, treat and analyze these data, in order to extract the necessary and relevant information for decision making. The operations-driven cost model is the central element where cost and process information are captured and systematically integrated to characterize the continuous processes. Due to its structure, the cost model can be used to support either design or operational decision processes. For example, in the case of operations, it can be used to support supply chain optimization whereas in retrofit design, it can be used to support a multi-criteria decision making process for evaluating different design options.

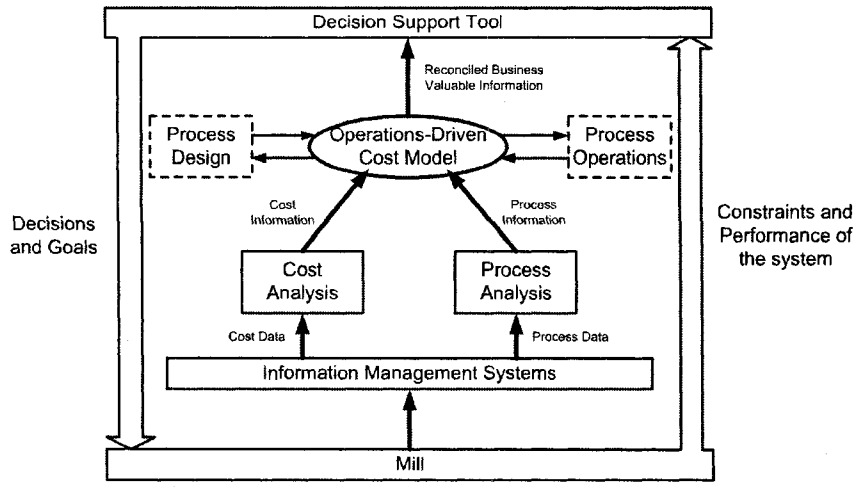


Figure 1: Overview of the operations-driven business modeling approach

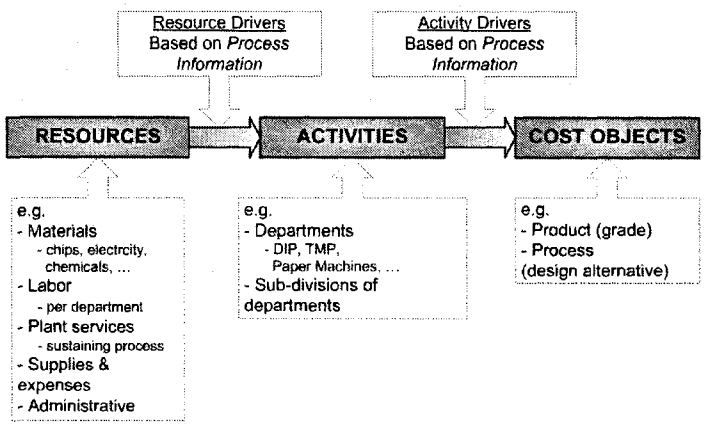


Figure 2: Relationship between resources, activities, and objects in ABC

Operations-Driven Cost Model

Process and cost information must be integrated and linked to the manufacturing processes at the mill and ultimately, the cost object. The *cost object* is defined by the functional unit for which the cost is measured. It can be an activity, a product, a process, a service, a division, etc. Activity-Based Costing (ABC) is now a well-known method that was developed for modern manufacturing environments with the goal of demystifying overhead costs that were traditionally assigned to cost objects using inappropriate allocation bases [6]. The principle of ABC consists of modeling the usage of resources by activities performed, as well as the activities required by the cost object. Although this approach traces overhead costs to activities, the relationships used in ABC-based cost systems to link primary resources (direct manufacturing costs) to cost objects are often too simplistic (e.g. direct charges) and are

inappropriate for consideration in continuous process environments. Nevertheless, the ABC approach provides important extensions [13] to traditional costing systems, that are particularly relevant for the elaboration of an operations-driven cost model in pulp and paper:

- Use of activities and processes as the focus of cost systems,
- Tracing the cost of using the resources,
- Using a richer set of cost drivers (based on observable measures) to reflect operational complexity.

By using "bottom-up" process and cost information, resource and process activity drivers can be identified and mill-wide correlations can be reflected to characterize cost generation within the mill's main processing operations (Figure 2). Therefore, the operations-driven cost model is based on "ABC-like" principles that incorporate and emphasize the importance of the process perspective as a source of costs, which allows production managers to better track and control their costs. As mentioned earlier, cost modeling of continuous processes needs to consider both the design of the manufacturing processes and the specific operating conditions used to manufacture different products. In this context, the following elements must be introduced in the cost model:

1. The *Cost Center* corresponds to a collection of physical process units that represent part of the manufacturing process. The routing of these cost centers, and the specification of the equipment used, is defined by the process design. The level of aggregation of the various cost centers has to be determined with respect to the type of decision that is to be made using the overall business model approach.

2. *Process Activities* refer to the operating conditions at each of the *cost centers*, e.g. running a pump or a heat exchanger, drying pulp or paper, etc. They are characterized by *process information* resulting from a systematic bottom-up analysis approach, e.g. flow rate, consistency, temperature, and pressure, or other physically measurable process variables.

Within the operations-driven cost model, *cost centers* and *process activities* are considered together in an element called the *Process Work Center (PWC)*. As shown in Figure 3, a mill is represented by a group of *PWCs* that are arranged in series and/or in parallel. An *Overhead Work Center* is also introduced for modeling production overheads and non-manufacturing costs because they must be treated differently from a computational standpoint. When the cost model is calculated, the costs flow between the *PWCs* as defined in the model, and accumulate in the *Overall Cost Object*. This final *cost object* can for instance be the product cost for different operating conditions of a given design or for process design alternatives.

The operations-driven cost model in this study was developed using the Impact:ECS™ software package from 3C Software Inc. [1]. This tool is particularly well adapted to the needs of complex production process environments, such as those in the pulp and paper industry, and it has been adopted by several leading pulp and paper companies. Its underlying platform, based on a relational database, allows for an efficient structure and management of process and cost information flows within the model. Moreover, the flexibility of Impact:ECS™ provides the ability to customize the storage of data, the calculation execution order, and the structure of the model [22; 23].

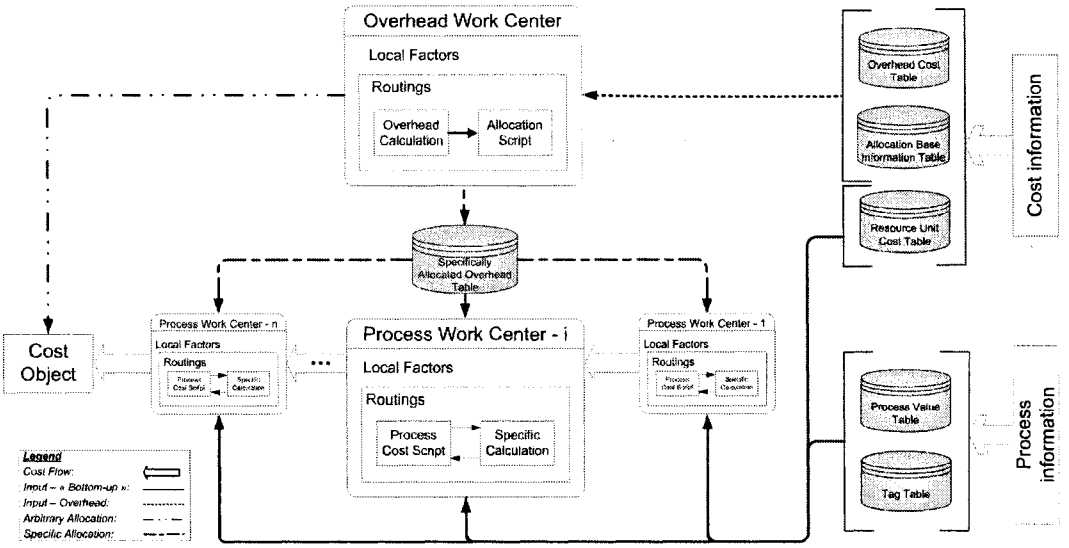


Figure 3: Representation of how *Work Centers* are structured within the operations-driven cost model

Process Work Center

One of the key elements of the cost model is the structure used to represent main processing operations at the mill. A generic framework was developed that permits the *PWC* to accommodate the cost flow along the process, the bottom-up feeding of process information, the need for flexible specific calculations, the assignment of overheads, and a standard process-based cost calculation. This structure consists of two main sections, i.e., the local factors and the routings (see Figure 4). Local factors are units of information that are specific to or characteristic of a *PWC*, and can be accessed only by operations called for in the *PWC* in which they reside. They can be classified into three groups: *Work Center Characterization, Specific Information, and Reporting.*

- Within the first group, local factors permit the introduction of general information needed to define a particular *PWC* e.g. the name, the reference flow as well as the overall product reference flow. Different scenarios can also be considered using binary parameters.
- The role of the second group is to allow the user to interact with the inputs of the specific calculations (to be further discussed later).
- The third group of local factors is used to report information. It provides quick access to the main results and important outputs when the calculation is done.

The *PWC* structure has multiple routings that define a step-by-step approach to the functions that have to be performed during cost calculations (Figure 4). This ensures a structured flow and logical treatment of information throughout the model. The first routing, *Cost Flow In*, establishes the calculation order by enforcing the precedent *PWCs* to compile before. It also pulls the previously calculated cost information within the current *PWC*. The second routing, *Process Information*, loads and stores the information

coming from the *Process Value Table* that contains all "bottom-up" data that are used to characterize the particular activities that are accomplished in the *PWC*. It is also possible to add or modify process information in order to perform a sensitivity analysis. The main routing, *Cost Calculation*, dictates how the process, overhead, and cost information are structured and how the *PWC* is calculated. It consists of four sections: *Initialization, Specific Calculation, Process Cost*, and *Overhead Assignment* (see Figure 4). Except for specific calculations, the three sections are generic, regardless of the *PWC*. The fourth and the fifth routing, *Resources* and *Current Contribution*, are used mainly for reporting purposes.

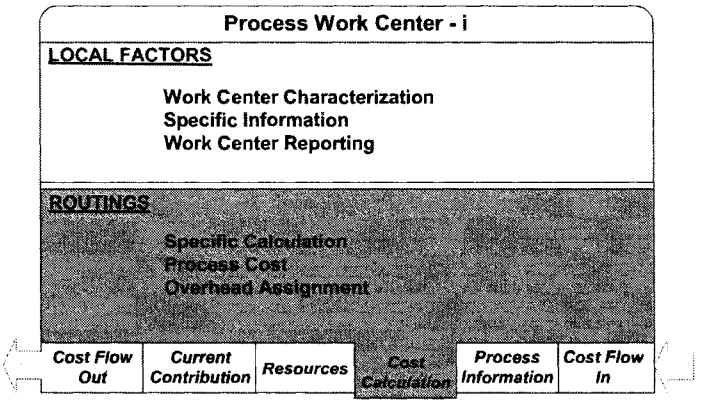


Figure 4: Representation of a Process Work Center within the cost model

Resources displays the results for each step of the cost calculation, in an ABC-like fashion where the relations between resource consumption, activities performed, and the *cost object* are shown. *Current Contribution* aggregates all the cost information obtained from the previous and the current *PWCs*. This aggregated information is then available for the routing *Cost Flow Out* and also for the local factors (under *Reporting*). Finally, *Cost Flow Out* takes the aggregated cost information and makes it available for other subsequent *PWCs* in the model.

Cost calculation routing

Process cost

Process cost, which is at the heart of the *PWC*, performs the generic cost calculation using the ABC-like approach discussed earlier. This is used to establish engineering-based relationships using mass and energy balances, for resource consumption within the mill. Given specified local factors (e.g. tags to consider), and since the appropriate cost drivers come from "bottom-up" approach (*Process Value Table*, based on process information), both the production process and the operating conditions are systematically considered for cost calculations. Figure 5 illustrates the structure and how the information is managed within the *Process Cost script* that integrates five important elements: the local factors, two routings of the *PWC (Process Information,* and *Process Cost),* the *Tag Table* and the *Resource Cost Table*. More precisely, the script consists of the following steps:

A. Information characterizing the current *PWC* is extracted from local factors.

B. Using this information, the script can search within the *Process Value Table* and *the Process Information* routing for process information linked to resources and reference flows relevant for the calculations.

C. After obtaining the process information, the particular type of resources associated with each element classified as a resource needs to be identified. The tag identification number of the element is used to acquire the resource identification number from the *Tag Table*.

D. Given the type of resource, it is then possible to obtain, from the *Resource Cost Table*, the unit costs for each of the resources considered.

E. When all the relevant information has been gathered, costs are calculated within the script using an ABC-like structure that uses a combination of drivers to relate the resource consumption to the final cost object. First, the unit costs are multiplied by the resource driver that determines the consumption rate of a particular resource for a given reference flow, which is most closely related to the resource (e.g. *x* kg of chemical per BDMT of chip). Then, using an appropriate combination of reference flows, the consumption of the resource is linked to the *PWC*. It provides the cost of the resource consumed given the *PWC* driver (i.e. reference flow). Finally, using the ratio of the *PWC* driver to the overall product driver (i.e. reference flow), the costs are attached to the final cost object.

F. The results of the different steps for the *Process Cost Script* are displayed within the *Reporting* section of the local factors and stored in the *Resource* routing.

Overhead Assignment

Some overhead items can be assigned to each of the *PWCs* based on specific rules. Thus, the main purpose of this script is to integrate information needed to provide the required visibility of the portion of the overhead that can be traced to the production process. Since there is no overhead calculation done locally in the *PWCs*, *Overhead Assignment* extracts and integrates the particular cost information that has been treated by the *OWC*.

Specific Calculations

The aim of the operations-driven calculation engine is to be as generic as possible in order to be applicable to any type of process. At the same time, every manufacturing process is unique. The cost model structure needs to have enough flexibility in order to be able to address such specific calculation requirements. In fact, the underlying process structure is always valid, but in some situations, it is necessary to perform preliminary "side-bar" calculations to fit the standard structure. An example of a specific calculation is to transform the units of a flow rate from l/min to kg/min, or to calculate the mass flow rate in BDMT/h using the flow rate in l/min and the consistency of the flow. In any case, it is preferable to use the Impact:ECS™ preformatted user-friendly calculator that allows for easy build-up of

a series of simple commands that need to be performed. Using this approach, it is very convenient for users to view, understand, and modify calculations.

Illustrative example

The operating cost of a reject refiner is calculated using the operations-driven cost modeling approach (see Figure 5). First, relevant process information is gathered for the *PWC* "pulp cleaning". The values gathered at five data acquisition points (so-called "tags") are the results of a process data analysis. This process information is then stored and classified in the *Process Value Table* using a systematic method based on a traditional process unit representation. Every entry within this table specifies the attached *PWC*, the tag identification number, the process value itself, and the units. For each element within the table, we also differentiate between a resource, a process activity driver a *PWC* driver, or a product driver (see the description of tags in Figure 5). Two specific calculations are done to determine the mass flow rate to the reject refiner. Then, using the information from the *Process Value, Tag* and *Resource Unit Cost* tables and the specific calculations, the *Process Cost* script (as described earlier) calculates the cost in $/BDMT for the reject refiner under the given process conditions. The resulting cost information is reported in the local factors and added to the cumulated pulp cleaning cost.

Overheads Work Center

The *Overheads Work Center (OWC)* is included to estimate the mill burden, or indirect manufacturing and non-manufacturing costs, within the cost model. The structure developed for the OWC (see Figure 6) is significantly different from the *PWC*. Although local factors have a similar function, the main differences reside in the structure and utilization of routings. The *Overhead Cost* routing is the principal component of the structure. It is used to manage overhead-related information as well as to structure the calculations. First, the accounting period associated with the overheads is set. Then *General OH Calculation* determines an hourly rate for each overhead item as well as the general aggregated overhead cost for each category defined in the accounting system of the mill. Using the allocation base information available, each item considered is classified into either one of two groups: items that can be specifically allocated, using precise information on how resources are used, to a *PWC* (e.g. supplies, maintenance, labour, etc.) and items that are arbitrarily allocated to the final cost object (e.g. insurance, administration).

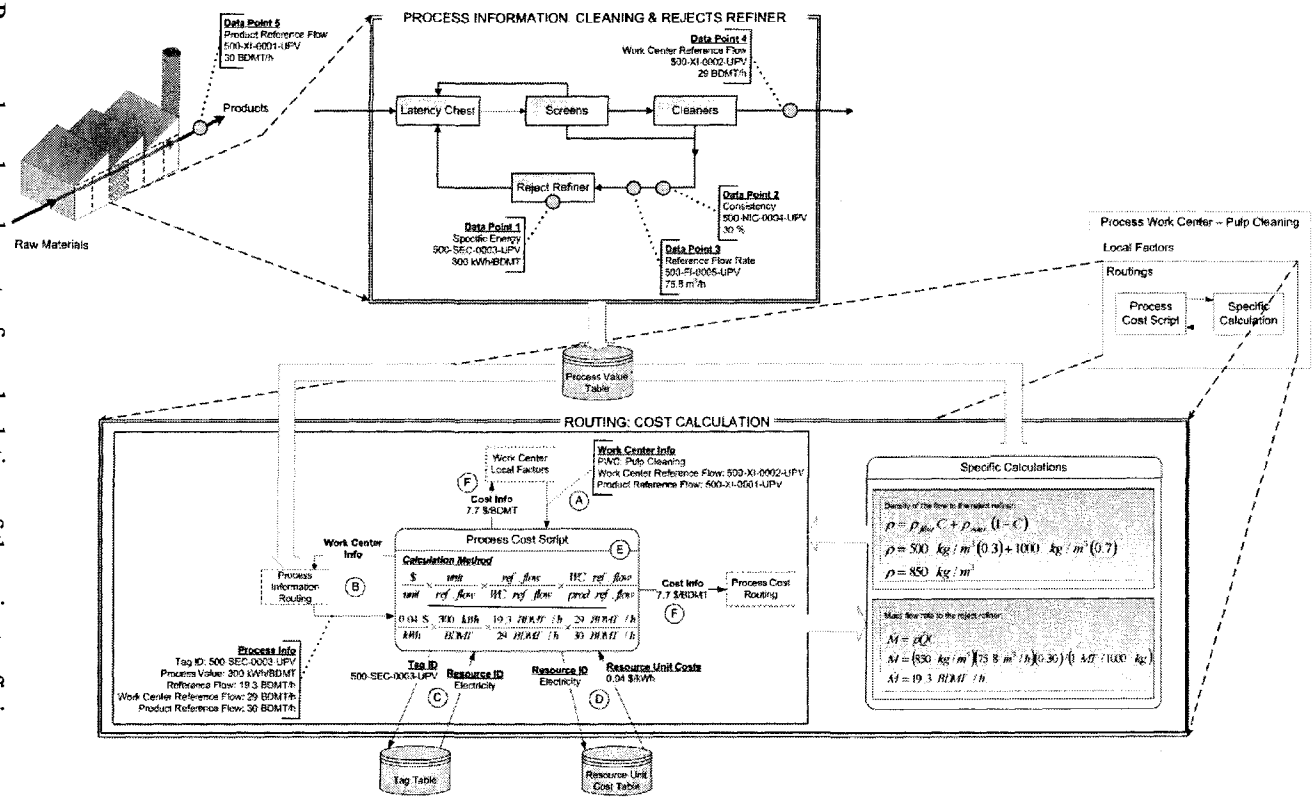


Figure 5: Process-based work center for calculation of the reject refining operating cost

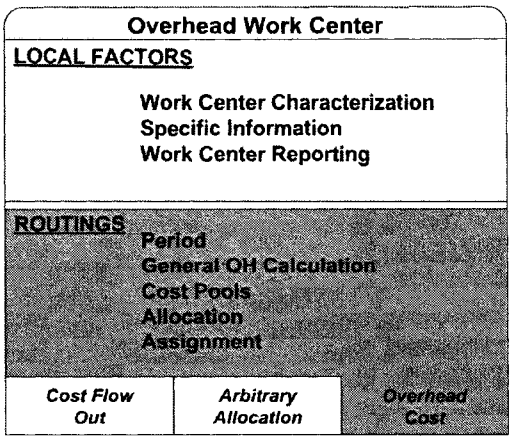


Figure 6: Representation of the *Overheads Work Center* (*OWC*) within the cost model

Cost Pools aggregate the cost items of the first group that have the same allocation base and, within *Allocation*, distributes them among the *PWCs*, depending on their share of this allocation base. *Assignment* loads the results in the *Overhead Table* described earlier, which is called by the *PWCs*. Finally, the *Arbitrary Allocation* routing is responsible for the aggregation of the costs of all items that have to be allocated to the final cost object. This information is then transferred directly to the cost object using *Cost Flow Out.*

Examples of Application Results

In this section, we present examples of results obtained by the application of the operations-driven cost modeling approach in the context of both process design and operations. These results are only briefly described and the authors refer respectively to *Parts II* and *III* for a more detailed description.

Process Operations

The aim of the cost model development is to characterize the direct manufacturing grade costs of a BCTMP pulp mill in order to support a bottom-up supply chain planning approach where manufacturing capability is determined using lower-level process data. Given the supply chain perspective, a relatively high-level model was developed by primarily considering the main manufacturing activities i.e. the pulping process. Seven PWCs were used to describe the operations and 30 tags were selected from the process data historian at the mill to characterize the cost model drivers (resources and activities). The corresponding process data, for a period of three months, were treated and stored in a relational database and integrated with other relevant mill information (e.g. production schedules). The analysis of the data, accomplished using queries, statistics and visualisation tools, allows for the identification of resource consumption patterns that are different compared to the standard recipes. The data describing these patterns, or so-called process information, are used as inputs to populate the different parameters of the cost model. Figure 7 shows the direct manufacturing costs calculated using the operations-driven approach, for each production campaign of a given pulp grade. Since fibre supply is an important supply chain decision variable, the cost of fibre is not taken into account within this model but rather, this cost is optimized within the supply chain problem. As shown, the results of the operations-driven cost model

provides an interesting perspective compared to standard and actual costing approaches. Since cost drivers are calculated using historical process data and consumption patterns may have some similarities with recipes, the operations-driven approach is considered as being in between the standard and actual costing approach. Nevertheless, the real advantage of the proposed approach is the use of available process data with an ABC-like approach to identify, analyse and interpret the cost implications of various consumption patterns within the mill. This is much more consistent with managerial accounting and should be used as a basis for performance assessment and continuous cost improvement at the mill. For continuous processes, such as a pulp mill, it is essential to consider the process perspective and the operations-driven approach, using process and mill data, is the key to better understand the generation of costs within the mill and to provide the required visibility of the cost performance of the manufacturing operations for supply chain planning.

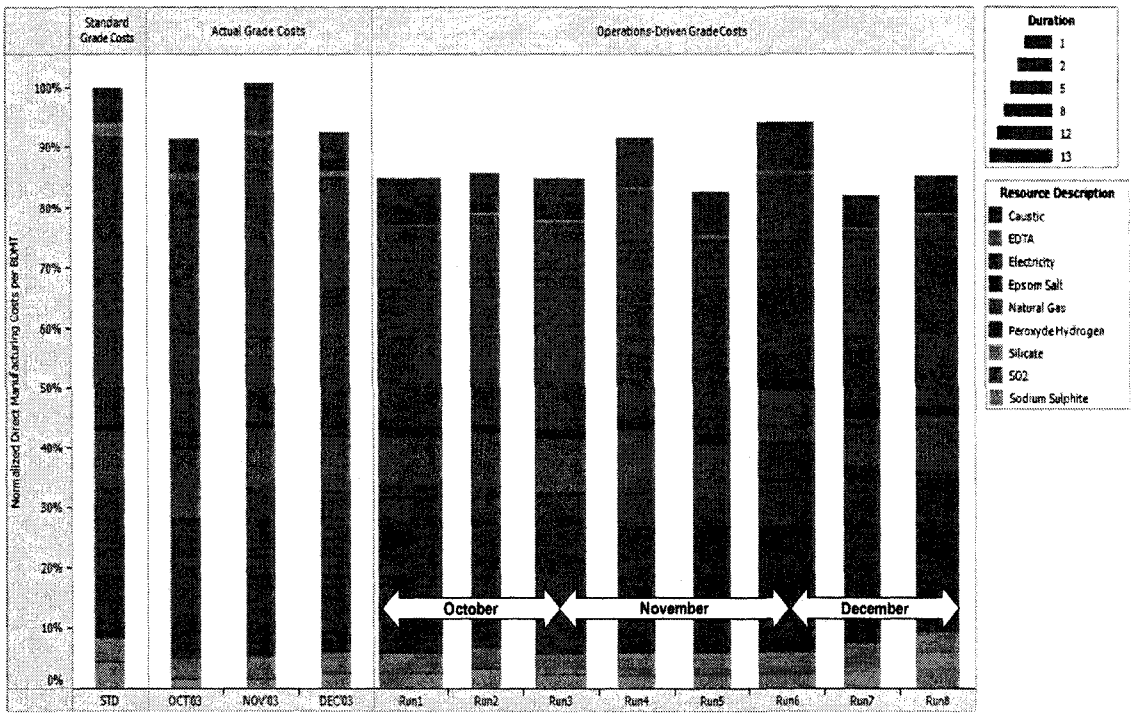


Figure 7: Application for operations: grade cost analysis for a BCTMP pulp mill

Retrofit Design

In this case, the operations-driven approach is applied in the context of a large-scale retrofit design problem. The aim is to better quantify cost implications of several retrofit design alternatives for increased deinked pulp production and cogeneration at an integrated newsprint mill. For each design alternatives the capital costs and mass and energy balances were calculated. These data were used by the operations-driven cost model that was developed to evaluate the operating costs and profitability of the alternatives. Figure 8 presents the direct and indirect manufacturing costs obtained for the existing mill

and each alternative considered. The colors represent the various *PWCs* considered for the analysis and the negative costs indicate either an income (e.g. cogenerated electricity sales) or a transfer (e.g. overhead outside the mill). One of the main advantages of using the operations-driven approach for retrofit design is the efficient and transparent evaluation of manufacturing costs based on a systematic description of the consumption of the resources by the *PWCs*. For example, in Figure 8, the higher manufacturing cost for the paper mill *PWC* can be traced back, using process information, to higher steam prices and thus, increased use of natural gas (as opposed to wood waste). The variation of overheads per alternatives, that is small compare to direct costs, are caused by a number of factors such as differences in maintenance material, tax credit, etc. This indicates that, even though overheads should be taken into account within the overall design process, it may not be an important factor to differentiate between the proposed alternatives. Finally, compared to traditional techno-economic studies, the operations-driven approach is better able to examine critical design variables and operating variants. Important *PWCs* can be identified and the changes in cost per activity in the *PWCs* can be assessed efficiently.

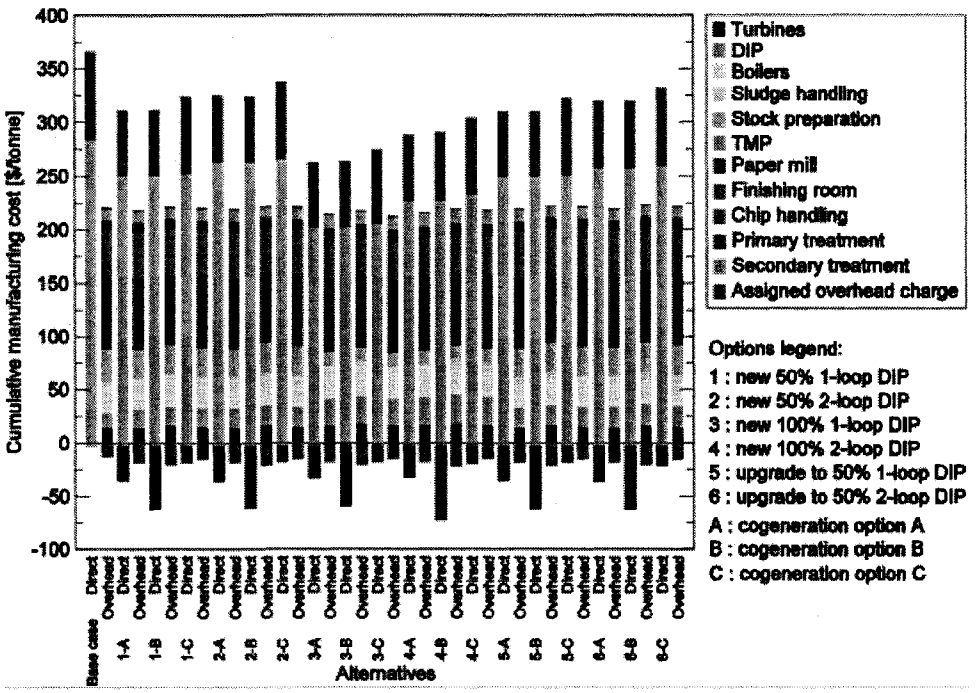


Figure 8 : Application for retrofit process design: manufacturing cost per design alternatives

Data Quality and Model Structure

In order to construct the cost model, different sources and types of information must be considered. The relevance of any individual data stream, for the decision making process, tends to fall within the realm of judgement. Even though companies recognize the importance of system integration, data often comes from a variety of sources with different degrees of reliability, e.g. the accounting system, the process

information management system, the laboratory information management system, spreadsheets, etc. The integrity and the nature of the data must be carefully assessed before they are used. Moreover, to address uncertainty in the data, sensitivity analysis is used to identify the elements that have the greatest impact on the model output and thus, require specific attention from the decision maker.

Even though, the integration and the relational analysis of the process and cost information are key elements of the multidisciplinary cost model, a similar approach could be developed using non-relational spreadsheets. However, compared to more sophisticated tools like Impact:ECS^{TM}, the flexibility and capability of the analysis would be reduced and the opportunity to leverage large amounts of information into valuable outputs for decision-support would be more difficult to realize. It would also be more challenging to manage the information across many process design alternatives and also, in the operational context, to maintain the integrity of the cost model over time.

Implications of the Operations-Driven Cost Model

The cost model presented in this paper has the following advantages:

- The integration of process and cost information, the "bottom-up" calculation engine, and the process-based aggregation of costs allows for a more in-depth description of continuous processing operations. This, along with the use of the ABC-like concepts, provides a tool to better understand costs within the complex environments of pulp and paper mills. It increases visibility of the process perspective, and traces direct manufacturing costs more precisely than typical cost systems. As shown by the application examples, this improved characterization of manufacturing operations provides information that can be used in the context of retrofit design and supply chain optimization.

- The *PWC* structure, which is the basic element of the operations-driven cost model, provides a versatile tool for representing industrial manufacturing processes. It is built to match the common definition of a process unit, and specific calculations can accommodate particular cases. Furthermore, the structure can be used to represent and analyze different operating conditions (regimes) and design alternatives.

- Compared to typical ABC approaches where observable measures (used to analyze activities) are determined by interviews and surveys, the operations-driven approach uses data that are typically available at mills. This is a significant advantage since it provides a reliable source of information that requires minimum effort to obtain. Also, with the integration of process and cost information, the model can serve as a basis for the comparison and the reconciliation of information coming from different sources. For example, the grade cost information obtained with this model can be compared with actual and standard costs. In the context of process design, it helps to keep process and cost information synchronized; this is an improvement of the traditional process design in which the process and cost models are typically maintained separately.

- Since the costs are easily traceable to process unit operations, significant benefits can be achieved if the model were to be used and maintained by process/operation engineers who have the ability to control or act on costs incurred during production. The work presented in this article tries to define

new guidelines for a better use and integration of available cost and process data at pulp and paper mills.

- If continuously used at a mill, the proposed model could be the starting point for addressing operational and design problems using the same framework. It provides a more consistent model that can be used or adapted for different kinds of questions, instead of building new models for new problems.

Conclusions

With the advent of information management systems, the pulp and paper industry has the opportunity to extract additional value from data by using tools such as the proposed operations-driven cost model, and to use the generated information for improved decision making. The principal challenges of this approach are not related to information technology itself, but rather to the designed approach integrating the following elements: 1) understanding the available tools, 2) understanding the business and manufacturing processes, 3) developing new and specific methods, frameworks, and models and 4) understanding the needs of the decision making activities. Case studies for the application of the operations-driven cost modeling for retrofit process design and supply chain optimization are respectively presented in *Part II*[10] and *Part III*[15].

Acknowledgements

We would like to thank Kevin Riemer for his contribution of pulp and paper business and technical knowledge. This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chain at *École Polytechnique de Montréal*, and a scholarship provided to Martin Laflamme-Mayer from *Le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies*.

References

1. 3C Software. 2007. www.3Csoftware.com.
2. Boons, A. 1998. Product costing for complex manufacturing systems. International Journal of Production Economics 55(3):241-255.
3. Crama, Y., Pochet, Y., Wera, .Y. 2001. A discussion of production planning approaches in the process industry. CORE Discussion Paper 42.
4. Eamer, R.J. The road to recovery facing the brutal facts; 2003 February 2003; Atlanta, USA.
5. Fogelholm, J. 2000. Cost Function Modelling in the Paper Industries. Helsinki: Helsinki University of Technology. 102 p.
6. Gunasekaran, A., Marri,H.B., Yusuf,Y.Y 1999. Application of activity-based costing: some case experiences. Managerial Auditing Journal 14(6):286-293.
7. Horngren, Charles Thomas, Foster, George, Bamber, Linda S. 1991. Cost accounting : a managerial emphasis. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. xx, 964 p. p.

8. Janssen, M., Laflamme-Mayer, M., and Stuart, P. Survey of data management systems used in the pulp and paper industry. In: Corp. C, editor; 2003; Coral Springs, FL, USA. p pp. 551-554.
9. Janssen, M., Laflamme-Mayer, M., Zeinou, M.-H., Stuart, P.R. 2004. Survey indicates mills' need to exploit IT systems with new business model. Pulp and Paper 78(6):46-51.
10. Janssen, M., Naliwajka, P. Stuart, P.R. 2008. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part II: Retrofit process design application. Submitted to International Journal of Production Economics.
11. Janssen, M. Stuart, P.R. 2007. Business model framework for using real-time process data for design decision making. Accepted by Journal of Engineering Design and Innovation.
12. Kaplan, R. S. Robert. 1988. One Cost System Isn't Enough. Harvard Business Review 66(1):61.
13. Kaplan, Robert S., Cooper, Robin. 1998. Cost & effect : using integrated cost systems to drive profitability and performance. Boston: Harvard Business School Press. xi, 357 p. p.
14. Kreipl, S., Pinedo, M. 2004. Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice. Production and Operations Management 13(1):pp. 77-92.
15. Laflamme-Mayer, M., Lafourcade, S., Riemer, K., Stuart, P. R. 2008. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part III: Application for pulp and paper manufacturing operations. Submitted to International Journal of Production Economics.
16. Laflamme-Mayer, M., Linkewich, J., and Stuart, P. R. 2008. Methodology for using real-time process data for cost modeling and supply chain decision-support in the pulp and paper industry. Pulp and Paper Canada Accepted for Publication.
17. Lail, P.W. 2003. Supply chain best practices for the pulp and paper industry. Atlanta, GA: Tappi Press. 205 p.
18. Lail, PW. 2004. Achieving supply chain and IT project success. Pulp & Paper 78(9):25.
19. Miller, J.G. Vollmann, T.E. . 1985. The hidden factory. Harvard business review 63(5):142.
20. Orzechowska, Anya. 2005. Saving the Canadian industry: Discussing possible solutions. Pulp and Paper Canada 106(1):25-27.
21. Reeve, J. M. 1991. Cost management in continuous-process environments. Journal of Cost Management (Spring):22-34.
22. Songy, S. 2004. IT System Gives Managers Standardized View of Costs at Multi-Site Companies. Pulp & Paper 78(2):42.
23. Yeager, Bob. 1999. Costing software helps Sappi mills make the grade more efficiently. Pulp and Paper 73(12):63-66.

ANNEXE C

DEVELOPMENT OF AN OPERATIONS-DRIVEN COST MODEL FOR CONTINUOUS PROCESSES

PART III: Application for Pulp and Paper Manufacturing Operations

Martin Laflamme-Mayer[a], Sébastien Lafourcade[b], Kevin Riemer[c], Paul Stuart[a*]
[a]NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec H3C 3A7 Canada

[b]Pepite Technologies, Montréal H3C 2M1, Canada

[c]KNRconsult, Pointe-Claire H9S 4Y6, Canada

ABSTRACT

The implementation of information systems in the pulp and paper industry gave rise to analytical initiatives using lower-level process data to extract relevant information for higher-level business decision support. This paper shows the application of the operations-driven cost model, presented in Part I, to a case study defined at an existing high-yield pulp mill. The approach outlines how to structure and analyze critical process data and to develop a cost model suitable for the identification and interpretation of the cost implications of various operating regimes. The results indicate that the proposed approach better reflects the impact of process-related drivers and provides a perspective that improves the understanding of the mill's cost structure.

KEYWORDS

OPERATIONS-DRIVEN COST MODELING, PROCESS OPERATIONS MANAGEMENT, PROCESS DATA ANALYSIS, DECISION SUPPORT, HIGH-YIELD PULP MILL

INTRODUCTION

In the pulp and paper (P&P) industry, information and communication technology (ICT) at the mill and corporate levels are an essential element for supporting various functions and activities. However, most of the systems implemented today are mainly used to support business operations (transactional ICT, e.g. operations at the mills, order fulfillment process, etc.) as opposed to provide analytical capability to support decision making processes (e.g. supply chain planning, continuous improvement, etc.) [8]. The development and implementation of analytical systems in the P&P industry are limited and mostly accomplished on an *ad hoc* basis [11].

* To whom all correspondence should be addressed. Contact: Tel.: +1 514-3404711 x3484; Fax: +1 514-340-5150; Email: paul.stuart@polymtl.ca

The value of analytical systems does not come from the ICT-related capabilities (such as system integration, data consistency, data sharing, speed, security, etc.) but rather from the exploration and the utilization of the data provided by the transactional ICT. This often necessitates the use of advanced tools for data analysis (e.g. data reconciliation, statistics, data mining, etc.) and decision support (e.g. optimization, multi-criteria decision making). There have been significant academic and commercial efforts for the development of such tools and thus, the ability to implement these tools (i.e. hardware/software) is an important driver for the deployment of analysis initiatives. However, an important challenge is the development of practical methods to support these analytical approaches which has not been addressed extensively. By providing guidelines on how to structure and analyze the critical data, to integrate multidisciplinary aspects and to support decision making using state-of-the-art tools, these methods have the potential to better manage the complexity of today's business environment. The development of such methods is not trivial and requires problem/application-specific knowledge in order to extract relevant information, capture key issues and provide decision support capability that are aligned with the business goals.

This paper demonstrates how process and cost data can be systematically analyzed and integrated using the operations-driven cost model presented in *Part I* [20] in order to better characterize the manufacturing operations of a high-yield pulp mill. It is divided into six sections: the first part presents a review of the current cost modeling techniques, the second part summarizes the case study, the third part explains the framework for the analysis of process data, the fourth part provides the details of the application of the operations-driven cost model specifically for the case study, the fifth part presents the case study results and finally, the last part discusses how the implications of this approach for cost and supply chain management.

LITERATURE REVIEW

Along with the evolution of the scientific management movement (Taylorism), the concepts of standard costing were developed to answer the need for more systematic and reliable accounting information [5]. The traditional standard costing and variance analysis approach, fully developed early in the last century, became the most widely used control system of the 20th century [17]. Its goal was to monitor and manage the efficiency and the productivity and understand their impact on the bottom-line of manufacturing plants. One of the basic steps of the approach consists of determining the standard level of utilization of the resources. This is accomplished by analyzing historical resource consumption patterns. Typically, the standard level of manufacturing and non-manufacturing overheads is determined by accountants whereas the standard levels of resources consumed directly by the production processes are evaluated by engineers. Each month, the expected cost that should be incurred by the organization to meet actual demand is calculated using the established standard rate of resource consumption. The standard costs are then compared to actual costs and can therefore be regarded as a target performance evaluation. The actual cost figures correspond to the targets plus the losses/gains due to abnormal events and variations in efficiency and productivity. The calculation and analysis of cost variances (i.e. the difference between actual and standard costs) are the key element of the cost control procedure of a typical standard cost system and management usually focuses on exceptions i.e. they only investigate significant cost variances (beyond a certain predetermined threshold, e.g. 5% or 5000$).

Given the P&P manufacturing environment (capital intensive, commodity products, continuous processes and relatively stable specifications), standard costing systems appeared to be the most appropriate to understand cost behavior and to control costs. It is the most widely used cost system in

this industry. Pulping and papermaking processes consist of the production of various products using the same equipment (fixed routing compared to discrete-type industry). Operating conditions (temperature, pressure, energy, etc.) and material inputs are adjusted accordingly (fibre mix, type of chemicals, etc.). Standard recipes are defined in order to indicate the operating conditions for each product on each production line to meet product specifications. These recipes are used within the costing system to calculate the expected direct manufacturing costs of producing each product at the mill.

Besides its simplicity, one of the major advantages of a standard costing system is that it calculates and highlights, for each period, unfavorable variances and allows management to concentrate on the areas where there are inefficiencies [17; 32]. As discussed by Kaplan & Cooper [17], standard costing systems, are suitable for financial reporting but are not appropriate for the estimation of costs and for providing feedback about process efficiency to support decision making. Some of the important issues discussed in the literature are:

- Cost distortion caused by the inappropriate treatment of factory overheads [9]. Indirect manufacturing and non-manufacturing costs (engineering, logistics, maintenance, etc,), often considered as fixed or period costs, are allocated using volume-based measures that do not provide any useful insight in terms of cost behavior. Activity-based costing (ABC) was developed specifically to better represent and understand the resources consumed in the so-called "hidden factory" [25], where most of the overheads are incurred. ABC systematically exposes the relationships between the cost objects, the activities and resource consumption by using a rich set of resource and activity drivers based on observable measures, whenever possible.

- Misrepresentation of the mill's operations in the costing system due to the utilization of inappropriate standard levels of resource consumption. It is not uncommon to find organizations using outdated standards that obviously lead to distorted cost figures that are not appropriate to support decision making. Moreover, these standards do not reflect the reality if they are based either on wrong assumptions or on a poor characterization of the mill's production capability. As highlighted by Kaplan & Cooper [17], standard costing systems reflect a top-down philosophy in which initially engineers determined simple and specific operator tasks. Similarly, for large-scale continuous manufacturing, standard recipes represent the ideal operating conditions, set by process engineers, which should be targeted by the operating crew. As mentioned, since the focus is only on significant cost variances, traditional cost management methods do not explicitly take into consideration production processes and process conditions. Instead of systematically analyzing cost drivers, the information provided at highly aggregated levels is allocated, top-down, to the detailed levels [28; 31]. Given the fact that the availability and integration of powerful information technologies is a relatively new phenomenon and given the complexity of P&P operations, this traditional cost approach was convenient and thus, became widely accepted within the industry. Nevertheless, it is based on a simplified representation of manufacturing processes and thus, insufficient to provide an in-depth understanding as to how costs are generated within the mill.

- Limited capability to support operations management. Given the monthly financial accounting cycle, the a posteriori variance analyses are not responsive enough to identify issues and support decision making. In addition, the process information is integrated with cost at an aggregation level that is too high to provide efficient analysis capability and traceability of the cost along the manufacturing process [24; 31]. This limitation is particularly important in the P&P context where there is increasing pressure to be a global low-cost producers.

In order to support decision making in P&P, management strategies must provide a holistic view that integrates both process and business [31]. A few papers discuss the application of advanced costing approaches in continuous process environments [31; 35]. Steen & Steenstand [31] discussed the benefits of using a more sophisticated costing system to calculate product cost and support decision making in real-time at the plant floor level. Their approach, which is based on the traditional ABC concepts, is applied in the context of the P&P manufacturing environment. Unfortunately, the paper is not explicit about the method used and the development of the cost modeling framework itself. Nevertheless, they identified important requirements for the successful development of costing systems: reconciliation of process data, integration of accounting and manufacturing data, bottom-up aggregation, the ability to trace costs along the process, common data structure and, a flexible and configurable system. The work presented in Part I, II [12; 21] and III addresses all of these particular requirements.

In most approaches where advanced costing software is used (e.g. [35] and [31]) there is a great focus on providing the capability to drill down i.e. to define more detailed cost buckets (in terms of time or process view). Even though this allows for the analysis of the cost elements for every hour, process steps or customer orders (e.g. calculate the cost variances, trigger cost-related alarms, etc.), this approach does not provide the appropriate support to better understand the cost implications of the manufacturing conditions. Steen and Steenstand [31] mentioned that the cost of activities, since they are performed by companies to produce and deliver a product, should be considered as product cost. This focus on the product perspective, common in discrete industries, is not appropriate for continuous processes since it does not efficiently take into consideration the process perspective. In such a costing framework, the direct manufacturing costs are directly allocated to the product, and it does not provide useful explanations about how costs are really generated within the main processing operations. As highlighted by Reeve, there is a relation between the resources used within the process and the products but this alone is not enough to explain the resource consumption at the mill. In a continuous process environment, costing systems must incorporate process and product drivers [28]. Therefore, it is essential to use information on the production processes and the operating conditions in order to analyze the direct manufacturing costs.

As indicated by Janssen et al. [10; 11], large amounts of process data are available in the information management systems (IMS) at P&P mills. There is an opportunity to systematically analyze these data and extract information to better reflect the process perspective using an operation-driven cost model such as presented in *Part I*. Even though different tools are available to support users in analyzing and making sense out of this large amount of process data, one of the challenges resides in the organization, retrieval and extraction of relevant information [7; 19]. In this context, the concept of knowledge discovery in databases (KDD) that focuses on the extraction of higher-level knowledge from large amounts of low-level data [6], is particularly relevant for the current study. It aims at identifying patterns or information that are useful from a decision making standpoint [2; 6; 7]. Since the KDD concept refers to the overall process of extracting information, it incorporates, as mentioned by Apté [2], a broad range of tools and techniques for data warehousing, database management, data analysis and visualization. In the process system engineering context, a critical element of advanced data analysis consist of incorporating process knowledge and/or creating models to support the interpretation of the data and the extraction of relevant information. Given its empirical nature, this is particularly important for the analysis of P&P processes and, depending of the problem addressed, a variety of tools can be used[4; 13; 18]. For the purposes of this study, we considered the process of data mining for knowledge discovery as defined by the CRISP-DM [33] as being of particular importance. Moreover, supervised and unsupervised learning techniques were used to support advanced process data analysis[2; 6].

Finally, technological challenges as well as the lack of guidelines and systematic methods were certainly serious barriers for the development and implementation of appropriate costing approaches, such as the proposed operations-driven costing model, for large-scale continuous processes. With the advent of information technologies, current cost management may be improved by using a bottom-up cost modeling approach, using process data available at the mills. This would help to better reflect the real manufacturing operations and also, to better understand cost generation as a function of production processes and process conditions.

OBJECTIVE

As presented in *Part I*, the overall objective of this study was to develop a framework for creating an operations-driven cost model that integrates process and cost information in order to characterize the manufacturing costs of continuous processes in pulp and paper mills. The main goal of *Part III* is to demonstrate the use and application of this approach in an operational context, using the case study of an operating high-yield pulp mill. Subsequently, the specific objectives addressed in this paper are:

1) to demonstrate how to use process data and develop an operations-driven cost model in order to identify, analyse and interpret the cost implications of various consumption patterns within the mill,

2) to characterize the direct manufacturing grade costs of a high-yield pulp mill using the proposed approach,

3) to identify the benefits of using the operations-driven cost modeling approach, with advanced data analysis tools, compared to current costing methods used at mills,

4) to discuss the implications of the approach in the context of the development of decision support tools for supply chain planning.

CASE STUDY DESCRIPTION

The case study consists of the fibre supply chain of a high-yield pulp mill including the fibre procurement, the manufacturing and the distribution/customer cycles. The mill produces high-yield pulp from hardwood chips using a bleached chemi-thermomechanical pulping (BCTMP) process. More specifically, the pulping process involves four main production steps: chemical pre-treatment, pressurized refining of wood fibres, bleaching of the pulp, and drying/finishing operations. The different pulp grades produced are defined by three main characteristics: bulk, brightness and wood species. They are obtained by varying the process operating conditions such as the addition rate of chemicals and/or the specific refining energy according to standard recipes defined specifically for each production line. The final product is sold to customers in the form of baled dried pulp.

In such a commodity product environment, cost effectiveness is essential to maintain the global competitive position of a manufacturing facility. This not only refers to cost-effective manufacturing processes, but also to the efficient coordination along the fibre supply chain in order to ensure the overall profitability of the operations. It is therefore first necessary to understand the cost structure of the mill in order to determine and analyze the manufacturing costs for pulp grade produced. Next, the cost information obtained can be used in order to better reflect manufacturing operations at the supply chain level, where enterprise-wide optimization approaches seek to maximize the overall profitability.

OPERATIONS-DRIVEN COST MODELING METHOD

1-Goal definition

Providing a clear goal definition is the essential starting point of any cost modeling project. It needs to specify not only the object for which we want to characterize the cost behavior, i.e. the cost object, but also, the related decision making objectives (how and what the model will be used for e.g. continuous improvement initiatives, supply chain optimization, etc.). This is a particularly important step since the alignment of the goal and the cost modeling strategy is a necessary condition for the development of a useful cost model to support decision making. It also provides key guidelines for the identification of what are the relevant elements to include within the model and also, the level of detail and accuracy required.

2-Scope definition

The scope is defined by carrying out a holistic analysis of the cost and process information available at the mill. First, the resources[†] that should be a priori included within the cost model with respect to the formulated objective are identified by looking at the general cost information provided, e.g. the general ledger. Second, an overview of the mill should be done in order to have a general idea of how the operations relate to the consumption of the identified resources. Using this information, as well as the inputs from the process engineers at the mill, the boundaries of the cost modeling project are established. These boundaries specify the main manufacturing operations that need to be considered for the development of the model and for which the operating conditions will be further analyzed to understand the cost behavior of manufacturing processes at the mill.

3-Description Phase

The description phase aims at identifying what is required, as opposed to what is available, to develop an operations-driven cost model relevant with respect to the predefined goal and scope. This will provide the necessary directions for structuring the cost model and for the data acquisition and investigation phases.

> *3.1- Resource Driver*: For each resource categories selected earlier, it is necessary to identify what are the corresponding resources drivers in the manufacturing processes within the defined boundaries. These drivers are a measure of the resource consumption rate by the process activities at the mill.
>
> *3.2- Operations & Process Mapping*: Gaining knowledge of how process conditions influence the identified resource drivers is the key task of the description phase. Different sources of information, e.g. process flow diagrams, can be used to describe the process configuration and equipment. Recipes also provide a good basis to gain a preliminary understanding of process conditions for each of the grade produced. During this process it is important not to neglect

[†] A resource refers to an economic element that is used when performing the process activities within the mill e.g. materials, salaries (27).

discussion with mill's process engineers that will provide important insight and manufacturing know-how.

3.3- Process Activity Driver: Process activity drivers define the link between process conditions and consumption of a given resource (resource driver). More specifically, it identifies what information is necessary to characterize the intensity of a process activity within a process work center.

3.4- Process *Work Center*: Each process work centers (PWC) groups a set of resource and process activity drivers, as well as the corresponding process units, for which the operating conditions with respect to the cost object are the same. Not surprisingly, this grouping often corresponds to the main "function" performed by the manufacturing process e.g. pretreatment, refining, etc. When defining the PWC boundaries, and thus the process resolution, it is important to ensure that the PWC grouping contributes to better explain the cost generation at the mill. In other words, the three levels of drivers used within a *PWC*, i.e. the resource, process activity and *PWC* levels must clearly capture the cost behavior of the selected manufacturing operations (Figure 1).

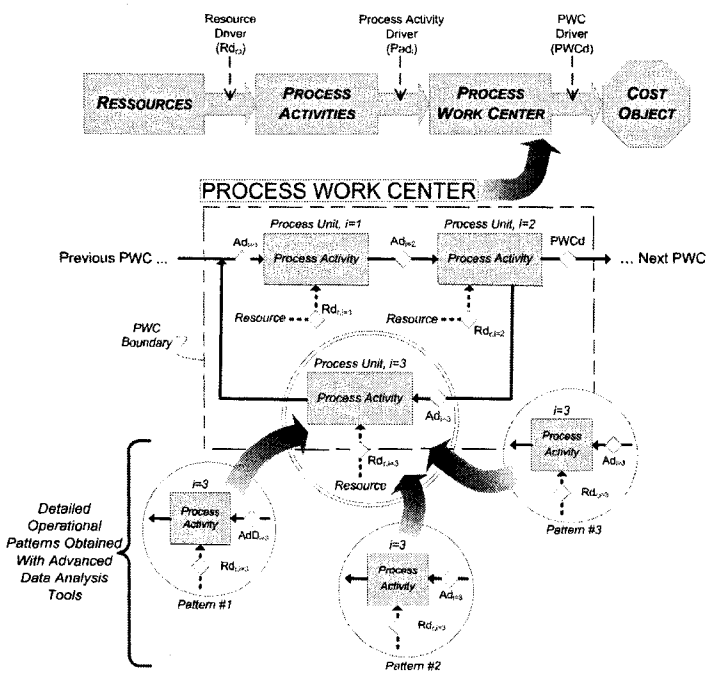


Figure 1: Description phase and relationship between the levels of the drivers used within a *PWC*.

4- Data Selection & Acquisition

The approach is data intensive and requires the integration of various sources and types of information. However, the most valuable results are not obtained when all available process data are considered, but rather, when the process analysis and cost modeling efforts are focused on clearly identified objectives and consequently, the relevant stream of information identified in the description phase. Thus, the first task consists of the determination of the process data available to provide quantitative measures of the drivers identified. Typically, they can be downloaded from the process information management systems at the mill. Since the key idea is to incorporate "process knowledge", other types of information besides the available process data should be used in order to describe current operations at the mill. If data are not available to describe the necessary drivers or if the quality of the data is not sufficient (see the investigation phase), alternative sources of information should be used to complete the set of process data required for cost modeling. They can come, for instance, from mass and energy calculations, empirical estimates, rule-of-thumb, etc. As long as these estimates are based on sound "process knowledge", the results provided by the cost model should be approximately correct and any potential error will eventually be revealed by using the operations-driven approach over time (similarly to the case of time-driven ABC [15]). Finally, various contextual data (e.g. production schedules) also need to be selected and integrated in the cost analysis. They will not only provide the information necessary to describe the *PWC* but also serve to analyze process data.

5- Investigation Phase

5.1- Data Treatment and Preparation: Depending of the mill's IMS, all contextual and process data obtained during the previous step need to be prepared and formatted in order to be put into a relational database. Also, different types of errors may be present in the process data, e.g. abnormalities, random errors and gross errors [3]. The amount of effort invested in treating the process data should be consistent with the defined goal and the resulting uncertainty at the decision making level. A quality assessment should be carried out based on process knowledge and ideally with process engineers at the mill, in order to verify that the data quality is sufficient in the context of the cost modeling project. Anomalies and unknown data may be treated with data filtering. More advanced data treatment techniques, such as data reconciliation [4], may be necessary by the goal definition or for other reasons,. In the case of contextual data, since multiple sources of information are often used, it is recommended to verify the consistency of the data obtained e.g. the production schedule may be verified by using grade quality data at the finishing line.

5.2- Data Integration: This step integrates all process and contextual data within a centralized data structure. A relational database provides a particularly suitable tool where all information is grouped together in a logical way. The data are stored in multiple tables linked together by relations and the resulting structured set of tables forms the database. Using queries, these relations can be exploited which greatly facilitates the analysis of the data. For instance, contextual data can be used to classify the process data describing the drivers. This creates refined subsets of data based on mill knowledge (e.g. grade produced, operating crew, etc.) that can be analyzed in detail. Moreover, the resulting relational framework is easily scalable and can be expanded as required for data analysis. It also facilitates the management of large quantities of data and ensures their integrity and consistency across the entire database.

5.3- Data Analysis: Instead of summarizing the process performance data on a monthly basis, this task consists of characterizing resource consumption and operating conditions in order to better understand the cost generation at the mill. Given the effort required, the activities performed must be aligned with the cost modeling goal and, in this context, the user's process knowledge is a key factor for the identification of relevant operating regimes that will be interpreted on the basis of cost. The data analysis process is iterative and involves the grouping of the data, the execution of data analysis and the interpretation and retrieval of identified patterns. Most often, a combination of approaches and techniques is required to extract relevant process information. The analysis can be performed using queries and basic statistics. Although it requires the direct involvement of the user to create subsets of data, these tools, that integrate various operations (such as basic statistics, logical operations, calculation, sorting, etc.) and queries in a multi-layered structure, can performed complex data manipulations to assist the search of relevant information. In this context, visualization tools are also very useful to interpret the patterns identified and to direct new searches. Moreover, advanced techniques, such as steady-state detection[4] and data mining, can also be used for in-depth analysis of process data. Although these tools are more automatic, they allow, with the appropriate inputs from the user, to extract information from large multidimensional process dataset and thus, to characterize the operating regimes at the mill. Finally, this step will provide key process information that will be used as inputs to the operations-driven cost model to better assess the cost implications of manufacturing conditions at the mill.

6- Cost Model Development

The cost model must be developed according to the framework presented in detail in *Part 1* that incorporates and emphasizes the importance of the process perspective for identifying the source of costs of main processing operations. The principle behind the operations-driven cost model is to integrate process and cost information, based on ABC-like principles, to better reflect on cost the capability of the manufacturing processes. One of the key elements of the approach is the structure used to systematically consider both the production process and the operating conditions of the main processing operations. The generic framework developed to represent the *PWC*s and allow for the modeling of the cost flow along the process, the bottom-up feeding of the process information, the incorporation of flexible specific calculation, the assignment of overheads and the standard process-based cost calculation. Given that all the relevant information has been gathered from the investigation phase, the cost script uses a combination of resource, process activity and *PWC* drivers to relate the resource consumption to the final cost object. In fact, when the cost model is executed, the information provided (for instance in the *Process Value Table* and *Local Factors*) are structured and logically treated to calculate the costs per *PWC*s and accumulate in the *Overall Cost Object* (Figure 2).

7- Interpretation and Reporting

The cost results obtained by the operations-driven approach must be interpreted in light of the initial goal established. Steps 5, 6 and 7 are used iteratively in order to readjust the data analysis strategy if necessary or simply to perform a more in-depth analysis to provide more detailed cost results. In this context, visualization tools are also often useful in order to provide a more comprehensive view of the key results obtained. Again, since process understanding is a key factor, it is important at this point to interact with the mill personnel who may provide a clear interpretation of the cost model results. When the results obtained are satisfying, the last task consists of reporting and documentation. The aim is to

provide the required visibility for decision support purposes. The main benefits of this approach do not come from the cost reporting itself but rather from using the results for decision support.

APPLICATION OF THE METHOD

The methodology presented in the previous section was applied to the case study. Table 1 summarizes the important elements considered, for each identified steps. Also, Figure 2 illustrates how the operations-driven cost model, presented in *Part I*, was adapted for the analysis of the pulp mill manufacturing grade costs.

Table 1: Methodology Steps Applied to the Test Case

1. Goal	
♦ To characterize the direct manufacturing grade costs (cost object) at the pulp mill in order to support a bottom-up SC planning approach (decision support objective) where manufacturing capability is determined using lower-level process data.	
2. Scope	
♦ Given the SC context, a relatively high-level model was developed that considers the main manufacturing activities at the mill i.e. the pulping process. ♦ Four resource categories were considered: chemicals, variable electricity, natural gas and packaging materials. ♦ Since fibre supply is an important SC decision variable, the cost of fibre is not taken into account within this model but rather, optimized within the SC problem. ♦ The cost of supporting activities, such as wastewater treatment, as well as manufacturing and non-manufacturing overheads were considered as facility-level charges, in $/hour. Since these charges are only considered at the SC level in order to take into account the cost of utilization of the mill processes, a high level of detail was not required.	
3. Description Phase	
3.1 Resource Driver	♦ In total, 21 resources drivers were established. ♦ For example, the specific energy of each refiners and conflos™ are considered as resource drivers. On the other hand, the electricity generally consumed by the building or by the various pumps within the process is not considered specifically, but included within facility-level charges.
3.2 Operations & Process Mapping	♦ The process mapping was accomplished by analyzing the process flow diagrams of the mill. ♦ The preliminary information about the operations was obtained by the analysis of the recipes, available for each grade. ♦ General process information was obtained by doing many interviews with the mill personnel.
3.3 Process Activity Driver	♦ In total, 10 process activity drivers were established. ♦ For example, the production rate of the reject refiner was the appropriate process activity driver to link the reject refining intensity with the consumption of electricity.
3.4 Process Work Centre Driver	♦ Seven *PWCs* were used to describe the operations of the case study: pre-treatment, refining, cleaning, first bleaching stage, second bleaching stage, drying and finishing. ♦ Each *PWC* has its corresponding driver. ♦ Depending on the *PWC* structure, the *PWC* driver was, in certain cases, the same as the defined process activity driver.
4. Data Selection & Acquisition	
♦ Process data selection was done by looking at the DCS as well as at the *PI ProcessBook™* used at the mill. A total of 30 tags were downloaded from the *OsiSoft PI™* system in order to characterize the cost model drivers. For each tag, the data were obtained for a period 3 months and with a time discretization of one data every minute. ♦ Other contextual data were downloaded from the different IMS in place at the mill (e.g. spreadsheets, *Proficy™*, etc.). For example, production information such as the amount repulp, cull, off-spec and saleable production were obtained on a daily basis. Other event-based information such as the production schedules, production shutdowns and transitions were also incorporated. ♦ Given the lack of certain necessary process data, "secondary" information was also used. For example, the *PWC* drivers for each bleaching stage were estimated based on the evaluation of the fibre yield at each step of the manufacturing process.	

Table 1: Methodology Steps Applied to the Test Case (Cont'd)	
5. Investigation Phase	
5.1 Data Treatment & Preparation	♦ Based on the quality assessment, a few process data were removed from the data set and replaced by calculation or estimates (e.g. production rate at the first and second bleaching stage). ♦ Data were prepared in order to be put in the relational database. The duplicates were removed and the consistency of the data type across the data fields was ensured by removing the comments (such as "shutdown") from number data fields. ♦ The process data were filtered, using the Hampel technique [23], in order to correct the abnormal values within the data set. Given the large amount of data, the filter was implemented directly in the relational database and the process data associated to each tag were treated sequentially.
5.2 Data Integration	♦ The relational database management system was implemented in *MS Access™*. ♦ All the contextual and process data were loaded in tables that reside in or link to the main centralized structure. As represented in Figure 2, this overall multi-layered structure was elaborated to support the investigation phase. As much as possible, it separates the data storage from data manipulation and also, keeps the different level of data sophistication (raw process data, treated data, process information).
5.3 Data Analysis	♦ The first step consisted of characterizing the drivers for the various production run of each pulp grade. – The segmentation of the process dataset & the analysis of identified patterns were mainly based on contextual information. – The emphasis was on normal operating conditions (i.e. shutdowns periods and exceptional process operations are excluded). – The tools used to identify the patterns consisted of queries directly in the relational database, visualization and basic statistical analysis. ♦ The second step consisted of using advanced data analysis algorithms to identify and characterize similarities in the operating conditions of a given pulp grade. – The data mining software *Pepito™* [26] was used for the analysis. – A clustering technique was been used to automatically find similarities in the operations of a given pulp grade. – Decision trees were also used to determine what were attributes that influenced the most the clusters established (i.e. operating regimes).
5. Cost Model Development	
♦ The operations-driven cost model described in *Part I* was implemented in *Impact:ECS™* [1]. ♦ The principal elements of the cost model used are represented schematically in Figure 2. Seven *PWCs* (identified in step 3.4) as well an *OWC* were included in the model. The *Process Value Table* integrates the process information, or the identified operating regimes, determined in step 5.3. Some specific calculations were necessary e.g. to determine the production rate of each conflos in the *PWC #3 - Pulp Cleaning*. The model calculation was executed for each cost object (i.e. each grade) and each time, all the runs are simultaneously treated.	
6. Interpretation and Reporting	
♦ The results of the operations-driven cost modeling approach as well as the actual and standard costing used by the mill, during the corresponding time horizon are presented. Cost waterfall visualization is used to show the overall implications of the costs generated at each PWC, for different run of a given grade. ♦ Classification trees were used to support the interpretation of cost results. ♦ The implications of using this model to support SC planning are discussed.	

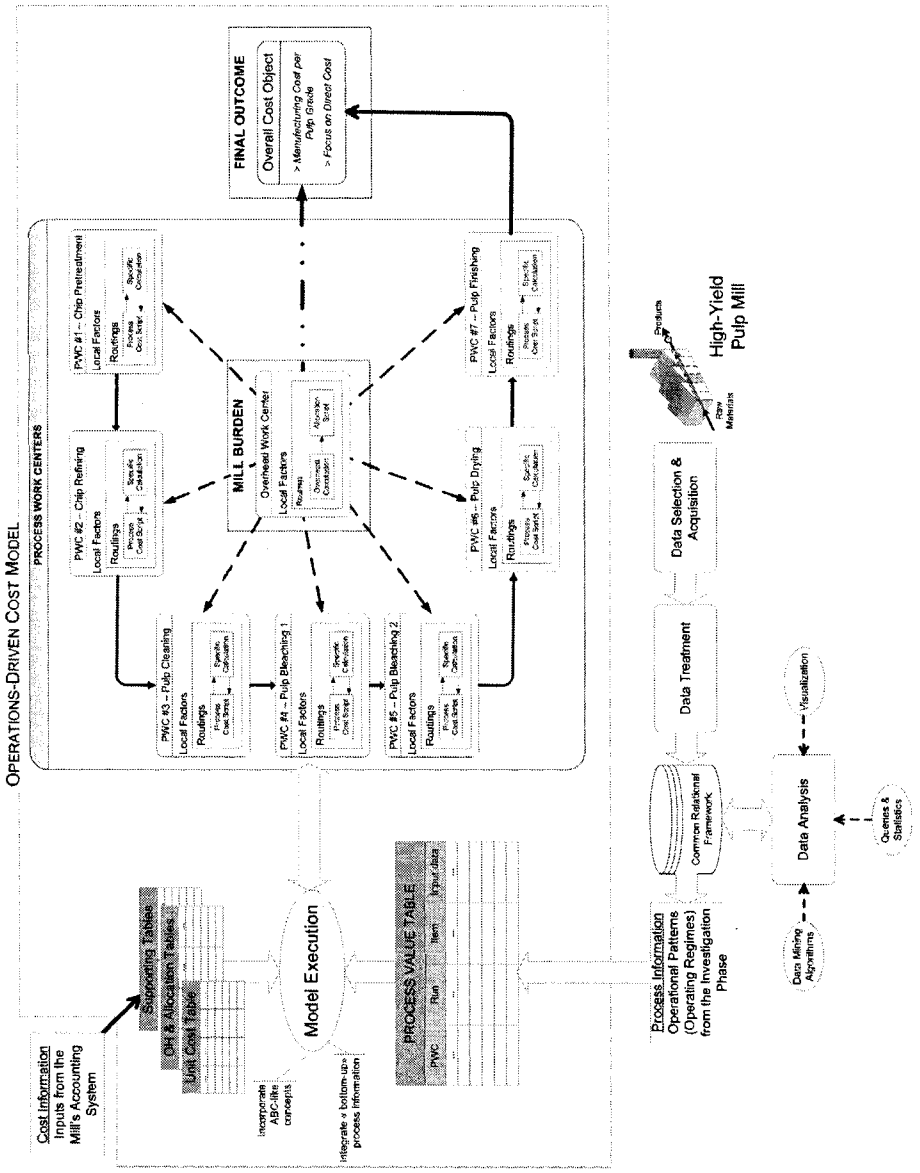


Figure 2: Schematic representation of the application of the operations-driven approach for the case study

RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the advantages of the proposed "bottom-up" approach for the characterization of the direct manufacturing costs are demonstrated. First, the aim is to show that a different cost view, that better reflects the manufacturing processes can be provided when cost models are supported by the analysis of historical process data at the mill. Second, some results, differing in the degree of sophistication during the investigation phase, are given in order to show the benefits of using the operations-driven approach to better account for the defined *PWC*s and to understand the cost implications of various operating conditions at the mill. This is accomplished by presenting the results obtained by the application of the operations-driven cost modeling approach in the case study situated at a real mill. For confidentiality purposes, all the results shown have been normalized.

A New Perspective Compared to Common Practices

This section shows that the proposed approach is providing a new perspective compared to well-established accounting practices at the mill (standard and actual costing). As mentioned by Kaplan & Cooper[16], one cost system isn't enough and the purpose here is not to compare the three views, but rather to show that they provide different information with various degrees of relevance related to operational decision making.

Using event-driven information (i.e. production plan) subsets of the original process were created and analyzed independently in order to determine the drivers for the various production runs of each pulp grade. Figure 3 shows the direct manufacturing costs for one of the pulp grades produced at the mill. The results, obtained using the operations-driven approach, are broken down by run (production campaign). It also shows the actual grade costs broken down by month and standard costs provided by the mill's cost accounting system for the corresponding time horizon. All the costs presented have been normalized using the total standard grade costs. Each bar shows the break-down of the costs per resource category (as per the mill's accounting system). The width of the bars is a measure for the length of each run considered in the calculation.

Standard costs, adjusted to reflect grade recipes, indicate how resources should have been used for the manufacturing of each pulp grade. However, as shown in Figure 3, these conditions may not reflect the reality of the operations. In this particular case, the standard seems easy to make and this pulp grade is believed to be more expensive to manufacture. In the case of the actual costs, they are calculated using the data available from the monthly financial statement of the mill (October, November and December 2003). These high-level aggregated cost data are typically pushed to each pulp grade using a volume-based approach for the calculation of the actual costs and adjustments are made to ensure a consistent representation between the mill production data and the financial statement. Even though it represents the real money spent for supplying the resources, this type of cost information does not provide enough visibility for cost management. For example, although the actual costs for November are the greatest, the most cost effective run was during this particular month (see Figure 3).

Contrary to traditional costing approaches that may no provide the most appropriate cost benchmarks, the operations-driven approach has the advantage to be easily interpretable and may facilitate the cost management process at the mill. It could also be used as a basis for performance assessment and continuous cost improvement that would not focus on financial reporting and would be done at the mill level by process engineers. In this context, the investigation phase and cost calculations give more useful

feedback and information on the cost of current manufacturing operations at the mill. For example, the cost-effective *run #3*, which has a sufficient duration and production rate, could be used as an operational benchmark for this pulp grade. In this case, instead of calculating the actual cost according to the monthly financial cycle, the operations-driven approach could provide updated results each time a run is completed. This would allow users to efficiently identify and eventually act on the process-related drivers in order to improve the cost performance of the mill. It would also be possible to better understand the limitations and key factors to achieve maximum cost performance.

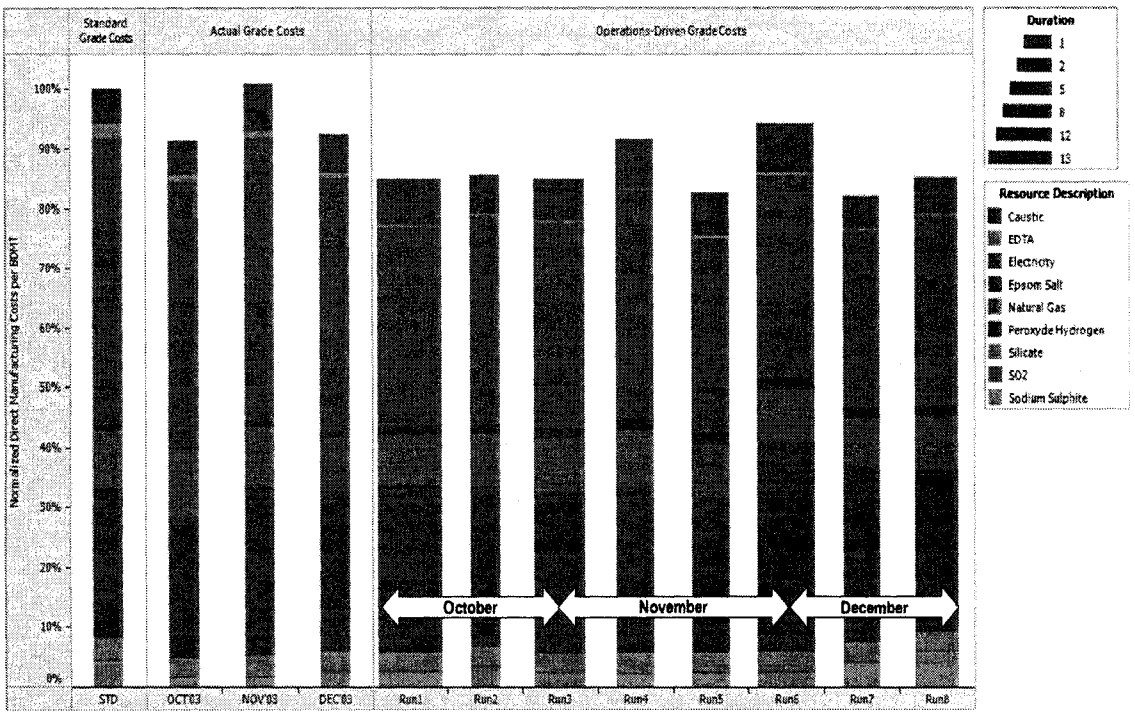


Figure 3: Direct manufacturing cost of one of the mill's pulp grade

Moreover, since the two commonly used cost systems do not systematically look at process-related drivers, the cost information obtained has limited value in terms of cost control and operational decision making support. Figure 3 clearly shows significant cost variations across the different production runs of the same grade, which points out the importance of having a tool that emphasizes the process perspective. Contrary to actual costing that focuses on the resources supplied to the mill, the operations-driven cost model focuses on the utilization of the resources by the manufacturing process activities. This does not imply that the costs determined using the operations-driven model are "more" precise than the actual costs but rather, that the new information provided will improve the visibility of the cost incurred in continuous process manufacturing (cost structure of the mill) and understanding the cost implications of the operating regimes. The accuracy of the operations-driven cost model is obviously a function of the level of detail included in the model. By enlarging the scope, considering a more detailed set of drivers and increasing the level of effort invested in cost modeling, the operations-driven cost model should provide results that are closer to the actual cost determined at the mill.

Visibility of the Direct Costs Incurred in Continuous Processes

The following three sub-sections demonstrate that the operations-driven cost model is a tool that provides a greater detailed process perspective in order to improve the visibility of the manufacturing costs and, more importantly, to interpret these direct costs based on a data-driven characterization of the operations.

Process View

Visibility refers to the capability to provide a holistic view of the process in order to understand the cost structure of the mill's operations. Given its process view and bottom-up approach, the operations-driven cost model is particularly adapted to address this issue. Similar to a mass balance, the model aggregates the cost along the process in order to determine the total direct manufacturing costs. Also, by taking advantage of the process data available at the mill, the proposed cost model is not focusing on cost measurement, but rather, on the measurement and characterization of how the resources and process activities are consumed by the manufacturing operations, for a given cost object (e.g. production run of a given grade).

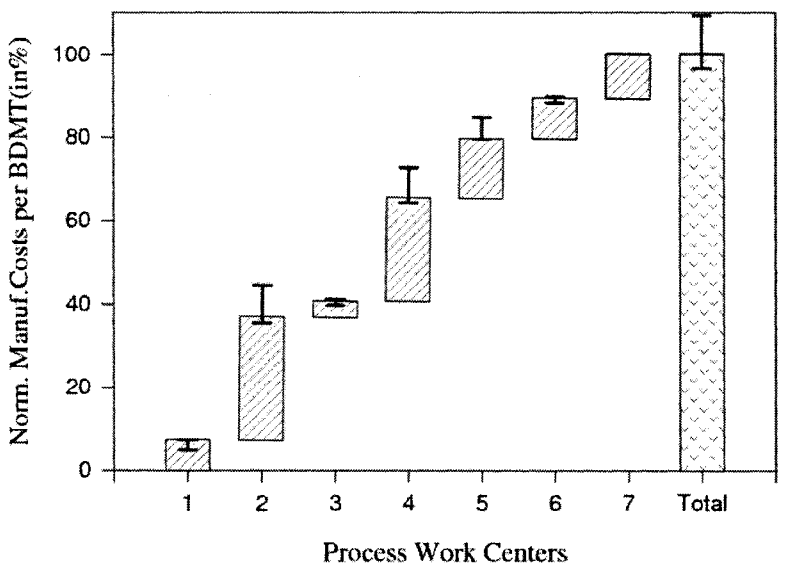


Figure 4: Contribution of each *PWC* to the direct manufacturing costs

Figure 4 shows the cost waterfall of *Run 8* (first introduced in Figure 3), broken down by *PWC*. The results are normalized based on the total cost of run 8. The bars show, for each *PWC*, the variation of the cost across the different runs of the same grade. For example, the normalized cost of *PWC #2 - Chip Refining* is 29.5 and it has a maximum cost of 37.2 (associated to run 4) and a minimum cost of 28.2 (associated to run 7).

In continuous process industries, it is often assumed that the product is homogeneous and thus, that it incurs the same direct manufacturing costs for every ton of a given grade going out of the mill. However, given the current state of information technology, the available process information should be incorporated in cost analysis and the cost implications of the variations in the manufacturing processes should be recognized and systematically addressed. Figure 4 shows that for the same pulp grade there are significant cost variations for each *PWC* and it is clear that the assumption of homogeneity with respect to cost is far from being valid. Moreover, although the total aggregated manufacturing costs may look approximately the same for some runs (e.g. see run 1, 2, 3, 8 in Figure 3), this does not mean that the cost effectiveness of each *PWC* taken individually is similar. Therefore, the product view is not sufficient to explain the generation of costs at a mill. The contribution of each *PWC*, due to the specific operating conditions that affect the cost incurred, should be monitored in order to have a better control over the total manufacturing cost of a given pulp grade. This type of cost analysis, for each individual *PWC*, should also be integrated in the continuous cost benchmarking process discussed earlier. This process view is the starting point for assessing the impact of manufacturing conditions on the mill's bottom-line.

Process Conditions

With the operations-driven approach, cost modeling is more focused on the cost of using the resources and thus, on the dynamics of each *PWC* at the mill. Since it is possible to measure and trace the cost drivers using the process data, process conditions can be analyzed as a source of cost. The results presented here show how this facilitates the understanding of the cost implications of key operating conditions.

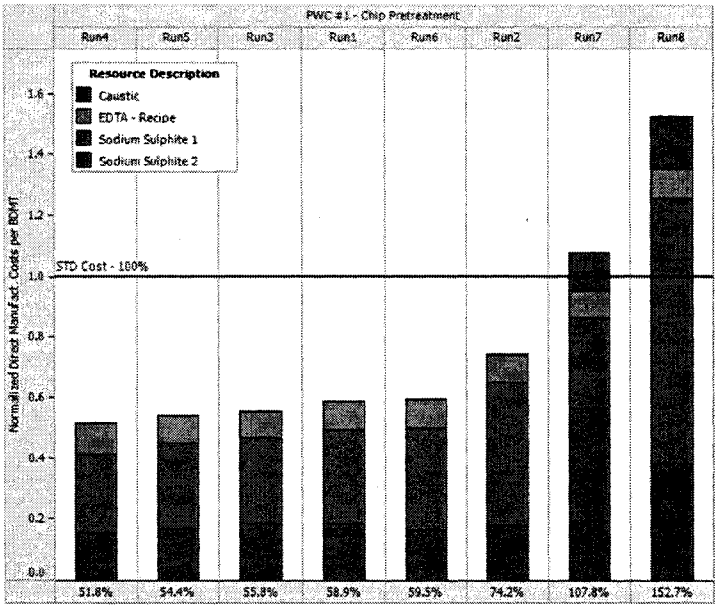


Figure 5: Cost analysis of a particular *PWC*

Figure 5 presents the direct manufacturing costs calculated for *PWC #1- Chip Pretreatment* (same pulp grade as in Figure 3). The results, broken down by run, are normalized using the total standard cost and the total calculated costs are provided at the bottom of the graph. The color shows the details about the

resources considered in this particular *PWC*. Sodium sulphite 1 and 2 refer to different injection points within the process. We can observe that there is a significant difference in the pretreatment costs compared to the standard and, based on the analysis of the process data it was possible to determine that the utilization of the resources was, for the six first runs, below the standard.

The operations-driven approach helps not only to identify the costs (i.e. see the difference between runs 1 to 6 and runs 7 and 8) but more importantly, to understand the impact of specific operating conditions, by analyzing the drivers that are based on lower-level process data. In this case, the abnormal cost generation rates observed are due to the non-availability of an important piece of the equipment, the impregnator, and consequently, no caustic was used and only a small amount of sodium sulfite was added to the preheater. In the case of *Run 7* and *8*, the pretreatment conditions were back to normal which explains the increased resource consumption intensity i.e. caustic was added and a greater amount of sodium sulfite was used.

Operating Regimes

So far, it has been shown that the bottom-up cost analysis provides important information to support the cost management and decision processes at the mill. Nevertheless, these analyses are based on the manufacturing plan (production runs) and thus, are event-driven. Given the proposed approach, it is also possible, with an additional degree of analysis sophistication, to better characterize the utilization of the resources and thus, to fully exploit the ABC-like cost model. In this study, although various approaches could be used (e.g. steady-state detection [4]), the benefits of advances process analysis capability to support the operations-driven cost modeling are demonstrated using data mining techniques.

Each object[‡] considered for the advanced analysis consisted of an hour of operations of the three months time horizon, for the same pulp grade (first introduced in Figure 3). All objects were characterized by a collection of attributes that corresponded to the average process data for a specified set of tags that focused specifically on four *PWC*s: *Chip Pretreatment*, *Chip Refining*, *Pulp Bleaching #1* and *Pulp Bleaching #2*. After iterations, a total of 13 tags were considered as mining attributes. Since the data across these different *PWC*s needed to be consistent time wise, lags were introduced in order to have a better temporal match between the various attributes. These lags were determined based on process understanding. The sensitivity analyses that were carried out indicated that the results, for no lag or different lags, were not significantly affected. Clustering, or unsupervised learning, is used in order to create subsets of elements from an initially large data set that have similar characteristics. In clustering, the main underlying principle consists of maximizing the internal homogeneity within each cluster and the external separation, or heterogeneity, between the different clusters [34]. Again, several techniques exist that each use different metrics and approaches and, for this study, the K-Means clustering algorithm has been used.

Using the *Pepito*™ software [26], four clusters, or operating regimes have been identified. Since clustering has been applied on a multidimensional data set, it can be difficult to explain the regimes and validate that the results bring new valuable information from a process engineering standpoint. One possible way

[‡]In data mining, an object view is necessary to apply the algorithms. Each object (e.g. a time stamp) is characterized by a set of attributes. The value of these attributes (e.g. temperature) defined the state of each object considered.

to better understand the operational patterns (or clusters) obtained is to use another data mining technique, the decision tree.[6] In fact, since the attributes describing each object are known precisely and also to which cluster each object belongs to, it is possible to use a decision tree to classify each object into one of the discrete and predefined clusters. Again, using *Pepito*^{TM}, the set of objects earlier defined was sequentially partitioned, using the most discriminate attributes, until all subsets of objects were homogeneous. The results obtained indicate that the specific energy at the primary and secondary refiners were the most significant variables to consider in order to explain the regimes. Using this result, Figure 6 shows the scatter plot of all the objects considered. The two main identified attributes, the specific energy for primary and secondary refining, are respectively on the Y and X-axis. The dotted arrow indicates the general evolution of the operating regimes during the time horizon considered. The four clusters are shown by imaging the convex hull of all the objects that belong to a given regimes. These hulls are clearly distinguishable which this is due to the fact that the two attributes represented here are important parameters to explain the classification of the objects within each cluster. There are also a few areas where these convex hulls overlap. This is because other attributes (multidimensional dataset) have also been considered for clustering and are particularly important at the border of a convex hull (such as for cluster C) where the specific energy alone does not provide enough information for the classification of the objects. Figure 7 also indicates the runs associated to each regime. This association was done on the basis of the percentage of objects of a given run that belong to each of the regimes. These percentages are greater or equal to 50% for all runs, except for those of regime C. In this latter case, the percentages of run 5 and 6 are respectively 38% and 47% which is the highest across each run. Cluster C can be seen as a transition zone between cluster B and D, which explains the dispersion of the objects at this level.

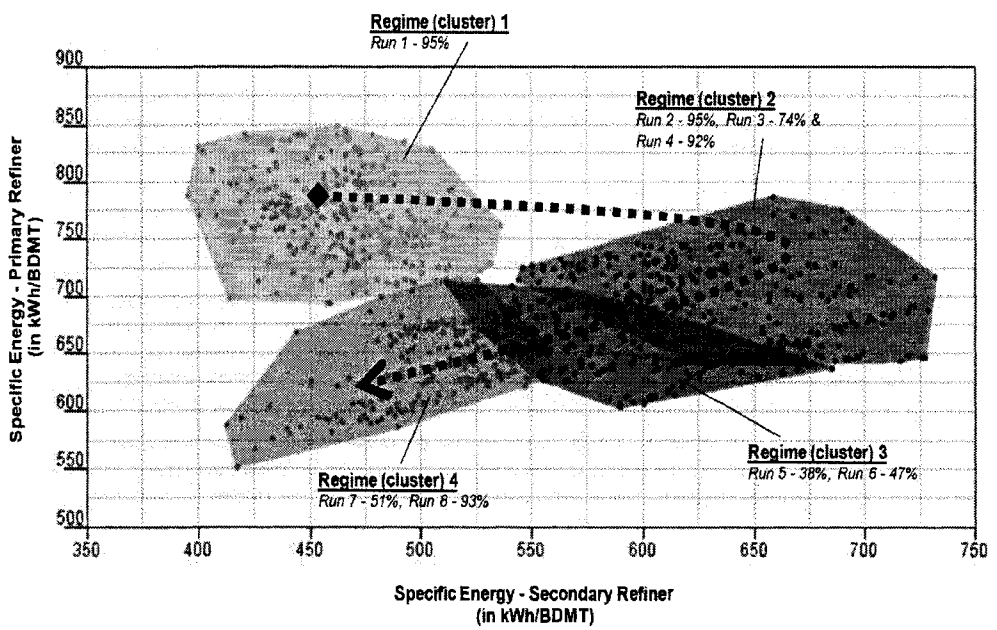


Figure 6: Interpretation of identified operating regimes based on the results of a classification tree

For each operating regimes, the cost driver information was extracted from their associated objects, characterized by process data. Then, this information was uploaded to the relational framework and treated in order to be integrated with the cost model. Since the specific refining energy was the key element to explain the identified regimes, the operations-driven cost model was specifically executed in order to compute the cost of the *PWC #2 – Chip Refining*. The cost results, based on the process information obtained by advanced data analysis, are shown in Figure 7. The bars represent the cost calculated for each run while the horizontal lines indicate the cost association to each regime. Also, all the results have been normalized using the lowest cost cluster value (i.e. cluster D). The determination of process-related drivers based on operating regimes is essential to understand how resources are used and how the costs are generated at the mill. It is important to note that, compare to an approach based on steady-state detection, the results here include and are influence by the dynamic regimes of the manufacturing operations. Nevertheless, this broader view, based on the regimes identified using data mining, allows assessing the cost effectiveness of the different areas of operations. As we can see, contrary to the event-driven approaches, the identification of operating regimes is more consistent with the operations in the sense that a run can only provide limited insight on the particular operating conditions for each pulp grade produced.

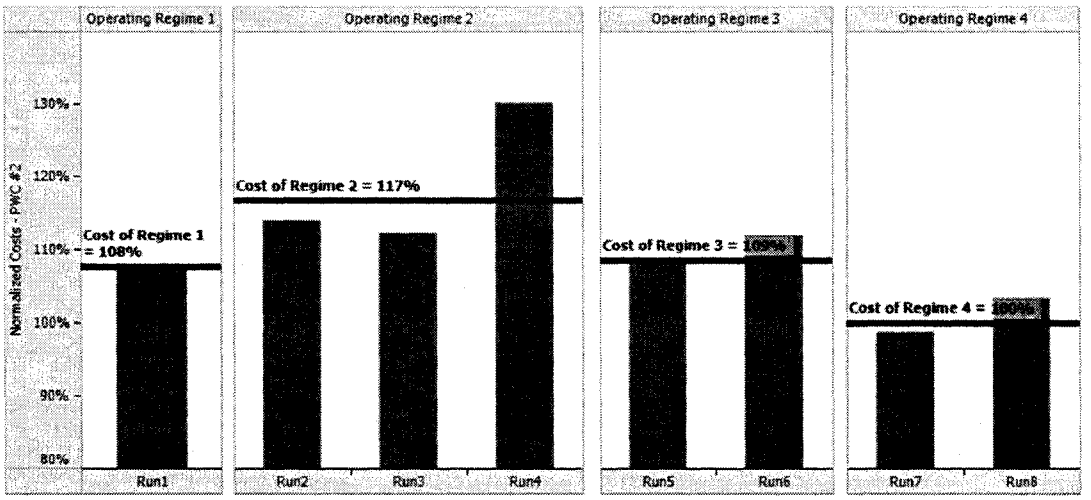


Figure 7: Operations-driven cost modeling results based on the operational patterns

IMPLICATIONS

Cost Management Level

In addition to the analytical capability allowing for the extraction of relevant information to support decision making, the operations-driven cost model provides a systematic framework that enable a multidisciplinary approach to cost management at the mill. In fact, another important benefit from this approach, that integrates process and cost data, consists in the increased visibility provided to engineers and accountants that typically have limited insights into, respectively, cost management activities and manufacturing operating conditions. Instead of relying on high-level and aggregated cost and process

data, the integration of problem specific knowledge improves the traceability of the cost within the mill's processes and provides more adequate feedback for operations management.

The following example demonstrates how the integration of process and cost data, combined with the used of advance process data analysis tools, is useful for supporting the interpretation of the results obtained using the operations-driven cost model. In fact, the cost implications of the operating regimes presented in Figure 8 can be further analyzed by looking more specifically at the energy-related aspects. For this, the sum of the specific energy applied at the primary and secondary refiners was first calculated. Based on the resulting distribution of the objects, the total energy was discretized in four categories (classes): *Low*, *Medium Low*, *Medium High* and *High*. Then, a new classification tree was created, to explain the categories, based on the attributes earlier mentioned, excluding the energy-related attributes.

A simplified (pruned) representation of the tree that was obtained is shown in Figure 9. Within each node, the different shades of grey represent the four classes aforementioned. Also, under each node, the best attribute (and the rule) used to classify the objects is indicated. The first observation that can be made is that almost all the *Low* and most of the *Medium Low* objects are explained by *Tag_1047*, which refers to the NaOH added in the chip chemical pretreatment (the first circled branch in the graph). The corresponding rule indicates that normal pretreatment operations (see the discussion in the previous section) are correlated to cost-effective refining operations. Therefore it is clear why run 7 and 8 belongs to the most cost effective cluster of operation in Figure 7. This tree also indicates that a significant amount of objects classified as *Medium Low* can be found in the situation where the pretreatment operations do not follow normal recipe conditions. This suggests that, when the impregnator is not available (i.e. the chemical pretreatment cannot be done according to the operating specifications), there exist operating conditions for which the impact on the energy cost-effectiveness can be minimized. For example, for the leaves specified on the graph (see circles #2, and #3), the set of corresponding rules obtained provides relevant indications for operations management, to maintain the cost-effectiveness of the operations.

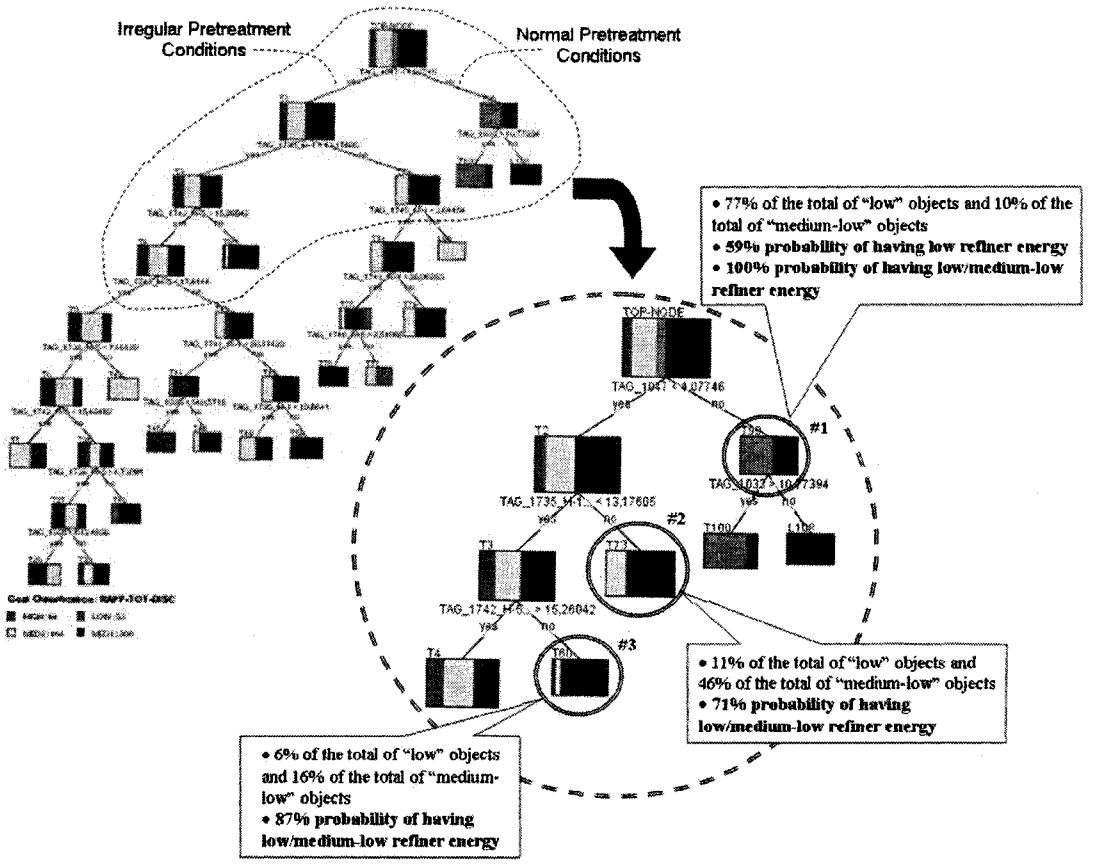


Figure 8: Cost results interpretation supported by a classification tree

Supply Chain Planning Level

Enterprise-wide optimization is recognized by large-scale continuous industries as one of the key elements to achieve operational excellence. It consists of holistic approaches that aim at the optimization (planning, scheduling and control) of the supply chain (SC) with a strong emphasis on the manufacturing operations [8] i.e. that focus on incorporating chemical engineering knowledge to better represent the process capability at the supply chain level. These approaches, mainly developed within the process systems engineering community [8; 14; 29; 30], are particularly relevant in the context of the P&P industry that faces challenge with the implementation of supply chain management practices that were initially designed for discrete-type industries. Indeed, the P&P production processes need to be thoroughly understood, and the mill and enterprise levels intergraded, for successful optimization of the SC [22]. Similar to the state-of-the-art property-based approaches for SC planning of low-margin facilities (e.g. refining, petrochemicals) [30], P&P could better represent manufacturing processes and conditions at the SC level using data-driven approaches, instead of process models based on "first principles". In fact, given its empirical nature and the convergence of plant floor-level and enterprise-level IMS, the proposed operations-driven modeling approach would be particularly suitable for supporting enterprise-

wide optimization. As demonstrated, the operations-driven cost model, that uses the data available in these systems, has the potential to reflect the current operations at the mill and thus, to provide more useful information for SC planning compared to standard recipe-based approaches. The authors think that this integration of the mill and SC levels is a key element that will help P&P companies in becoming true-low cost producers. Therefore, future research by the authors will focus on two main aspects: first, the development of a multi-scale SC planning framework to support short- and mid-term coordination of the fibre supply chain at the mill; and second, the demonstration of the advantages of integrating the operations-driven approach (descriptive model) within the multi-scale SC planning framework (prescriptive model) to better represent the manufacturing processes.

CONCLUSIONS

Information systems have been widely implemented in the pulp and paper industry and they support a variety of business functions that range from process control at the mill level to supply chain management at the enterprise level. The companies have now the capability to capture and store large amounts of data from which new and relevant information can be extracted for decision making. The on-line acquisition of process data is a common practice in mills and the utilization of these lower-level data for higher-level business-driven applications such as cost management or supply chain management is an emerging area that would benefit from the development of practical analytical methodologies. The originality of the work presented consists of the integration, in a bottom-up fashion, of historical-based process information with cost information in order to characterize the generation of direct manufacturing costs in main continuous operations such as in the pulp and paper industry. Instead of linking the resources consumed directly to the cost objects, the proposed methodology, inspired by ABC, uses process data analysis to identify and characterize the resource, process activity and *PWC* drivers of the operations-driven cost model. Also, advanced data analysis tools allow for the identification and interpretation of relevant operating regimes for cost analysis. The advantages of this approach have been demonstrated with a case study that was defined at an existing high-yield pulp mill. In addition to provide a better understanding of the mill's cost structure and an improved visibility for both process engineers and accountants, the operations-driven approach could be used as a basis for characterizing manufacturing processes for multi-scale supply chain planning. Finally, the authors think that these benefits, at the mill and enterprise-levels, may help in improving the competitive position of pulp and paper mills.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Jason Linkewich at Tembec Inc. for his support and, Paul Naliwajka at 3C Software Inc. for his advice in getting the cost model designed and built within Impact:ECS^{TM}. We would also like to thank Matty Janssen for his help throughout this project. This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chain at *École Polytechnique de Montréal*, and by a scholarship provided to Martin Laflamme-Mayer from *Le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies.*

REFERENCES

1. 3C Software. 2007. www.3Csoftware.com.
2. Apte, C. 1997. Data Mining: An Industrial Research Perspective. IEEE computational science & engineering 4(2):6.
3. Bagajewicz, M. J. 2000. Process Plant Instrumentation: Design and Upgrade.
4. Bellec, S., Jiang, T., Kerr, B., Diamond, M., Stuart, P. 2007. On-line processing and steady-state reconciliation of pulp and paper mill process data. Pulp and Paper Canada 108(6):36-40.
5. Cooper, R. 2000. Cost Management: From Frederick Taylor to the Present. Journal of Cost Management:4-9.
6. Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P. 1996. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. AI Magazine 17(3):37-54.
7. Gertosio, C. 2004. Knowledge discovery from industrial databases. Journal of intelligent manufacturing 15(1):29.
8. Grossmann, I. 2005. Enterprise-wide optimization: A new frontier in process systems engineering. AIChE Journal 51(7):1846-1857.
9. Gunasekaran, A., Marri,H.B., Yusuf,Y.Y 1999. Application of activity-based costing: some case experiences. Managerial Auditing Journal 14(6):286-293.
10. Janssen, M., Laflamme-Mayer, M., and Stuart, P. Survey of data management systems used in the pulp and paper industry. In: Corp. C, editor; 2003; Coral Springs, FL, USA. p pp. 551-554.
11. Janssen, M., Laflamme-Mayer, M., Zeinou, M.-H., Stuart, P.R. 2004. Survey indicates mills' need to exploit IT systems with new business model. Pulp and Paper 78(6):46-51.
12. Janssen, M., Naliwajka, P. Stuart, P.R. 2008. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part II: Retrofit process design application. Submitted to International Journal of Production Economics.
13. Jiang, Taiwen, Chen, Bingzhen, He, Xiaorong, Stuart, Paul. 2003. Application of steady-state detection method based on wavelet transform. Computers & Chemical Engineering 27(4):569-578.
14. Kallrath, Josef. 2002. Planning and scheduling in the process industry. OR Spectrum 24(3):219-250.
15. Kaplan, R. S. R., Anderson, S. R. 2004. Time-Driven Activity-Based Costing. Harvard business review 82(11):131.
16. Kaplan, R. S. Robert. 1988. One Cost System Isn't Enough. Harvard Business Review 66(1):61.
17. Kaplan, Robert S., Cooper, Robin. 1998. Cost & effect : using integrated cost systems to drive profitability and performance. Boston: Harvard Business School Press. xi, 357 p. p.
18. Kelly, J. D. 2005. Modeling Production-Chain Information. Chemical engineering progress 101(2):28.
19. Kusiak, A. 2000. Computational Intelligence in Design and Manufacturing.
20. Laflamme-Mayer, M., janssen, M., Naliwajka, P., Stuart, P. R. 2008. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part I: Framework for design and operations decision making. Submitted to International Journal of Production Economics.
21. Laflamme-Mayer, M., Lafourcade, S., Riemer, K., Stuart, P. R. 2008. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part III: Application for pulp and paper manufacturing operations. Submitted to International Journal of Production Economics.
22. Lail, P.W. 2003. Supply chain best practices for the pulp and paper industry. Atlanta, GA: Tappi Press. 205 p.

23. Liu, Hancong, Shah, Sirish, Jiang, Wei. 2004. On-line outlier detection and data cleaning. Computers & Chemical Engineering 28(9):1635-1647.
24. MIKON Systems. 2003 Activity Based Costing and Real Time Cost Monitoring, White Paper. 1-10 p.
25. Miller, J.G. Vollmann, T.E. . 1985. The hidden factory. Harvard business review 63(5):142.
26. Pepite Technologies. 2007. www.pepite.be.
27. Raffish, N., Turney, BB. . 1991. Glossary of Activity-based Management. Journal of Cost Management 5(3):53-63.
28. Reeve, J. M. 1991. Cost management in continuous-process environments. Journal of Cost Management (Spring):22-34.
29. Shah, N. 1998. Single- and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges. AIChE Symposium Series 320(94):75-90.
30. Shah, N. 2005. Process industry supply chains: Advances and challenges. Computers & Chemical Engineering 29(6):1225-1236.
31. Steen, Morten, Steensland, Tor. 1994. Real-time profit monitoring and activity-based cost management. TAPPI Journal 77(2):105-111.
32. Thormählen, V. Suitability of Oracle Applications for Standard and Activity Based Costing; 1998; Fellbach, Germany. p 164 -182.
33. Wirth, R., Hipp, J. CRISP-DM: Towards a Standard Process Model for Data Mining; 2000 2000; Manchester, UK. p 29-39.
34. Xu, R. 2005. Survey of clustering algorithms. IEEE transactions on neural networks 16(3):645.
35. Yeager, Bob. 1999. Costing software helps Sappi mills make the grade more efficiently. Pulp and Paper 73(12):63-66.

ANNEXE D

MULTI-SCALE ON-LINE SUPPLY CHAIN PLANNING
PART A: DECISION PROCESSES AND FRAMEWORK FOR A HIGH-YIELD PULP MILL

Martin Laflamme-Mayer and Paul R. Stuart*
NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering,
École Polytechnique - Montréal, Montréal H3C 3A7, Canada

Nilay Shah and Stratos Pistikopoulos
Centre for Process Systems Engineering, Department of Chemical Engineering,
Imperial College London, London SW7 2AZ, U.K.

Jason Linkewich
Vice-President Fibre Supply Strategy, Forest Resource Management,
Tembec Inc., Témiscaming J0Z 3R0, Canada

ABSTRACT

The Canadian pulp and paper industry generally recognizes supply chain management as key element to ensure the cost effectiveness of overall operations and competitiveness in the regional and global marketplace [1, 2]. This paper describes a multi-scale supply chain planning framework for the case of the fibre supply chain of a high-yield mill. The presentation of this work has been divided into two parts. Part A introduces the proposed framework that supports flexible capacity management in the pulp and paper industry and that takes into account the intrinsic particularities of the managerial decisions involved. It incorporates a higher level supply chain model suitable for tactical planning to find the optimal balance of fibre supply and demand throughout the year, and a lower level model for operational planning that maximizes short-term profitability given the supply chain capability and supply and demand orders. The formulation of the optimization models for each level as well as the detailed results of the implementation of this model for a test case are presented and discussed in detail in Part B. The implementation of such a supply chain decision-support model has the potential to significantly improve the competitiveness of pulp and paper mills.

Keywords: Supply Chain Planning, Mixed Integer Programming, Integrated Multi-Scale Approach, On-Line Planning, Pulp and Paper

INTRODUCTION

* To whom all correspondence should be addressed. Contact: paul.stuart@polymtl.ca

Enterprise-wide capability management is increasingly essential to ensure the competitiveness of companies. Strong global competition, increasingly demanding customers, shareholder expectations and environmental and social responsibility are some of the important factors that have motivated the process industries to improve their intra- and inter-company coordination, and consequently their supply chain efficiency and responsiveness. The fields of process systems engineering and process integration have increasingly focused on supply chain and decision support research in order to help process industries better address the planning and logistics of manufacturing operations. Grossmann [3] classifies process industries in two categories that require tailored supply chain approaches: "value preservation" industries that produce commodity products and are capital intensive, and "value growth" industries that produce new products, have intensive product-related R&D, and are capable of rapid market development. The North-American pulp and paper industry is classified in the first category, and should adopt supply chain management practices that essentially aim at improving supply chain efficiency, i.e. reduced product chain costs, in order to remain profitable and better ensure their longer-term sustainability.

In its broad sense, supply chain management consists of the design, coordination, and management of business units and flows (information, material and cash) with the aim of maximizing global profitability and competitiveness [4, 5]. Depending on the time horizon considered and the importance of the decisions to be made, three supply chain decision levels are typically distinguished: (a) the strategic level, (b) the tactical level and (c) the operational level. The strategic level usually consists of decisions that relate to the structure of the supply chain, and typically considers a time horizon of many years. It involves large investment and has a significant impact on the long-term supply chain capability. The facility location problem and the implementation of an enterprise-resource planning (ERP) system are examples of decisions treated at the strategic supply chain level. Decisions at the tactical level include the elaboration of management policies that govern short-term decisions while taking into account the fixed supply chain structure. The time horizon typically ranges from a few months to a year. Setting the appropriate safety stock policies or determining which manufacturing plant should supply which markets are examples of decisions made at the tactical level. Finally, decisions at the operational level aim to schedule specific activities, and provide detailed instructions for the execution and control of operations. The scheduling of production and the generation of delivery lists are examples of decisions at this level. This paper presents a multi-scale supply chain planning framework suitable for the pulp and paper industry, at the tactical and operational levels.

An important area of supply chain management concerns support of the decision-making process at different decision levels, and for different cycles of the supply chain. Accordingly, Shah [6] classified the supply chain problems as having three general types: (a) supply chain network design, (b) supply chain simulation and policy analysis, and (c) supply chain planning and scheduling. The work presented here concerns the last category of problem. Supply chain planning and scheduling consist of determining the optimal way of using the available resources (production, inventory, etc.) within a fixed supply chain design, in order to maximize the profitability given the external business situation. A mathematical programming approach is typically used to formulate planning and scheduling models, and to provide support to decision processes.

This work is presented in two parts. First, Part A introduces supply chain practices and research in the pulp and paper industry, describes the industrial case study and the planning processes at the pulp mill and finally, explains the multi-scale planning framework. Then, Part B provides a review of planning and scheduling approaches, presents the formulation of the proposed multi-scale model, and demonstrates the application of the framework for the selected case study.

THE PULP AND PAPER INDUSTRY SUPPLY CHAIN

The pulp and paper industry is one of the most important industrial sectors in Canada. The availability of good quality fibre, existing manufacturing infrastructures across the country, pulp and paper know-how, proximity to the US market with favorable exchange rates, and competitive energy costs have ensured the competitiveness of this industry sector for many years. However nowadays, pulp and paper companies are facing challenging times. In North America today, mature and in some cases declining domestic markets, continued overcapacity and low cost global competition is seriously affecting this industry sector's ability to provide good financial returns [7]. Moreover, with the construction of new high performing world-scale manufacturing facilities in emerging pulp and paper producer nations, the leadership position of the industry's manufacturing infrastructure in terms of technology and production capacity is no longer ensured [1]. Limited fibre availability is increasingly critical. For example, Eastern Canada must deal with one of the highest fibre costs in the world [8]. Nevertheless, with the many mergers and acquisitions over the last decade, the industry is increasingly less fragmented and despite the buying power of large customers, it is now possible to better control industry-wide capacity.

Industry leaders and other stakeholders acknowledge that the competitive position of the North American pulp and paper industry is seriously threatened. To ensure sustainable returns to shareholders and identify business and technology opportunities, three main business strategies are currently considered [9]: go for survival in commodities, buy/build in emerging markets, and diversify core business with marketing and technological partners. This large-scale commodity product and capital intensive industry, which has historically focused on the incremental improvement of pulp and paper manufacturing technologies to provide a better return, must embrace significant structural changes to again prosper. Whatever the business strategies selected, the application of supply chain management concepts will certainly play an increasingly important role within the industry [1,2].

SUPPLY CHAIN PRACTICES

While supply chain management concepts have been successfully applied in many other manufacturing industries, the pulp and paper industry has been relatively slow to adopt these new management ideas. One of the main challenges for their application is related to the understanding of how supply chain practices can be efficiently applied within the particular context of the pulp and paper manufacturing environment. Only recently, the industry has invested and put significant effort in this area. For instance, most of the companies have now implemented state-of-the-art enterprise resource planning (ERP) systems that help them better manage the order fulfillment process, and provide enterprise-wide data to support decision-making. It is increasingly recognized that supply chain management capability is a key element to protect leadership in domestic markets and/or to support growth in the global market place.

Perhaps unfortunately, especially at the mill level, pulp and paper producers are good "operators". Given the capital intensiveness of the industry, the management of the supply chain has tended to be based on capacity-focused decision-making. One of the main production objectives is simply production maximization in order to minimize costs per unit (including the fixed costs). Lail [10] provides a good review of the implications of the capacity focus paradigm for the different parts of the pulp and paper supply chain. The procurement and the management of raw material inventory in the procurement cycle are often considered of secondary importance and capacity management is of primary importance.

Decisions are made to ensure the continuity of the operations, even if the production schedule must be modified at short notice. In the manufacturing cycle, the operations manager must ensure that the overall equipment efficiency (OEE) is maximized. Thus, the aim of all the different functions at the mill, e.g. production planning, maintenance management, utilities management, waste-water treatment, etc., is primarily to support the goal of maximum production rate. Total tonnage is reported daily as the main key performance indicator (KPI). In the case of the demand cycle, the main objective is to ensure that enough orders are provided to the mill and, in some cases, even if the margins are not profitable. Moreover, because capacity-related decisions predominate, the different planning functions along the supply chain are generally not integrated, which results in poor enterprise-wide coordination (even if pulp and paper companies are often vertically integrated). Finally, it is clear that the pulp and paper industry would benefit from using a decision-making approach that integrates the manufacturing cycle within the supply chain, and provides the required visibility for enterprise-wide optimization.

SUPPLY CHAIN RESEARCH

Given the particularities of pulp and paper manufacturing processes and the limited and recent interest of companies in supply chain research, the literature on supply chain in the pulp and paper industry is limited. Specifically, there are a few papers on supply chain planning at the tactical and operational levels. Moreover, most of these papers focus on paper production and distribution (such as [11], [12] and [13] or on forest logistics (such as [14], [15] and [16]). Two papers from the Norwegian School of Economics and Business Administration (NHH) have been published that are particularly relevant to this study. The first [17] describes the operations of a Swedish pulp producer and the tools used for supply chain optimization. An interesting element provided by the authors is the mapping of the particular planning activities involved for an integrated pulp company, at each of the supply chain decision levels. Also, five case studies are presented in order to illustrate the potential for supply chain management concepts and supply chain optimization to improve the overall performance of a pulp company. For the case study company, the planning process is accomplished at different levels, similar to the approach used in this study. A higher level (yearly) plan based on forecasts is used in order to produce a rough production schedule. Then, a lower level (three-month) planning process provides detailed schedules ensuring that the deliveries are met, and that production and supply is balanced. The study underlines that coordination of the fibre flow along the supply chain is very important to ensure the profitability of the company, and that this requires the development of decision support tools to provide the necessary visibility across the chain. Details of this case study and the formulation of the models are presented in Bredström & al. [18]. In this second paper, the integrated system consists of the fibre procurement cycle, the manufacturing cycle (including three kraft pulp mills) and the distribution/demand cycle. The goal of the study was to build models and optimization methods for short-range supply chain planning, and to evaluate how these can support planners. The time horizon considered was three months, and daily supply chain decisions were made. Two different alternative mixed-integer formulations were proposed. The first consisted of a column generation approach, where each mill production plan is represented by a variable. The second approach used an explicit optimization formulation solved by the branch & bound method. In order to reduce the number of constraints considered (and thus the required computational effort), a method was employed for the aggregation of time periods corresponding to less immediate decisions. This work generally demonstrated that mathematical programming approaches for supply planning provide better results than solutions generated manually.

There are significant opportunities for the application of mathematical programming approaches to support supply chain planning and scheduling in the pulp and paper industry. The integrated planning of

the procurement, manufacturing and demand cycles is desirable to achieve good supply chain coordination, and is an important issue for market pulp mills. To date, approaches described do not systematically consider the integration of different decision levels, e.g. tactical and operational. This is an important issue that must be addressed to ensure consistency in decision-making and visibility across the supply chain. The improvement of supply chain decision support tools could be achieved by better integrating models with decision processes at each level. An online approach could help decision-makers to better respond to uncertainties and new information, which characterize the dynamic decision processes.

OBJECTIVE

The main objective of this study was to develop a supply chain planning framework that supports flexible capacity management in the pulp and paper industry. In order to provide a decision support tool suitable for on-line implementation, the approach must account for the different supply chain decision levels and the dynamic nature of the decision processes involved. Finally, the proposed planning framework was demonstrated using a case study context of an operating high-yield pulp mill.

CASE STUDY

HIGH-YIELD PULP MILL

The operations modeled consisted of the fibre procurement, manufacturing and distribution/customer cycles of a high-yield pulp mill. The aim of the case study, established with the key logistics and operations managers at the company, was to provide a tool to support tactical and operational decision-making for the management of the supply chain, given different pulp demand and fibre supply situations. Since the focus of the study was the alignment of fibre supply opportunities, production capacity and pulp requirements, the analysis was limited to the fibre supply chain of the pulp mill (i.e. aspects of the supply chain such as chemical procurement and production, energy supply chain, etc. were excluded).

The operations considered are presented in Figure 1. The fibre procurement cycle includes different fibre supply opportunities either in the form of wood chips or wood logs. For different types of pulp produced at the mill, different species ("*e*") of hardwood fibre had to be supplied in different proportions. Given the geographical location of the mill, two main regions of supply are considered, each of which includes a mix of internal suppliers, external suppliers and swap supply. Internal suppliers consist mainly of sawmills that produce wood chips as a by-product from their normal operations. Even though the sawmills are owned by the same company, they are operated independently (and focused on maximizing profitability from lumber products), and their coordination with the pulp mill can be challenging. External suppliers refer to chip and log supplies that are purchased on the market from different suppliers such as land owners, private sawmills, etc. Finally, *swap supply* refers to arrangements made with competitors in order to exchange fibre supply, primarily with the goal of reducing transportation costs. For each source of fibre, and for each type (chips or logs and wood species), there are various costs and short- and long-term availabilities that must be taken into account during the fibre procurement planning process. Wood logs delivered to the mill are stored on-site, and separated by wood species. Since the pulp mill can only process wood chips, chipping equipment is used to transform logs into wood chips. All the wood chips on-site, coming directly from suppliers and/or from the chipping process, are stored in outside piles. There can be one or more piles of chips per wood species. The pulp mill includes two similar production lines that produce high-yield pulp grades from hardwood chips. More specifically, the

manufacturing operations consist of a bleached chemi-thermomechanical pulping (BCTMP) process involving four main production steps: chemical pre-treatment, pressurized refining of wood fibres, bleaching of the pulp, and drying/finishing operations. The final product is sold to customers in the form of baled dried pulp. Different characteristics define the pulp grade ("*g*") produced: bulk, brightness and wood species. These characteristics can be modified by varying the process operating conditions, such as the type and the addition rate of chemicals and/or the specific refining energy applied to the wood fibres. The appropriate operating conditions are provided by standard recipes ("*r*"), defined for each pulp grade and production line. A transition occurs when the recipe is changed on a given production line in order to produce a different pulp grade. Sequence-dependent grade transitions are an important aspect considered for production planning. Typically, in order to minimize the cost of a transition, the operators will try to modify only one of the three grade properties (bulk, brightness or wood species) in any given transition. In the distribution/customer cycle, it is necessary to differentiate between internal and the external product demand. In the first case, pulp is mainly produced by one of the two production lines and is used by a paperboard mill, located on-site. In this case, a pipeline transports the diluted pulp to the adjacent process and there is no need for pulp drying/finishing. In the second case, pulp is produced for external demand which must be dried, and the pulp bales stored on site.

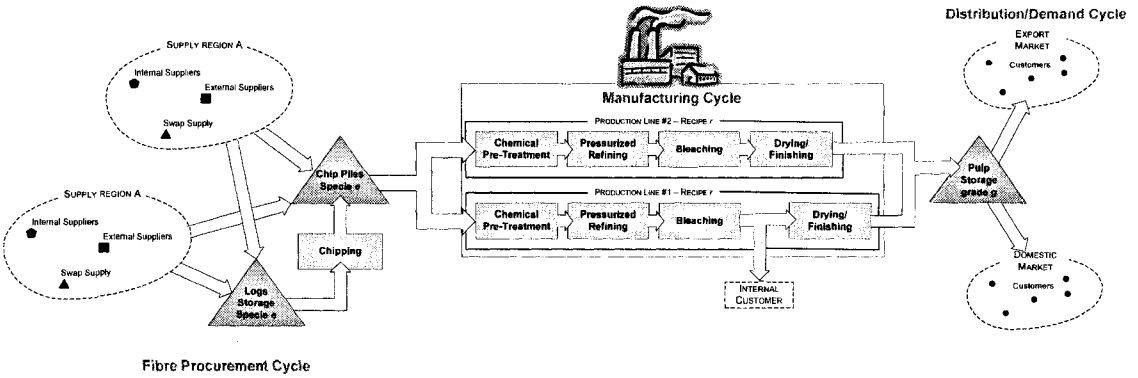


Figure 1: Fibre supply chain of the high-yield pulp mill

CURRENT PLANNING AND SCHEDULING DECISION PROCESSES

For planning and scheduling decision activities it is important to address, in an integrated way, the three cycles presented in Figure 1. The decision processes within each cycle are generally under the responsibility of different managers within the company and thus, the supply chain has the potential to be operated in "silos", i.e. with limited integration. Apart from monthly meetings, each business unit has very limited visibility across the supply chain in terms of information, actions and objectives. Under this context, it is difficult to systematically assess the impact of planning decisions in one unit on other business units, and to identify the important trade-offs and global opportunities for improved overall profitability. This is a common situation for many pulp and paper mills and it has been recognized that this leads to poor overall synchronization and sub-optimization of the supply chain [19].

Fibre procurement cycle

Fibre supply planning is an important element for the success of any pulp and paper supply chain. In

Eastern Canada fibre supply alone represents up to 30% of the total costs of the final product. In addition, the quality of the fibre is an important aspect to take into account, since it influences not only the quality of the final product but also the manufacturing costs. In this study, it is assumed that all suppliers are capable of providing fibre of satisfactory quality. The extended supply chain (including forestry and wood products related operations) and the strategic fibre supply aspects are not considered in this study. Rather, the critical issue of fibre supply and demand alignment at the mill is addressed, at the operational and tactical levels.

Fibre procurement planning is a dynamic decision-making process that must be executed at different frequencies and for different decision levels. The higher decision level typically consists of the elaboration of a yearly plan that is revised each month. This longer-term planning process is important because the lead times associated with fibre procurement are significantly longer than the lead times necessary to satisfy customer demands. At this level, the decision-maker needs to identify the most cost-effective fibre opportunities throughout the year while taking into account product demand, the supply chain capability, and the undesirable build-up of inventory. The data inputs considered for this decision level are usually available on a monthly basis, and include forecasted supply and demand, as well as expected production capacity and inventory levels in the coming months. Varying seasonal availability of fibre must also be taken into account. The outcomes of this decision process provide guidelines in terms of raw material inventory planning and supplier selection, based on incremental costs and expected availability. These are reported on a monthly or quarterly basis to the manager of the pulp mill, to discuss the alignment of fibre procurement and pulp production.

At a lower decision level, fibre procurement planning consists of getting the chips and logs on-site from the right suppliers and at the right time for pulp production. The time horizon considered typically ranges from a few weeks up to 2-3 months, and the data inputs available to the decision-maker are updated at least every week. A number of shorter-term practical issues must be taken into account. The most relevant data used for decision-making are actual purchase orders (i.e. committed delivery of chips or logs on site), planned supplier capacity per week and per wood species, estimation of current inventories, chipping capacity and planned production schedules (the chip consumption is calculated using standard recipes). The objective of this dynamic decision process is to minimize fibre costs by choosing the optimal mix of fibre (logs and chips) from suppliers and to avoid, whenever possible, fibre supply at the highest end of the incremental cost curve. In order to consider upcoming pulp mill production schedules and changes in planned fibre deliveries, the plan must be revisited every week.

Given the capacity-focus management paradigm (discussed earlier), the emphasis is on keeping the manufacturing operations running and often, raw material management is viewed as being of secondary importance [10] and not taken into account when planning for production. This usually results in a situation where the mill carries on excessive inventory of chips and logs in order to ensure the continuity of the pulp mill operations. This approach provides a simple procurement planning framework, even if it is not the optimal supply chain practice. This practice, focusing solely on the local optimization of production, is no longer acceptable in the Eastern Canadian context where high fibre cost and limited fibre availability have a critical impact on overall profitability. By simultaneously looking at the procurement, production and product demand cycles of the supply chain, it may be possible to improve the synchronization of fibre supply and demand and potentially benefit from more supply opportunities i.e. provide more "degrees of freedom" to procurement managers to ensure more cost-effective fibre supply for the mill.

Manufacturing Cycle

A common practice in the pulp and paper industry consists of maximizing the overall equipment efficiency (OEE) or in other words, the effective utilization of available capacity. This involves three important aspects. First, the maximum available time for production must be ensured by minimizing downtime losses. In the case of this particular pulp mill, this is accomplished by the implementation of good maintenance practices in order to ensure the optimal balance between time losses for planned maintenance shutdowns and time losses because of equipment breakdowns at the mill. The second aspect is the maximization of the production rate. Typically, the pulp mill will be operated at maximum capacity, and reduction in production rate will only occur in the context of production problems or for other external reasons such as energy management (in deregulated energy markets). The last element to consider is to ensure that the pulp produced always meets quality specifications i.e. saleable products. In terms of planning, this is addressed by minimizing the number of transitions between the different grades, and by making incremental process changes for new grades when possible. Different orders for the same pulp grade are generally grouped together in production campaigns. Conservative decisions are made to achieve the longest possible production campaign, considering to a certain extent the order quantities and timing. Campaign sequences and lengths can also be predefined and modified during the planning process in order to accommodate committed orders from customers. The fewer the transitions on a given pulp production line, the less will be the production of off-spec product.

More specifically, there are two main decision processes involved for the planning of the manufacturing operations. The first is campaign planning, which consists of the determination of the appropriate timing and sequencing of production campaigns on each production line of the pulp mill. It is a weekly decision process that generally considers a time horizon of approximately 2-3 months. In addition to data inputs concerning inventory levels and production capability of the mill, the decision-maker has access to two different types of product demand data: confirmed orders, which are already committed to a customer by a given date, and current orders that may vary both in quantity and time. Given uncertainty in the demand (especially for current orders) and in production (e.g equipment failure, incremental capacity reduction, off-spec production, etc.), campaign planning is a dynamic decision process that requires frequent adjustments of the production plan. Typically, the output of this decision process consists of a 3-month production plan that provides a relatively precise view of what the production will be in the first few weeks of the time horizon, and more general indications about the production of each grade in later months. Ideally, this production plan is used by other business units for their own planning purposes. The second decision process, which refers to order scheduling, may or may not be systematically integrated with campaign planning. The primary goal is to determine the allocation of confirmed and current customer orders to production campaigns. In addition to ensuring that completion dates for confirmed orders are respected, it also provides preliminary ideas of how upcoming current orders fit within the production plan. At this lower planning level, the scheduling process can be repeated on a daily basis in order to produce the final schedule of what will be produced, and for which customer. Even though there is a reduction of uncertainty at the day-to-day level, the opportunity to optimize profit is smaller since the types of decisions made will not have a significant impact on resource consumption in the mill and across the supply chain.

Two main assumptions are often made when planning, as follows:

- First, production campaigns should be defined with the goal of minimizing the total number of transitions.
- Second, given the capital intensity of the mill, the production processes should be utilized at maximum capacity.

The traditional planning approach based on this capacity-focus paradigm assumes that the optimal profitability of the supply chain occurs at optimal capacity utilization. To improve financial performance, the supply chain context must be considered in an integrated way in order to determine when production planning requires a more flexible approach to capacity management. The implementation of an integrated production planning approach that includes the fibre procurement and product demand cycles may systematically consider trade-offs within the supply chain. Such a decision support tool would not only help in the identification of the appropriate planning strategy, but also help achieve optimal management of the overall supply chain.

Distribution/Demand Cycle

The decision processes involved in determining the best way to manage capacity in order to meet product demand are complex and need to consider such factors as available production capacity, inventories, forecasted demand and expected margins. The ability to find the optimally balanced supply chain, in the particular context of an unfavorable market place, i.e. low demand and low price, has a significant impact on the company's ability to remain profitable in a difficult business environment. Typically, two different strategies are used when this situation occurs: inventory build-up and temporary capacity shutdowns. The first strategy is consistent with the capacity-focus paradigm and ensures high utilization of production capacity. It assumes that the inventory will be sold later during the year at a profitable price or at least, at a price that will minimize losses. Although capacity utilization is high, this approach involves significant risks related to the uncertainty of the evolution of demand in the longer term. This is especially true when the customers are forward-buying at a reduced price and building-up significant inventory of product. Furthermore, since this approach implies an accumulation of working capital, it may affect the financial flexibility of the company by decreasing its available cash flow. The second strategy, which consists of reducing total production capacity when the market is not favorable, represents a difficult decision to make, for social reasons and since it is counter-intuitive in the pulp and paper context. It is important to assess the real cost of idle assets, and to evaluate the trade-offs between this and expected margin scenarios. Reduction in production capacity is accomplished by a temporary shutdown (generally a few weeks) of the manufacturing processes at the mill. The rest of the time, the mill is operated at maximum production capacity.

INTEGRATED MULTI-SCALE PLANNING

Planning of fibre procurement, manufacturing and demand cycles is a complex decision-making process that is critical for the financial success of pulp producers. The decisions made should not be based on traditional managerial heuristics, but rather on supply chain profitability. The aim of the proposed planning framework is to take into account the intrinsic particularities of the managerial decisions involved in the supply chain planning in a pulp mill. As described earlier, the decision processes have different goals and thus, need to consider a different scope and time horizon. Based on the case study presented, two important levels were identified within the overall planning process, required to maximize the profitability of the fibre supply chain. In terms of managerial structure, it is critical that different decision-makers are responsible for different decision levels, each of whom have management expertise

and intimate knowledge of different parts of the supply chain. Therefore, a planning approach should provide an overall structure that guides the decision-makers at each of the decision levels in an integrated manner, to ensure visibility across the supply chain and across different management levels. In this context, integrated hierarchical planning approaches are particularly useful to describe corporate decision and business processes, and to provide decision support required for planning and scheduling [20].

It is necessary to consider that the decision processes are repeated with different timing and frequency in order to account for changing situations and unexpected events. When planning decisions are made, not all relevant information is available to the decision-maker who must consider a mix of historical, current and forecasted data. Over time, new information becomes available to the decision-maker that can be used to adjust and improve the production plan. Also the decision-maker constantly faces new events (such as order modifications, supply issues, unexpected shutdown, etc.) and needs to react to the new situation and determine the best plan considering the degrees of freedom (i.e. the decisions that have been made and can not be changed). Online planning approaches are required to systematically account for the dynamic nature of real-world decision environment and to provide reliable planning and scheduling decision support.

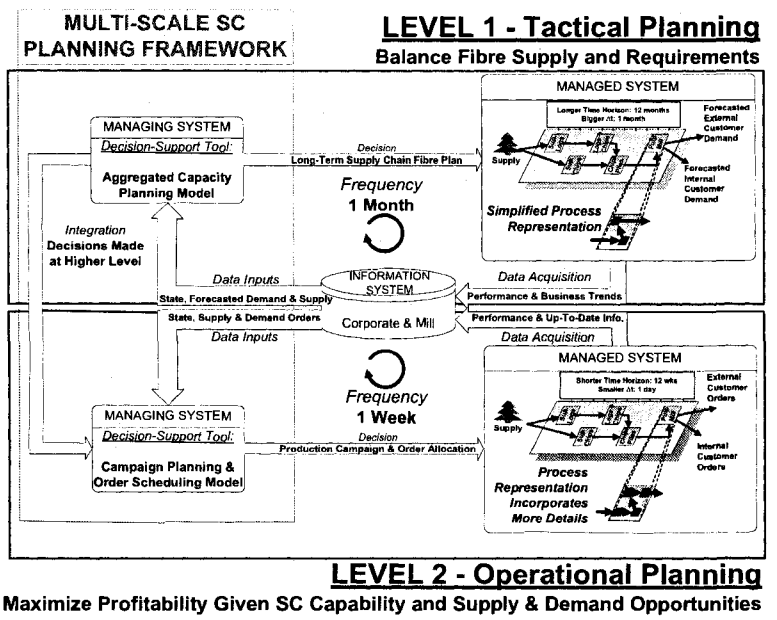


Figure 2: Representation of the online multi-scale planning approach and its integration within the organizational structure.

The organizational structure and the proposed online multi-scale planning framework is summarized schematically in Figure 2. The integrated hierarchical approach ensures the consistency between different supply chain decision levels; the higher level (Level 1 above) is suitable for tactical planning, and the lower level (Level 2 above) for operational planning. The management paradigm, as discussed by [21], can be used to describe each planning level. The proposed management paradigm includes three

important elements in Figure 2: the managed system, the information system and the managing system. The managed system consists of the elements at the supply chain that are relevant to consider, for the goal and scope of each planning level. In other words, the level of detail must be consistent with the decision level and include the aspects of the supply chain which the manager has control over. The second element of the management paradigm refers to the enterprise and mill information systems that help to acquire and manage the data. Various types of data, coming from both internal (e.g. inventory levels) and external (e.g. customer orders) sources, are available to describe the state of the managed system. Using systematic methods and tools, it is possible to analyze these data and provide valuable information for decision-making. Finally, given the data inputs available, the managing system aims at making decisions that will guide the managed system to maximum performance.

The proposed online multi-scale planning framework is a tool that provides decision support for the managing systems at each decision level and also, considers the overall organizational structure described by the management paradigm. An aggregated capacity planning model is formulated at the higher level in order to determine the long-term optimal fibre supply and demand balance. At the lower level, a campaign planning and order scheduling model is used to maximize the profitability of the pulp mill supply chain given manufacturing capability and supply and demand orders. The integration between the models is ensured by two types of information flow. First, from bottom to top, it should be ensured via the information systems, that the data inputs used by the higher level model are consistent with the up-to-date detailed information available at the lower level. Second, from top to bottom, selected results obtained from the higher level model are provided to the lower level in order that a longer-term perspective is accounted for.

The planning models at Levels 1 and 2 (Figure 2) are formulated as mixed-integer linear programming problems with a discrete time representation. They allow flexibility for the modeling of different planning and scheduling aspects, however a large number of binary variables and constraints need to be defined. This combinatorial problem, classified as an NP-hard problem (i.e. that can not be solved in polynomial time), is difficult to solve and typically involves a lot of computational effort. It is well recognized that one of the challenging aspects of optimization-based approaches for the formulation of planning and scheduling problems is to find the best trade-off between model complexity (i.e. keep the size of the model within reasonable limits) and model accuracy (i.e. represent key issues relevant for decision-making). In fact, according to [20, 22], simplification, approximation or aggregation strategies are often a necessary approach to solve industrial planning and scheduling problems efficiently. Consequently, in addition to providing a framework consistent with the business processes and decision levels involved in the planning of the pulp mill, the proposed approach separates the overall problem into (i) a detailed model with a smaller time horizon and (ii) an aggregated model with a longer time horizon, thereby constituting an optimization approach that ensures that the problem can be solved within a reasonable amount of time.

LEVEL 1- AGGREGATED CAPACITY PLANNING

The aggregated capacity planning model provides *tactical* supply chain decision support and is primarily used by fibre procurement managers. It considers a time horizon of one year, uses a time step of one month, and is reviewed on a monthly basis. Since the scope of the Level 1 problem consider a longer time horizon, a more simple representation of the managed system can be used. The higher level model is essentially a time aggregation of the lower level problem, in which the principal constraints considered are capacity, continuity (mass balances), and assignment constraints defined for each month. The cost

structure used is simplified, specifically concerning inventory and batch-level costs, but the most important cost elements are still considered within the formulation. In order to ensure that the inventory cost always has a lower bound, a method has been developed to calculate the minimum average inventory level possible for a given aggregated period. Even though the formulated model is simple enough to reduce overall mathematical complexity, it provides sufficient detail to support tactical decisions. For the first three months of the time horizon, precise information about supply and demand orders are available from Level 2 via the information system. This type of order information is not defined on a monthly basis, but rather has time windows that can potentially span across multiple one-month time periods. Therefore, a different representation is used to describe the demand across these aggregated periods.

Finally, the result provided by the Level 1 model consists of a long-term fibre management plan that corresponds to the optimal balance of fibre supply and demand along the supply chain of the pulp mill. The capacity at the pulp mill is optimized in order to maximize long-term profitability, considering the expected product demand trends and expected margins. The optimal capacity management plan is given by the total number of days of production for each pulp grade and each production line. The optimal fibre supply and inventory management plan is also determined as a function of the requirement at the mill, and the evolution of fibre supply cost and availability throughout the year.

LEVEL 2- CAMPAIGN PLANNING AND ORDER SCHEDULING

A campaign planning and order scheduling model is used in Level 2 for operational planning. It provides decision support for the production planner at the mill, and aims at finding the optimal production campaign and allocation of orders. At this level, the time horizon considered is shorter – three months – and the time step is one day. Contrary to the higher level, precise data inputs are employed for decision-making. Supply and demand orders are used instead of forecasted information to determine the production plan. Although known orders are considered, there is uncertainty in the data used for decision-making. Not all orders are known for the entire time horizon and they become, as mentioned earlier, gradually available. We distinguish two types of customer orders. First, "current orders" are known but are still subject to modifications in terms of pulp grade, quantity and/or time window requested. The second type, "confirmed orders", are considered to be fixed (i.e. there is no uncertainty). In order to be consistent with the decision process that takes into account new and modified data inputs to generate the appropriate plan, the Level 2 model is used on a weekly basis. Each week, the state of the managed system is updated, new order information is incorporated and the time horizon considered is advanced by one week.

The decisions that need to be made at this level require a more exact representation of the managed system. In fact, detailed capacity and assignment constraints are used respectively to represent the limitations of the resources available and the decisions that need to be made such as the production of a given recipe during a particular time period. In addition, constraints are also introduced to represent logical conditions within the operations such as sequence-dependent transitions. The inventory mass balances, from one period to the other, are ensured by continuity constraints defined for each day. Also, the timing of opportunities such as the time window requested by a customer for a given order, are also taken into account. These detailed constraints, defined for each day, ensure that the manufacturing capability is well represented. Although this increases the modeling complexity, it is compensated by the reduction in the length of the time horizon considered (only three months).

Given the resolution considered, more data inputs are also necessary to define the state of the managed system and especially, the manufacturing processes. Ideally, the information required results from a systematic process analysis that ensures a reliable characterization of the manufacturing operations. Similarly, the cost structure used should be transparent and consistent with the process analysis. The relevant cost drivers need to be identified and their representation within the model should be supported by a good understanding of how they are affected by the decisions made.

The results provided by the model in Level 2 maximize the profitability of the pulp mill supply chain, given the supply and demand orders available. More specifically, it allows the mill to determine the most cost-efficient sequence of production, to identify low incremental cost fibre suppliers and to select high margin customer orders. Also, the model provides the optimal allocation of the selected orders within the production campaigns, and can be used to suggest or negotiate, in the case of current orders, the appropriate timing with the customer.

INTEGRATION OF THE DECISION LEVELS

The integration of Level 1 with Level 2 is of considerable importance because campaign planning and order scheduling cannot be done with confidence without taking into account both short- and long-term inputs. Any short-term capacity planning decision (such as reduction of production capacity or a temporary shutdown) made using data inputs based on actual orders, has to also take into account the expected demand in the following months. The right decisions must be taken in order to maximize current profitability, while not compromising the ability to maximize profitability in the future. With proper integration, the higher level provides indications that allow the lower level model to indirectly account for future supply and demand trends, without having to extend the time horizon of Level 2. In order to explain the integration strategy and the flows of information between the levels, it is necessary to explain the sequential steps required when using the full-scale integrated model.

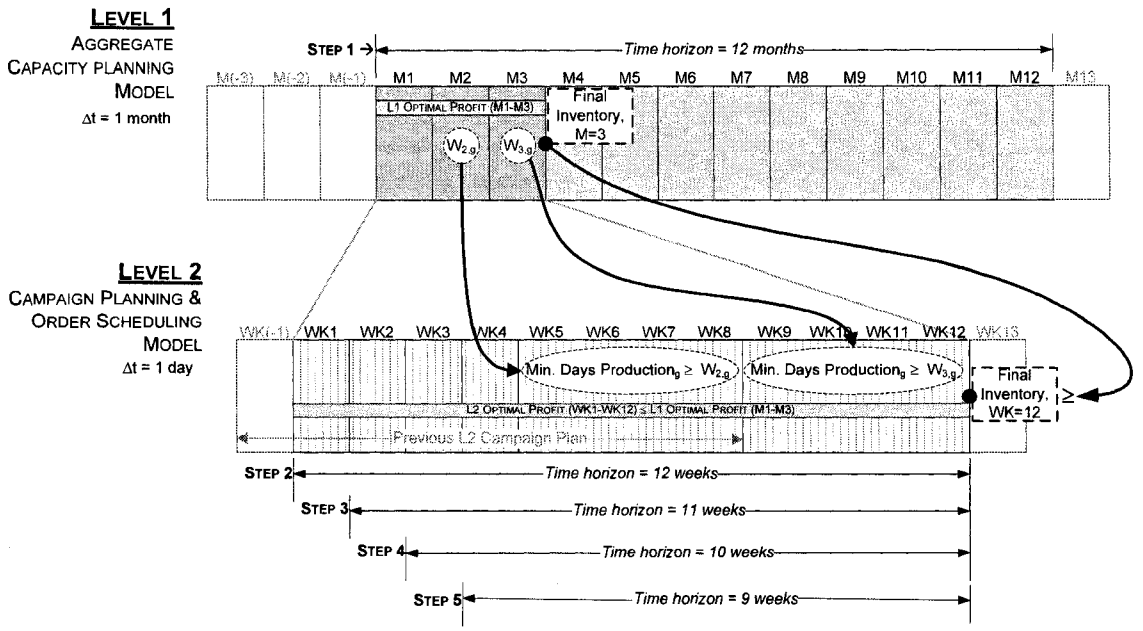


Figure 3: Application of the multi-scale framework for a given month; integration of level 1 and level 2 models.

Figure 3 illustrates the application of the multi-scale framework. The first step consists of running the aggregated model, with forecasted data inputs, for the months *M1* to *M12*. In order to ensure the highest consistency possible between the first three months of Level 1 and the corresponding months at the lower level, the current state of the managed system and the forecasted data used for *M1* to *M3* needs to be based on precise information available at Level 2 (e.g. orders, shutdowns, etc). If the short-term supply chain capability or business environment are misrepresented, then the indications provided by the higher level model will not be reliable and will in turn introduce distortion in the lower level model. Then, the second step consists of running the Level 2 model for weeks *WK1* to *WK12* given the supply and demand orders available and the detailed data inputs that describe the current state of the system. For each week of the current month (Step 3, 4 & 5), the level 2 model is run with up-to-date data inputs. Since *WK12* remains the final week each time the model is run, the time horizon considered shrinks from 12 to 9 weeks. This approach is used in order to ensure the consistency between the detailed model and the availability and resolution of the information coming from the higher level model.

Three types of information are integrated from Level 1 into Level 2. First, the inventory levels (for pulp, chips and logs) at the end of the third month (*M3*) are used as inventory targets at the end of the time horizon for each run at Level 2. Since these inventory targets are determined based on yearly data inputs at the aggregated level, they enforce the detailed level to be consistent with the expected long-term product supply and demand forecast. The second type of information that is integrated is the number of days of production per month for each pulp grade, and for each production line. Given that customer orders are not known fully in advance, the orders associated with the second and the third month may not correspond to the forecasted demand. Therefore, the number of days of production determined in Level 1 is used to enforce the production of each grade. Assuming that precise product demand information is

available for the first four weeks of the planning horizon at Level 2 (i.e. the orders are known), it does not make sense to enforce this condition and thus these constraints are only applied for the second and third months.

Under certain conditions, it can be demonstrated that mathematically, the aggregated model formulated is a relaxation of the detailed planning problem. In addition to providing a certain level of confidence in the consistency between the models, it is ensured that the optimal value of the objective function of the aggregated model will always provide a valid upper bound (for a profit maximization problem) to the profit calculated at the lower level. Therefore, the third type of information that is integrated is the value of the objective function of the Level 1 model, calculated for the three first months. This additional information may be used to solve the Level 2 model more efficiently.

RESULTS & IMPLICATIONS

The formulation of the optimization models for each level as well as the results of the implementation of this model for a test case are presented and discussed in detail in Part B of this paper. The case used to test the application of the multi-scale framework was constructed based on data from an industrial partner. Moreover, variations of this initial test case were also analyzed in order to further characterize the proposed model. Over the range of scenarios considered, the developed multi-scale planning framework provides feasible and good quality solutions at both the higher and lower levels. At the higher level, since the supply chain capability is less constrained and the representation of some cost elements is simplified, the results are to a certain extent optimistic when compared to the lower level. Nevertheless, the level 1 model provides good results in terms of balancing the yearly fibre flow along the supply chain. Given the flow of information between the two levels, the results demonstrated that the lower level model takes into account the longer-term issues when making shorter-term decisions. Figure 4a, for example, indicates the optimal pulp inventory required in order to realize the most benefits from the strong pulp demand of periods 4, 5, 6 & 7. In this particular case, the pulp inventory levels of the third time period are one of the most important indications provided by the higher-level to the lower-level model. This may lead to a situation where the short-term plan at level 2 provides a diminished profit (e.g. the total supply of fibre is greater than what would be strictly required by looking only at the short-term perspective) that would result in a maximization of the overall long-term profit. Finally, the results also demonstrate, in Figure 4b, the advantage of the synchronization of the approach with the dynamic decision process. The online multi-scale framework allowed us to systematically adapt the plan as new information became available.

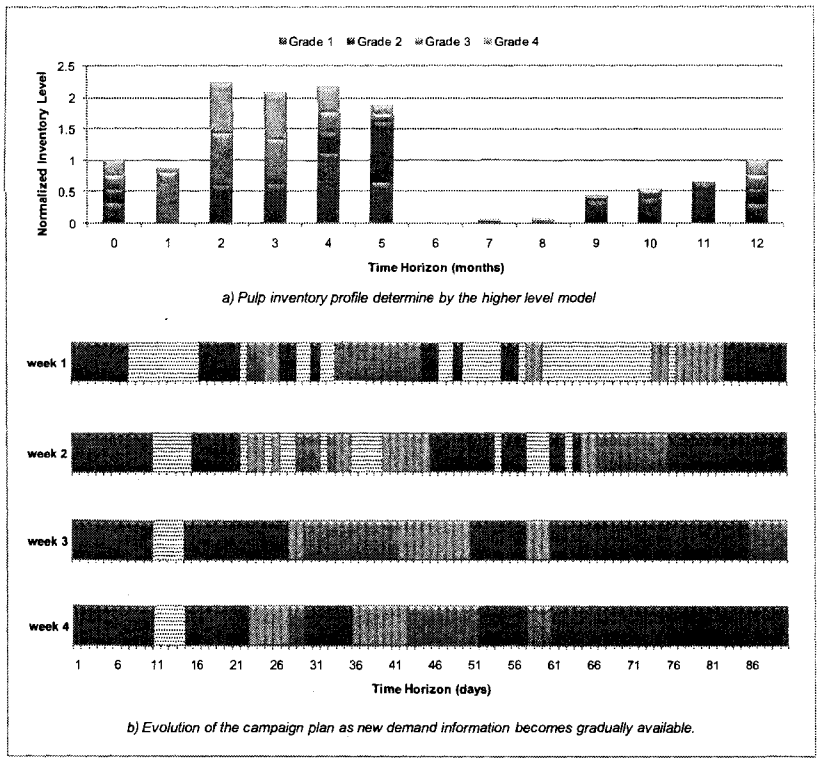


Figure 4: Example of results of the multi-scale on-line supply chain planning approach

The multi-scale supply chain planning framework presented in this paper has the following advantages:

- Despite the availability of supply and demand inputs, supply chain planning in the pulp and paper industry must consider uncertainty and the dynamic nature of the manufacturing processes. Various production incidents must be addressed each day by the operating crew (such as unplanned shutdowns, deviation from production plan, environmental limitations, etc.). Unfortunately, there are relatively few tools available to assist them in making the correct scheduling decisions following these events. Since the proposed decision-support tool integrates manufacturing processes at the supply chain level, it provides a systematic way to determine how these incidents should be managed in the supply chain context. For example, how should the mill react (i.e. find the optimal modification of the planning) following an unplanned shutdown that occurs at the end of a production campaign? Should maintenance activities be performed, and then the current campaign completed after start-up, or should they re-initiate the campaign as soon as possible? What are the implications for each option, from fibre supply through to pulp demand?
- New decision support tools for planning must take into account managerial structure and provide visibility across the supply chain. The proposed approach ensures consistency, not only along the supply chain, but also between the different hierarchical decision levels. This "bi-directional" integration takes into account the impact of local decisions on the overall supply chain and the interactions between long-term and short-term decisions. This is a key issue in pulp and paper mills,

and will help to break-down "silos" between different business units, as well as between the mill and corporate management.

- The overall supply chain planning problem has been separated into two parts consistent with the different decision levels. Each model should be under the responsibility of the manager at each level. Given the data intensiveness of the proposed approach, this ensures the quality of the data used and also, that the models can easily be maintained. Moreover, it ensures that the users of the models have the knowledge and the expertise required to analyze and validate the results obtained, at each level.
- The proposed models integrate fibre supply, pulp demand and a representation of the manufacturing processes. They have the flexibility to adjust production rates and to consider for example the impact of temporary mill shutdowns. Given the historical capacity focus of the pulp and paper industry, common industrial heuristics should be verified with the proposed integrated approach for different supply and demand contexts, in order to identify when capacity-focus or flexible capacity management strategies should be followed.
- An interesting extension to this work could be to integrate the multi-mill perspective in order to benefit from even more degrees of freedom, especially in terms of manufacturing capacity, that may lead to greater supply chain profitability. For instance, in the situation where the overall capacity should be reduced, the extended model would also have to determine which mill should reduce capacity to maximize the overall profits. It is expected that a multi-mill model, as examined by Bredström & al. [18], will lead to additional challenges in terms of computational efforts required to solve the problem and thus, necessitate modification of solution algorithms developed in this study.
- Since product demand and manufacturing capability are not considered fixed within the models, there are more degrees of freedom to optimize short- and long-term fibre procurement. Although the proposed decision support tool has the flexibility to adjust the capacity of the pulp mill, it considers a fixed set of recipe-type manufacturing conditions. Further improvements of the supply chain profitability could be achieved if the operating conditions (not just the capacity) of the manufacturing process could be optimized in order to further accommodate supply opportunities. A *property-based approach* has been used for instance in the petroleum industry [6], however would necessitate in-depth understanding of manufacturing process capability. Given the empirical nature of pulp and paper manufacturing processes (i.e. they are difficult to characterize using first principle models such as the case in the petroleum industry), an *operations data-driven approach*[23-25], based on the analysis of process data available from online process information management systems, would be particularly suitable to support such an approach.

CONCLUSIONS

The Canadian pulp and paper industry generally recognizes that the management of the supply chain is a key element to ensure the cost effectiveness of overall operations and thus, competitiveness in the regional and global marketplace. However limited information is available to help the industry understand advanced issues related to supply chain planning, especially at the tactical and operational levels. This paper describes a multi-scale supply chain planning framework for the case of the fibre supply chain of a BCTMP mill. It incorporates a higher level decision-making supply chain model suitable for tactical planning to find the optimal balance of fibre supply and demand throughout the year, and a lower level decision-making model for operational planning that maximizes short-term profitability given the supply chain capability and supply and demand orders. The framework is designed to synchronize the use of the models with critical dynamic decision processes. Given that the overall planning problem has been addressed with a hierarchical structure, with adapted models for each level,

the optimization can be performed in a reasonable computational time. The proposed decision-support tool integrates manufacturing processes at the tactical and operational supply chain levels, and provides a systematic way to balance the fibre demand across the production processes, and determine important issues such as how production incidents should be managed in the supply chain context. Implementation of such a supply chain decision-support model has the potential to significantly improve the competitiveness of pulp and paper mills.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chair at École Polytechnique de Montréal, and by the Centre for Process Systems Engineering at Imperial College London. Martin Laflamme-Mayer is supported by a scholarship provided from *Le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies*. The authors wish to thank in particular Kevin Riemer and Matty Janssen for their expert advice throughout this project.

LITERATURE CITED

1. Eamer RJ. The road to recovery facing the brutal facts. Paper presented at: International Finance Forum for the Pulp, Paper, and Allied Industries; February 2003, 2003; Atlanta, USA.
2. McLean S. Finding strategic advantage through SCM. *PPI.* 1999;41(10):28.
3. Grossmann IE. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. *Computers & Chemical Engineering.* 2004;29(1):29-39.
4. Ayers JB. *Making supply chain management work : design, implementation, partnerships, technology, and profits.* Boca Raton, FL: Auerbach Publications; 2002.
5. Stadtler H, Kilger C. *Supply chain management and advanced planning : concepts, models, software, and case studies.* Berlin ; New York: Springer; 2000.
6. Shah N. Process industry supply chains: Advances and challenges. *Computers & Chemical Engineering.* 2005;29(6):1225-1236.
7. McNutt J, Cenatempo D, Kinstrey B. State of the North American Pulp and Paper Industry. Paper presented at: 2004 TAPPI Paper Summit - Spring Technical and International Environmental Conference, May 3-5 2004, 2004; Atlanta, GA, United States.
8. FPAC. *Annual Review.* Ottawa, Canada: Forest Products Association of Canada (FPAC); 2006.
9. Orzechowska A. Saving the Canadian industry: Discussing possible solutions. *Pulp and Paper Canada.* 2005;106(1):25-27.
10. Lail PW. *Supply chain best practices for the pulp and paper industry.* Atlanta, GA: Tappi Press; 2003.
11. Sesh M, Rama A, Richard G, Pinar K, et al. Cooperative multiobjective decision support for the paper industry. *Interfaces.* 1999;29(5):5.
12. Chauhan SS, Martel A, D'Amour S. Roll assortment optimization in a paper mill: An integer programming approach. *Computers & Operations Research.*In Press, Corrected Proof.
13. Rizk N, Martel A, D'Amours S. Multi-item dynamic production-distribution planning in process industries with divergent finishing stages. *Computers & Operations Research.* 2006;33(12):3600-3623.

14. Hultqvist D, Olsson, L. Optimization of raw material procurement at pulp and paper mills - the influence of weather-related risks. *International Journal of Systems Science.* March 2006;37(4):253-269.
15. Beaudoin D, Lebel, L., Frayret,J-M. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research.* January 2007;37(1):128-140.
16. Maness TC, Norton SE. Multiple period combined optimization approach to forest production planning. *Scandinavian Journal of Forest Research.* 2002;17(5):460-471.
17. Carlsson DR, M. Supply chain management in forestry - Case studies at Sodra Cell AB. *Supply Chain Management and Advanced Planning European Journal of Operational Research.* 2005;163(3):589-616.
18. Bredstrom D, Lundgren JT, Ronnqvist M, Carlsson D, Mason A. Supply chain optimization in the pulp mill industry - IP models, column generation and novel constraint branches. *European Journal of Operational Research.* 2004;156(1):2-22.
19. McLean SR. Supply chain management for pulp and paper companies. Paper presented at: PPI's First Latin American Congress, 1999; Sao Paolo, Brazil.
20. Stefansson HJ, Pall. Shah, Nilay. Integration of multi-scale planning and scheduling problems. Paper presented at: 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering July, 2006; Germany.
21. Van Der Vorst JGAJ. *Effective Food Supply Chains - Generating, Modelling and Evaluating Supply Chain Scenarios* Wageningen University; 2000.
22. Engell S, Märkert, A., Guido, S., Schultz, R., Schulz, C. Online scheduling of multiproduct batch plants under uncertainty. In: Grötschel M, Krumke SO, Rambau J, eds. *Online optimization of large scale systems.* Berlin ; New York: Springer; 2001:xii, 801 p.
23. Janssen M, Naliwajka, P. Stuart, P.R. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part II: Retrofit process design application. *Submitted to Int'l J. Production Economics.* 2008.
24. Laflamme-Mayer M, Janssen, M., and Stuart, P. R. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part I: Framework for design and operations decision making. *Submitted to Int'l J. Production Economics.* 2008.
25. Laflamme-Mayer M, Riemer, K., Stuart, P. R. Development of an operations-driven cost model for continuous processes - Part III: Application for pulp and paper manufacturing operations. *Submitted to Int'l J. Production Economics.* 2008.

ANNEXE E

MULTI-SCALE ON-LINE SUPPLY CHAIN PLANNING PART B: MODEL FORMULATION AND TEST CASE RESULTS

Martin Laflamme-Mayer and Paul R. Stuart*
NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering,
École Polytechnique - Montréal, Montréal H3C 3A7, Canada
Nilay Shah and Stratos Pistikopoulos
Centre for Process Systems Engineering, Department of Chemical Engineering,
Imperial College London, London SW7 2AZ, U.K.

ABSTRACT

The Canadian pulp and paper industry generally recognizes supply chain management as key element to ensure the cost effectiveness of overall operations and competitiveness in the regional and global marketplace. The presentation of this work has been divided into two parts. Part A introduces the multi-scale supply chain planning framework, for the case of the fibre supply chain of a high-yield mill, that supports flexible capacity management and takes into account the intrinsic particularities of the managerial decisions involved. Part B describes the optimization models for each decision level, formulated as mixed-integer linear programs with a discrete time representation, and the appropriate integration strategy. The models are run with a receding time horizon where each time, the state of the managed system is updated and new information is incorporated. By systematically analyzing the formulations, it is demonstrated that the higher level model is a relaxation of the lower level. Finally, the detailed results of the implementation of this framework for a test case are presented to show the value of the multi-scale on-line approach for a real-world application in the pulp and paper industry.

Keywords: Supply Chain Planning, Mixed Integer Programming, Integrated Multi-Scale Approach, On-Line Planning, Pulp and Paper

INTRODUCTION

Pulp and paper is a large-scale commodity product and capital intensive industry. In North America, this industry sector is facing difficult times, in particular due to mature and in some cases declining domestic markets, continued overcapacity and low cost global competition. In response to this situation, this industry, which has historically focused on the incremental improvement of manufacturing technologies to provide a better return, must embrace significant structural changes to again prosper. Within the industry, the application of supply chain management concepts is increasingly recognized as a key element to protect leadership in domestic markets and/or to support growth in the global market place.

* To whom all correspondence should be addressed. Contact: paul.stuart@polymtl.ca

For large process industries such as pulp and paper, a tighter integration of operations at the plant level is required in order to fully address the enterprise and supply chain optimization [1]. Since decision making at the enterprise and plant levels tend to be uncoupled, the identification of enterprise-wide trade-offs and the coordination of the various business functions and activities is often challenging. Figure 1 illustrates the combined process control hierarchy and supply chain decision levels. In process industries, each level has a significant impact on the overall success and profitability of process operations. Decision support tools need to take into account the bi-directional communication between the levels; the higher levels set goals for the lower levels and the lower levels communicate constraints and performance information to the higher levels.

The integration of information and the elaboration of decision support tools to manage the complex trade-offs across the various supply chain subsystems and decision levels, are key elements of enterprise-wide optimization [2]. Given the implementation of enterprise resource planning and plant-wide information management systems, a vast amount of valuable business and process information is now available to support decision making. Since the development of sophisticated and tailored analysis methods and tools is still required in the pulp and paper industry, the potential value of using this information for better business process analysis and supply chain optimization is not yet fully realized [3]. Given the importance of the manufacturing cycle for continuous process industries, improved performance of supply chain operations could be achieved with the development of practical and "bottom-up" decisions support tools, i.e. to better represent manufacturing processes at the supply chain level using process data and knowledge.

For convenience, the presentation of the work is done is two parts. The pulp and paper supply chain context, the high-yield pulp mill case study, including a discussion on the planning and scheduling decision processes, and the description of the proposed multi-scale supply chain planning framework have been presented in Part A. This paper (Part B) contains four main sections: the first part provides a review of supply chain planning and scheduling in process industries, the second part summarizes the case study considered and the proposed multi-scale framework, the third part presents the mathematical formulation of the overall problem as well as the integration of the two levels and the characterization of the aggregation and finally, the fourth part discusses the results obtained for the test case.

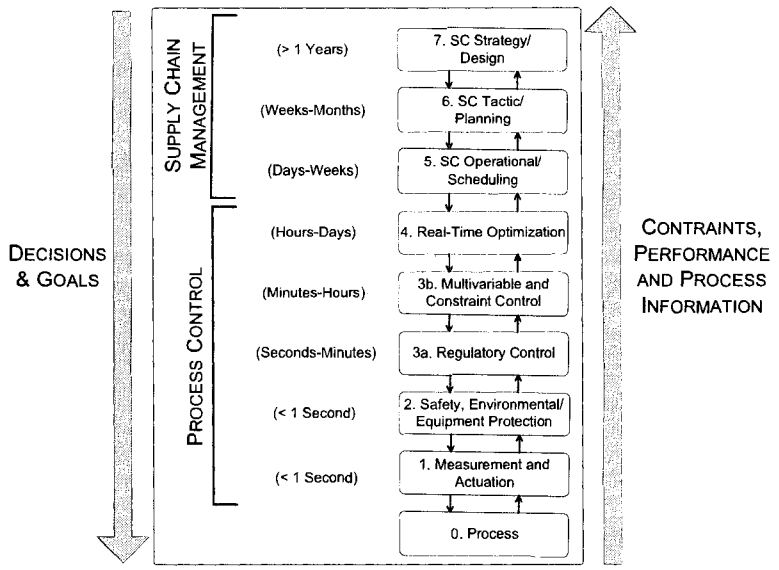


Figure 1: Control and SC decision levels (adapted from [4] and [5])

SUPPLY CHAIN PLANNING AND SCHEDULING

Planning and scheduling is an important activity for short- and medium-term enterprise-wide management. The goal is to determine the optimal way of using the available resources within a fixed supply chain configuration in order to maximize the performance given the external business situation [6]. Earlier reviews [6-9] showed that a vast amount of literature is devoted to planning and scheduling for the process industry. Since they provide a holistic view of the trade-offs that need to be considered, mathematical programming techniques are widely use to formulate and solve planning and scheduling problems, and to elaborate decision support tools. One of the main advantages of these techniques is that for convex problems the optimal solution, or at least bounds on the optimal solution, can be obtained; for complex large-scale problems, it may nevertheless be challenging to find a feasible solution in a reasonable time [10].

Typically, planning is an enterprise-level function that aims at coordinating activities across the supply chain (procurement, manufacturing, demand cycles) and also, at setting the appropriate operating performance targets [11]. It often considers aggregated data inputs (e.g. demand forecasts per major product family) and a time horizon that ranges from a few months up to a year. Planning models are usually formulated as MIP problems that can be solved efficiently using state-of-the-art commercial solvers [9]. At the plant level, scheduling is concerned primarily with the timing and volume of activities that need to be performed to meet performance objectives [11]. At this level, although the scope considered is more limited (i.e. the time horizon ranges from a day up to 2-3 months), significantly more details are considered in the formulation e.g. the time is measured in smaller units, demand is precisely defined and a more exact representation of the manufacturing processes is used [12]. Given that the complexity of scheduling problems can be challenging, a combination of optimization models and logic expert systems are sometimes used for real world applications [9, 13]. It is important to note that, since planning and scheduling often overlap in organizations, the difference between these activities is not always clear.

All planning and scheduling formulations can be classified according to their model representation of time, i.e. discrete-time or continuous-time models. The former refers to models where the time horizon is uniformly divided into time intervals of equal duration and where events occur at the boundaries of these time intervals [8]. This approach allows flexibility for the modeling of different planning and scheduling aspects. However, especially when the time horizon and/or the problem size increases, a large number of binary variables and constraints need to be defined which leads to large combinatorial problems that are difficult to solve [10]. In the case of continuous-time models, events can occur at any point in the continuous time domain, which usually results in more complicated model structures but also in much smaller problems that require less computational effort [8]. As highlighted by [10, 14], it is not trivial to decide which time representation will perform better in a given context and there is no general agreement on which approach is more suitable for planning and scheduling in the process industry.

Since the management at the enterprise (planning) and plant levels (scheduling) are closely related, it is necessary to systematically incorporate them in order to efficiently address the overall supply chain planning problem. Proper integration between these levels is required to ensure the consistency of the decision making processes and the interactions between these levels. In the context of enterprise-wide optimization, the integration of planning and scheduling is one of the main challenges in developing analytical tools to support decision making and ensuring coordination across decision levels [2].

In most cases, it is very difficult to solve full-scale planning and scheduling problems using a single detailed integrated model covering both decision levels. Therefore, to overcome this complexity, there is a need for optimization and formulation strategies to solve integrated problems with computational time of practical interest. Three commonly used strategies have been presented by [2]. First, decomposition algorithms that represent the original problem by a master problem and a sub problem have been used for difficult large-scale problems (e.g. [15]). The second strategy consists of the aggregation of later time periods. In this case, the total time horizon is divided in two time blocks: a first period where the detailed scheduling is done and a second period for planning that covers the remaining of the time horizon. Since the state of the scheduling model at the end of the first period is equal to state of the planning model at the beginning of the second, the continuity of the overall problem is ensured (e.g. [16]). Finally, the rolling horizon approach is used to treat integrated problems that are otherwise too large to solve in a reasonable computational time. Again, a detailed time block and an aggregated time block are defined. The procedure consists of a sequence of iterations where, each time the scheduling and aggregated problems are solved, some variables of the detailed time block are fixed to their optimal values for subsequent iterations. As more and more periods are fixed, the size of the aggregated time block decreases. The iterations are repeated until the schedule is obtained for the whole time horizon (e.g. [17]).

Even though there is a significant amount of literature on planning and scheduling, the integration of different problems or the integration of the same problem across different decision levels are less often discussed [18]. Also, similarly to the case of spatial integration where simultaneous optimization approaches often lead to centralized systems [2], "monolithic" optimization approaches for the integration of planning and scheduling (temporal integration) can lead to centralized frameworks across the decision levels. This does not acknowledge the typical hierarchical nature of decision making in organizations. Planning and scheduling is typically performed in two sequential phases [12] and each level of decision making implies different sets of specific issues, e.g. particular goal, scope, decision

making frequencies, type of data inputs and type of management. Hax and Meal [19] argue that hierarchical systems are more desirable than detailed integrated approaches (even if the computational capability would have been sufficient at that time) because they provide support and involve the managers at each decision level. Even recently, given their consistency with the common hierarchical nature of decision making processes, the advantage of integrated multi-scale approaches for supply chain planning and scheduling problems is widely recognized [20]. Some of the important characteristics of a hierarchical decision making framework are: 1) it ensures coordination across the decision levels, 2) it provides decision support consistent with the scope and goal at each level and, 3) it allows the managers responsible at each level to include valuable business insights and to validate the inputs and outputs of the models.

According to [14] , most planning and scheduling approaches found in the literature can be classified as "offline" where it is considered that all the data of a problem are given i.e. the decision maker has full knowledge of the future. This type of problem, which assumes that external conditions are predictable and stable, is often addressed with deterministic formulations [10]. In real-world applications, the planner needs to make decisions before all the data are available and also, to react to unexpected events, such as equipment failures, new and changing customer orders, variation and disruption in raw material supplies, etc., and change and improve the plan/schedule as new information becomes available. In practice, conservative operations management is commonly used to mitigate the impact of unexpected events. Even if they are still considered to be in the early stages of their development [10], stochastic formulations (e.g. [21]) can be used in planning and scheduling to treat these uncertainties more systematically.

An interesting alternative, particularly adapted for continuous and dynamic decision processes, consists of on-line approaches that aim at improving the quality of the plan/schedule over time. Instead of considering stochastic uncertainties for a totally defined input instance over the time horizon, the on-line procedure consists of solving the models periodically (with a frequency consistent with the decision making processes) based on past events and current data and without all the information about the future [9]. As mentioned by Stobbe et al. [10], the human planner or scheduler who compensates the lack of information with knowledge and experience, should be supported (and not replaced) by planning and scheduling tools.

Nowadays, with the significant improvement of computational and information management (transactional ICT) capabilities, it is reasonable and desirable to develop decision support tools based on tightly integrated and interacting modules [2, 14, 22]. On-line multi-scale approaches can provide decision support for supply chain planning and scheduling and also consider the overall organizational structure (different decision levels) and the dynamic nature of the decision making processes involved. The literature on the development of such multi-scale on-line procedures is not extensive and we think there is still significant research work to accomplish, especially in the context of applying these concepts to practical real-world problems.

The work presented by Stefansson et al. [14] considers an on-line multi-scale framework for the planning and scheduling of a real-world pharmaceutical manufacturer with critical continuous and dynamic decision processes. Within this framework, the three hierarchical levels differ in terms of scope, data availability and time horizon. At the top level, the model optimizes a campaign plan for long-term planning purposes. Then, at the middle level, the model simultaneously revises the campaign plan generated at the higher level and allocates current orders (that are subject to change) within the

campaigns. Finally, at the lower level, the model is used for the detailed scheduling of production tasks and is based on confirmed customer orders. To cope with the continuous dynamic decision processes, each level is run with a receding time horizon and at different frequencies (adapted for each decision level). For each run, the state of the model is updated and using the up-to-date data inputs available, the model is optimized to find the appropriate plan or schedule. Given this receding time horizon, only the beginning of the optimized schedule/plan is implemented and each time the horizon is shifted forward, the plan for later time periods is improved with the newly available information. Although this approach is not optimal (if we consider the ideal case where the whole input instance is known with certainty), it should provide a close to optimal solution. Moreover, Stefansson et al. [14] demonstrated that it can provide good results for practical real-world problems.

OBJECTIVE

As presented in Part A, the overall objective of this study was to develop a supply chain planning approach that supports flexible capacity management in the pulp and paper industry. The proposed multi-scale planning framework that considers a receding time horizon is suitable for on-line implementation and acknowledges the decision levels and the dynamic nature of the decision processes involved. Subsequently, the specific objectives addressed in Part B are 1) to formulate the aggregated capacity model (higher level) and the campaign planning and order scheduling model (lower level), 2) to determine the appropriate integration strategy and identify the required flow of information between the models and 3) to characterize the higher and lower level model formulations with respect to the feasible regions and profit functions.

CASE STUDY

The case study considered (described in detail in Part A) consists of the fibre supply chain of a high-yield pulp mill including the fibre procurement, the manufacturing and the distribution/customer cycles. Given the high fibre supply cost in Eastern Canada, raw material inventory planning and supplier selection based on incremental costs and expected availability play an important role to ensure the overall cost effectiveness. Incremental costs and short- and long-term availabilities for each source of fibre (wood species, chips or logs) are the key elements taken into account during the fibre procurement planning process. The manufacturing operations at the mill consist of a bleached chemi-thermomechanical pulping (BCTMP) process. Different pulp grades can be produced by varying the process operating conditions according to standard recipes defined specifically for each production line. In the case of the internal customer, diluted pulp is directly provided to the adjacent paperboard process. For external customers, the final product is sold in the form of baled dried pulp. For each cycle, continuous and dynamic decision making processes must be executed at different frequencies and for different decision levels. The integrated planning of these cycles is desirable in order to achieve good supply chain coordination, and is an important issue for market pulp mills.

MULTI-SCALE PLANNING FRAMEWORK

An overview of the approach is provided in this section and the authors refer the reader to Part A for more details about the decision processes involved, the organizational structure and how they relate to the proposed framework. The online multi-scale planning framework is a tool that provides decision support for the optimization of the fibre supply chain of a high-yield pulp mill (Figure 2). The overall structure is intended to guide the decision makers at each of the decision levels in an integrated manner

to ensure visibility across the supply chain and across the different management levels. It also takes into account the dynamic nature of the decision processes involved in the supply chain planning of the pulp mill. It recognizes that new information becomes available over time and thus, that the decision processes need to be repeated with different timing and frequency in order to adjust and improve the production plan.

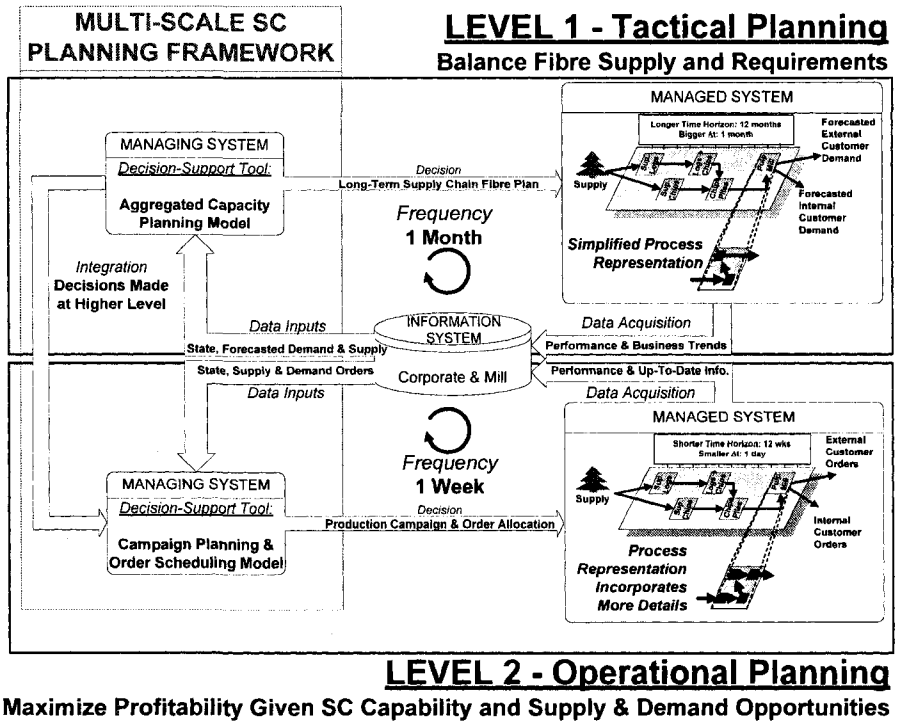


Figure 2: Representation of the online multi-scale planning approach and its integration within the organizational structure (as presented in Part A).

At the higher level, an aggregated capacity planning model provides tactical decision support primarily for fibre procurement managers at the corporate headquarter. The goal is to determine a long-term fibre management plan that corresponds to the optimal balance of fibre supply and demand along the supply chain of the pulp mill. Since new forecasted data inputs are available each month, the current state of the managed system is updated and the model is run on a monthly basis. It considers a receding time horizon of one year and uses a time step of one month. The results provided by the model are an optimal capacity management plan given by the total number of days of production for each pulp grade on each production line in each time period, and an optimal fibre supply and inventory management plan, determined as a function of the expected evolution of fibre supply and pulp demand throughout the year.

At the lower level, an operational planning model is used to support the production managers at the mill. The aim is to maximize the profitability of the pulp mill by determining the optimal production

campaign and allocation of orders given the manufacturing capability. At this level, supply and demand orders are used instead of forecasted information and the model is run on a weekly basis in order to account for unexpected situations and data inputs that are changing or only gradually available. Each time, the state of the managed system is updated and new order information is incorporated. A receding time horizon of three months and a time step of one day are considered. The results provided consist of the optimal sequence of production, the identification of low incremental cost fibre suppliers, the selection of high margin customer orders and the optimal allocation of the selected orders within the production campaigns.

Finally, the integration between the models is ensured by two types of information flow. First, from bottom to top, the consistency of the data inputs used at the higher level, with the up-to-date detailed information available at the lower level, is ensured via the corporate and mill information systems. Second, from top to bottom, selected results obtained from the higher level model are systematically provided to the lower level in order for the latter to consider the decisions made at the higher level (e.g. regarding raw material availability) and therefore to take into account the long-term perspective.

FORMULATION

LEVEL 1- AGGREGATED CAPACITY PLANNING

Since the scope of the aggregated capacity planning problem considers a longer time horizon, a more simple representation of the managed system is used. The formulated model, inspired by the production planning stage in [16] , is simple enough to reduce overall mathematical complexity, yet it provides sufficient detail to support tactical decision making. It can be described as follows: *given* the initial and final material inventory levels and inventory holding costs, the forecasted fibre supply capacities and costs, the fibre handling and pulp production capability at the mill, the forecasted pulp demand, net sales revenue and the manufacturing costs, *find* the monthly selection of fibre suppliers, flow of material along the supply chain, material inventory levels, production of each pulp grade and demand satisfied that maximize the total profit over the 12-month time horizon. The model consists essentially of an aggregation of the lower level problem in which capacity, continuity (mass balances), and assignment are the main constraints considered for each month. The level 1 model is formulated as a mixed-integer linear programming problem with a discrete time representation.

Variables

Continuous Variables (all continuous variables ≥ 0)

i_{e,t^*}	Aggregated flow of logs to the chipper during period t^*, for all wood specie e
$Bille_{e,t^*}$	Quantity of logs (for all wood species e) in inventory at time t^*
ab_{e,fb,t^*}	Aggregated flow of logs to the mill (for all wood species e) from supplier fb during time t^*
ac_{e,fc,t^*}	Aggregated flow of chips to the mill (for all wood species e) from supplier fc during time t^*
$Supply_{e,t^*}$	Quantity of chips (for all wood species e) in inventory at time t^*
$ConsumpE_{e,l,t^*}$	Aggregated flow of chips, for all wood species e, from the piles to the production line l during time t^*

$Pprod_{g,l,d,t^*}$	Quantity of pulp g produced on production line l for the dth day of production during period t^*
$PprodExternal_{g,l,t^*}$	Quantity of pulp g available for external customers and produced on production line l during period t^*
hL_{g,c,t^*}	Aggregated flow of pulp g shipped to customer c at time t^*- corresponding to the forecasted demand inputs (months 4-12)
hS_{g,c,t^*}	Aggregated flow of pulp g shipped to customer c at time t^*- corresponding to the shaped demand inputs (months 1-3)
$DemS_{c,g,t^*}$	Shaped demand of pulp g from customer c at time t^*
$InvGrad_{g,t^*}$	Quantity of pulp g in inventory at time t^*
n_{l,t^*}	Number of pulp grades produced on line l during period t^*
z_{l,t^*}	Minimum possible number of transitions on line l during period t^*
$ATime_{l,t^*}$	Total production time available on line l during period t^*
$BaseInvGrad_{g,t^*}$	Base inventory level that needs to be carried out if the total demand of pulp g is lower than the total inventory at the beginning of the period t^*
$InvGradEff_{g,t^*}$	Equivalent inventory level of pulp g at the end of period t^*
$InvGradArea_{g,t^*}$	Area under the curve of the production profile of pulp g during period t^* that ensures the minimum possible average inventory level
λ^{pulp}_{a,g,t^*}	Percentage of extreme point a that is used in the linear interpolation to determine the minimum average inventory level of pulp g possible during period t^*
$BaseInvBille_{e,t^*}$	Base inventory level that needs to be carried out if the total requirement of logs e is lower than the total inventory at the beginning of the period t^*
$InvBilleEff_{e,t^*}$	Equivalent inventory level of logs e at the end of period t^*
$InvBilleArea_{e,t^*}$	Area under the curve of the consumption profile of logs e possible during period t^* that ensures the minimum possible average inventory level
λ^{log}_{a,e,t^*}	Percentage of extreme point a that is used in the linear interpolation to determine the minimum average inventory level of logs e possible during period t^*
$BaseInvChip_{e,t^*}$	Base inventory level that needs to be carried out if the total requirement of chips e is lower than the total inventory at the beginning of the period t^*
$InvChipEff_{e,t^*}$	Equivalent inventory level of chips e at the end of period t^*
$InvChipArea_{e,t^*}$	Area under the curve of the consumption profile of chips e possible during period t^* that ensures the minimum possible average inventory level
λ^{chip}_{a,e,t^*}	Percentage of extreme point a that is used in the linear interpolation to determine the minimum average inventory level of chips e possible during period t^*

Binary Variables

W_{g,l,d,t^*}	Equal to 1 if pulp g is produced on line l for a dth day during the period t^*, otherwise equal to 0
X_{g,l,t^*}	Equal to 1 if pulp g is produced on line l at least one time during the period t^*, otherwise equal to 0
Ω^{pulp}_{b,g,t^*}	Equal to 1 if segment b is selected for the linear interpolation to determine the minimum inventory level of pulp g possible during the period t^*, otherwise equal to 0
Ω^{logs}_{b,e,t^*}	Equal to 1 if segment b is selected for the linear interpolation to determine the minimum inventory level of logs e possible during the period t^*, otherwise equal to 0

Ω^{chips}_{b,e,t^*} Equal to 1 if segment b is selected for the linear interpolation to determine the minimum inventory level of chips e possible during the period t^*, otherwise equal to 0

Objective Function

The objective function is to maximize the total profit over the time horizon (1). The revenues consist of the expected net sales for each aggregated period from external and internal customers. In the latter case, since we choose not to differentiate between the manufacturing cost structure of pulp produced for internal and external purposes, the costs avoided during the production of pulp are added to the revenues generated. In terms of fibre supply cost, three main elements were considered: the delivered cost of logs bought from the suppliers, the chipping costs and the delivered cost of chips bought from the suppliers. Furthermore, the cost structure of the manufacturing cycle is represented using unit-level, batch-level and facility-level costs. Unit-level cost refers to direct manufacturing costs such as chemicals and energy which are specific for each grade produced and each production line at the mill. Batch-level cost, or transition cost, is the cost of changing the recipe produced on a given production line. In level 1, a simplified representation of batch-level cost is used (i.e. we only compute the minimum transition cost possible given the production on each line) in order to ensure that important aggregation properties are respected (see Section *Characterization of the Aggregation*). Also, since capacity decisions are made, it is relevant to incorporate facility-level cost within the model in order to consider the important issue of equipment utilization. Furthermore, we need to differentiate between daily costs, the indirect costs that can be avoided if there is a temporary shutdown at the mill and the fixed period costs that are considered to be fixed whatever the planning decisions are. Finally, the last items considered in the objective function are the inventory holding costs for chips, logs and pulp. These costs have been calculated using the minimum average inventory levels possible for each aggregated period. This ensures that the inventory cost calculated at the higher level is a lower bound to the inventory cost in the lower level model.

$$
\begin{aligned}
&\max \Pr ofitL1 = \\
&\sum_{t^*}\sum_{c}\sum_{g} \mathrm{Re}\, venuL_{c,g,t^*} hL_{g,c,t^*} + \sum_{t^*}\sum_{c}\sum_{g} \mathrm{Re}\, venuS_{c,g} hS_{g,c,t^*} \\
&+ \sum_{t^*}\sum_{g} \left(DemandInternal_{g,t^*} \cdot \left(\mathrm{Re}\, venuInt_{g,t^*} + CDInterne_{g}\right)\right) \\
&- \sum_{t^*}\sum_{d}\sum_{l}\sum_{g} Pprod_{g,l,d,t^*} CU_{g,l} - \sum_{t^*}\sum_{l} ACB_l z_{l,t^*} \\
&- \sum_{t^*}\sum_{fc}\sum_{e} ac_{e,fc,t^*} Cac_{e,fc,t^*} - \sum_{t^*}\sum_{fb}\sum_{e} ab_{e,fb,t^*} Cab_{e,fb,t^*} - \sum_{t^*}\sum_{e} CostChip_e i_{e,t^*} \\
&- \sum_{e}\left\{ CInvB_e \cdot \left(\frac{\sum_{t^*}\sum_{fb}\left(Cab_{e,fb,t^*} \cdot CapFB_{e,fb,t^*}\right)}{\sum_{t^*}\sum_{fb} CapFB_{e,fb,t^*}} \right) \cdot \sum_{t^*}\left(BaseInvBille_{e,t^*} + \frac{InvBilleArea_{e,t^*}}{Q} \right) \right\} \\
&- \sum_{e}\left\{ CInvC_e \cdot \left(\frac{\sum_{t^*}\sum_{fc}\left(Cac_{e,fc,t^*} \cdot CapFC_{e,fc,t^*}\right)}{\sum_{t^*}\sum_{fc} CapFC_{e,fc,t^*}} \right) \cdot \sum_{t^*}\left(BaseInvChip_{e,t^*} + \frac{InvChipArea_{e,t^*}}{Q} \right) \right\} \\
&- \sum_{g}\left\{ CInvP_g \cdot \left(\frac{\sum_{t^*}\sum_{c}\left(\mathrm{Re}\, venuL_{c,g,t^*} \cdot DemandL_{c,g,t^*}\right) + \sum_{c}\left(\mathrm{Re}\, venuS_{c,g} \cdot DemandS_{c,g}\right)}{\sum_{t^*}\sum_{c} Demand_{c,g,t^*} + \sum_{c} DemandS_{c,g}} \right) \cdot \right. \\
&\left. \sum_{t^*}\left(BaseGradeChip_{e,t^*} + \frac{InvGradeArea_{e,t^*}}{Q} \right) \right\} \\
&- \sum_{t^*}\sum_{l}\left[CTD_l \left(\sum_{g}\sum_{d} W_{g,l,d,t^*} \right) \right] - \sum_{t^*} CTF
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Constraints

Fibre procurement constraints

The inequalities (2) and (3) respectively ensure for each wood specie e that the quantity of chips from supplier fc and logs from supplier fb respects the expected capacity of each supplier during period t^*.

$$ac_{e,f_c,t^*} \le CapFC_{e,f_c,t^*} \quad \forall e, f_c, t^* \tag{2}$$

$$ab_{e,f_b,t^*} \le CapFB_{e,f_b,t^*} \quad \forall e, f_b, t^* \tag{3}$$

Also, the total aggregated flow of chips, from all the suppliers to the mill, must not exceed the monthly chip delivery capacity, for each period t^* (4). It represents the overall chip handling capacity at the mill due to the limitations in terms of unloading the incoming trucks (at the dumper) and putting the chips on the right pile. Similarly, the total aggregated flow of logs from the suppliers to the mill must respect a monthly log delivery capacity, for each period t^* (5).

$$\sum_{e}\sum_{f_c} ac_{e,f_c,t^*} \le LCMax \quad \forall t^* \tag{4}$$

$$\sum_{e}\sum_{f_b} ab_{e,f_b,t^*} \leq LBMax \ \ \forall t^* \tag{5}$$

Given the particular pulping process at the mill, it is not possible to use logs directly for pulp production; all the logs used must first be transformed into chips. The production of chips is limited by the chipping capacity on-site (6). The yield of this process is represented by $Nchipper_e$ and corresponds mainly to the bark that is being removed.

$$\sum_{e}\left(i_{e,t} \cdot NChipper_e\right) \leq CChipper \ \ \forall t^* \tag{6}$$

The mass balance on the inventory of logs e from period (t^*-1) to period t^* is ensured by (7) where the initial inventory of logs at the beginning of the time horizon, the consumption of logs by the chipping process and the delivery of logs from the suppliers are considered. Similarly, (8) ensures the continuity of chip inventory and $\sum_{l} ConsumpE_{e,l,t^*}$ corresponds to the total amount of chips e consumed by the pulp mill. The inventory of chips e and logs e carried on-site are limited by the inequalities (9) and (10). Finally, the targeted chip and log inventory levels at the end of the time horizon is specified by the decision maker and taken into account by the equations (11) and (12).

$$BilleInit_{e,t^*} + Bille_{e,(t^*-1)_{t^*>1}} + \sum_{f_b} ab_{e,f_b,t^*} - i_{e,t^*} = Bille_{e,t^*} \ \ \forall e,t^* \tag{7}$$

$$\begin{aligned}&\sum_{f_c} ac_{e,f_c,t^*} + \left(i_{e,t} \cdot NChipper_e\right) + SupplyInit_{e,t^*} + Supply_{e,(t^*-1)_{t^*>1}} \\ &- \sum_{l} ConsumpE_{e,l,t^*} = Supply_{e,t^*} \ \ \forall e,t^*\end{aligned} \tag{8}$$

$$Bille_{e,t^*} \leq MaxLogInv_e \ \ \forall e,t^* \tag{9}$$

$$Supply_{e,t^*} \leq MaxChipInv_e \ \ \forall e,t^* \tag{10}$$

$$Bille_{e,t^*} = InvBilleFinal_e \ \ \forall e,t^* = \left|T^*\right| \tag{11}$$

$$Supply_{e,t^*} = InvChipFinal_e \ \ \forall e,t^* = \left|T^*\right| \tag{12}$$

Pulp manufacturing constraints

The consumption of chips e on production line l during period t^* is represented by (13). In this equation, FConv is a conversion factor, $NProd_{r,l}$ is the yield of the pulping process if recipe r is selected, $Pprod_{g,l,d,t^*}$ is the production of pulp g and $Rin_{l,r,e}$, the proportion of chips e required to produce pulp g according to recipe r.

$$ConsumpE_{e,l,t^*} = FConv \cdot \sum_{d} \sum_{r} \sum_{g|rg} \left\{ \frac{Pprod_{g,l,d,t^*} \cdot Rin_{l,r,e}}{Nprod_{r,l}} \right\} \quad \forall e,l,t^* \tag{13}$$

If pulp g is produced on line l for a dth day during period t^* (i.e. W_{g,l,d,t^*} equal to 1), then the amount of pulp produced given by (14) must be lower than the maximum possible production rate for the recipe r on production line l.

$$Pprod_{g,l,d,t^*} \leq W_{g,l,d,t^*} \cdot \sum_{r|rg} Rout_{r,l}^{Max} \quad \forall g,l,d,t^* \tag{14}$$

Constraint (15) ensures that, during the first aggregated time period, the production-related decisions take into account what is produced before the time horizon considered as well as the minimum campaign length for each recipe and production line. Also, for each aggregated period, (16) ensures the conditions that pulp g can only be produced on line l for a dth day if it was produced for a $(d\text{-}1)^{th}$ day. By applying this constraint, we enforce the assignments to be grouped together, which provides a more efficient formulation. If a recipe can not be produced on a given production line (i.e. $Rout_{r,l} = 0$), then inequality (17) makes sure that the production of the corresponding pulp g is not possible for this particular line. (18) and (20) respectively allow to determine if the grade g is produced at least one time on line l during period t^* and to calculate the minimum number of transitions on line l during t^*. Finally, (19) ensures that X_{g,l,t^*} is equal to 0 if there is no recipe to produce pulp g on a given production line (i.e. $Rout_{r,l}^{Max} = 0$).

$$\begin{aligned} &\sum_{g|rg} \sum_{d} W_{g,l,d,t^*} \geq (L\min_{r',l} - Tem\Pr e_{r',l}) \cdot \mathrm{Rec}\Pr e_{r',l} \\ &\forall r', t^* = 1, l \ \ and \ \ (Tem\Pr e_{r',l} - L\min_{r',l} < 0) \end{aligned} \tag{15}$$

$$W_{g,l,d+1,t^*} \leq W_{g,l,d,t^*} \ \forall g,l,d,t^* > 1 \tag{16}$$

$$\sum_{d} \sum_{t^*} W_{g,l,d,t^*} \leq \sum_{r|rg} Rout_{r,l}^{Max} \ \forall g,l \tag{17}$$

$$X_{g,l,t^*} \geq \frac{\sum_{d} W_{g,l,d,t^*}}{|D|} \quad \forall g,l,t^* \tag{18}$$

$$\sum_{t^*} X_{g,l,t^*} \leq \sum_{r|rg} Rout_{r,l}^{Max} \ \forall g,l \tag{19}$$

$$z_{l,t^*} = \sum_{g} X_{g,l,t^*} - 1 \ \forall l,t^* \tag{20}$$

Also, constraint (22) is necessary to ensure that the maximum total number of days of production on line l during period t^* does not exceed the time available on the production line during this period. The total time available on production line l for a given aggregated period is determined by the equation (21) that considers the time lost for planned maintenance shutdowns.

$$ATime_{l,t^*} = Q - TimeLossP_{l,t^*} \quad \forall l,t^* \tag{21}$$

$$\sum_g \sum_d W_{g,l,d,t^*} \leq ATime_{l,t^*} \quad \forall l,t^* \tag{22}$$

Demand constraints

Given the configuration of the production processes at the mill, a certain amount of pulp produced on the first production line is used to satisfy the internal demand of a paperboard mill on-site. Since the production of another manufacturing facility relies on the availability of this pulp, the demand must be satisfied at all time (23). Furthermore, given that the internal demand must be satisfied when required (through a pipeline) and can not be grouped, (24) ensures that the number of days of production for this line during an aggregated period is at least equal to the expected number of days for which the internal demand is greater than zero. On the other hand, all the production on the second production line is available for external customers (25).

$$\sum_d Pprod_{g,l,d,t^*} - PprodExternal_{g,l,t^*} = DemandInternal_{g,t^*} \quad \forall g, l = 1, t^* \tag{23}$$

$$\sum_d W_{g,l,d,t^*} \geq DTB_{l,g,t^*} \quad \forall g, l = 1, t^* \tag{24}$$

$$\sum_d Pprod_{g,l,d,t^*} = PprodExternal_{g,l,t^*} \quad \forall g, l = 2, t^* \tag{25}$$

The equation for the continuity of pulp inventory is given by (26) where the variables hL_{g,c,t^*} and hS_{g,c,t^*} represent the quantity of pulp that is sent to customer c during time period t^*. They correspond respectively to the case of forecasted demand inputs (months 4 to 12) and shaped demand inputs (months 1 to 3). The inventory of pulp on-site is limited by the total maximum storage capacity in the warehouse (27). Also, the targeted pulp inventory levels at the end of the time horizon are specified by the decision maker and taken into account by (28).

$$\begin{aligned} &InvPateInit_{g,t^*} + InvGrad_{g,(t^*-1)_{t^*>1}} + \sum_l PprodExternal_{g,l,t^*} \\ &- \sum_c \left(hL_{g,c,t^*} + hS_{g,c,t^*}\right) = InvGrad_{g,t^*} \quad \forall g, t^* \end{aligned} \tag{26}$$

$$\sum_g InvGrad_{g,t^*} \leq MaxPulpInv \quad \forall g, t^* \tag{27}$$

$$InvGrad_{g,t^*} = InvPateFinal_g \quad \forall g, t^* = |T^*| \tag{28}$$

In the case of the forecasted demand inputs, (29) ensures that all the pulp sent to the customer is smaller or equal to the forecasted demand (and $DemandL_{g,c,t^*} = 0$ for $t^* \leq 3$).

$$hL_{g,c,t^*} \leq DemandL_{c,g,t^*} \ \forall c,g,t^* \tag{29}$$

For the shaped demand inputs, proper order quantities ($DemandS_{c,g}$) are available and the demand for a given month, $DemS_{c,g,t^*}$, is a variable that is bounded (or shaped) using the parameter $FDem_{c,g,t^*}$. Ideally, $DemandS_{c,g}$ and $FDem_{c,g,t^*}$ should be determined based on the detailed data inputs available at the Level 2 and correspond to the three first months of the time horizon. Constraint (30) shapes the monthly demand by setting different values for $FDem_{c,g,t^*}$ (since $FDem_{c,g,t^*} = 0 \ \forall t^* > 3$, $hS_{g,c,t^*} = 0 \ \forall t^* > 3$). In the extreme case where $FDem_{c,g,t^*} = 1 \ \forall t^* \leq 3$, there is no restriction and the demand can be satisfied any time within the three first months. Constraint (31) ensures that the sum of the determined demand for each month ($DemS_{c,g,t^*}$) is equal to the total quantity of each expected order. Finally, (32) enforces that the total quantity of pulp g shipped to customer c during period t^* is not greater than the calculated demand for this period.

$$DemS_{c,g,t^*} \leq FDem_{c,g,t^*} \cdot DemandS_{c,g} \forall c,g,t^* \tag{30}$$

$$\sum_{t^*} DemS_{g,c,t^*} = DemandS_{c,g} \ \forall c,g \tag{31}$$

$$hS_{g,c,t^*} \leq DemS_{c,g,t^*} \forall c,g,t^* \tag{32}$$

Minimum possible average chip inventory level

In order to ensure the conditions for perfect aggregation (see Section *Characterization of the Aggregation*), it is necessary that the chip inventory cost is calculated based on the minimum average chip inventory level possible given the consumption rate and the initial and final inventory levels of an aggregated period t^*. This will ensure that the average inventory levels calculated in the level 1 model are always less than or equal to the average inventory levels of the lower level problem. This particular situation is schematically represented in Figure 3. The detailed explanation and the generalization of the approach used to determine this minimum possible inventory level are presented in [23].

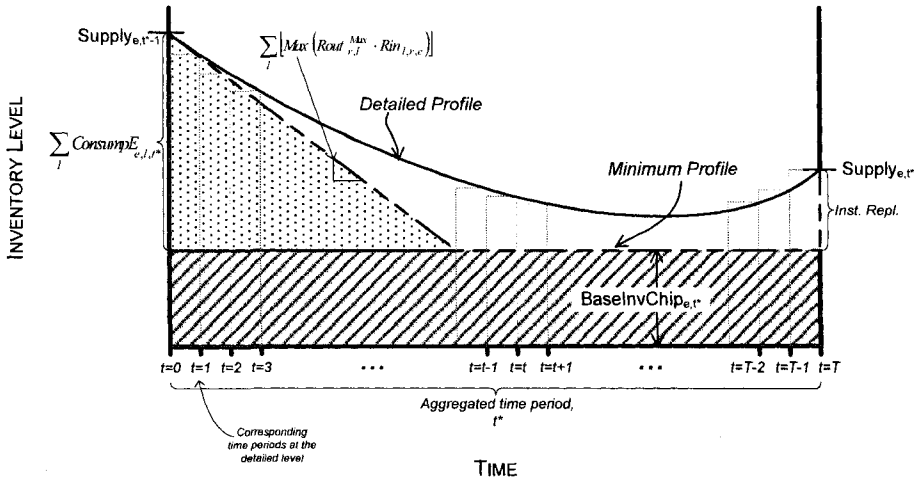


Figure 3: Determination of the minimum average chip inventory level for a given aggregated time period

First, if the demand of chips e during period t^* is less than the inventory at the beginning of the period, then a base inventory level will have to be present for all the duration of this period. This is considered using the inequality (33). Given that the variable $BaseInvChip_{e,t^*}$ is greater or equal than 0 and that there is a cost of carrying inventory, $BaseInvChip_{e,t^*}$ is equal to the difference between the initial inventory and the demand, if this difference is positive, and 0 otherwise.

$$Supply_{e,t^*-1_{t^*>1}} + SupplyInit_{e,t^*} - \sum_l ConsumpE_{e,l,t^*} \leq BaseInvChip_{e,t^*} \quad \forall e,t^* \tag{33}$$

The equivalent inventory level used to calculate the minimum area corresponding to the maximum consumption rate profile is given by the equation (34). If the base inventory is equal to 0, then the equivalent inventory level is the same as the inventory level at the beginning of the period t^*.

$$InvChipEff_{e,t^*} = Supply_{e,t^*-1_{t^*>1}} + SupplyInit_{e,t^*} - BaseInvChip_{e,t^*} \quad \forall e,t^* \tag{34}$$

The equality (35) is used to determine the interval that will be used to compute the area below the consumption profile. The different extreme points of the intervals represent various starting inventory levels that are equivalent to a certain number of days at maximum consumption rate (and up to |D| days). In the following equation, $Max\left(Rout_{r,l}^{Max} \cdot Rin_{l,r,e}\right)$ refers to the maximum chip consumption possible i.e. the largest product of the production rate and input proportion of chips for each line and wood specie.

$$InvChipEff_{e,t^*} = \sum_a \left[\lambda_{a,e,t^*}^{chip} \cdot (a-1) \cdot \sum_l \left[Max\left(Rout_{r,l}^{Max} \cdot Rin_{l,r,e}\right)\right]\right] \quad \forall e,t^* \tag{35}$$

The area of the equivalent triangle used to determine the average inventory level required is calculated by a linear interpolation between two consumption triangles defined at each extreme point of a given internal (36). Since we assume instantaneous replenishment of chips (worst case possible), only $InvChipArea_{e,t^*}$ and $\left(\frac{BaseInvChip_{e,t^*}}{Q}\right)$ are necessary to calculate the minimum possible average chip inventory level that is used in the objective function.

$$InvChipArea_{e,t^*} = \sum_a \left\{ \lambda^{chip}_{a,e,t^*} \cdot \frac{\left((a-1)^2 \cdot \sum_l \left[Max(Rout^{Max}_{r,l} \cdot Rin_{l,r,e}) \right] \right)}{2} \right\} \quad \forall e,t^* \tag{36}$$

The equalities (37) and (38) ensure that only one interval is selected and that the linear combination of the extreme points does not exceed 1, respectively. Also, constraint (39) is used to activate the two appropriate extreme points λ^{chip}_{a,e,t^*} given the segment Ω^{chip}_{b,e,t^*} chosen. Finally, (40) ensures that any values of λ^{chip}_{a,e,t^*} are percentages.

$$\sum_b \Omega^{chip}_{b,e,t^*} = 1 \quad \forall e,t^* \tag{37}$$

$$\sum_a \lambda^{chip}_{a,e,t^*} = 1 \quad \forall e,t^* \tag{38}$$

$$\lambda^{chip}_{a,e,t^*} \leq \sum_{b=a,a<|a|} \Omega^{chip}_{b,e,t^*} + \sum_{b=a-1,a>1} \Omega^{chip}_{b,e,t^*} \quad \forall a,e,t^* \tag{39}$$

$$0 \leq \lambda^{chip}_{a,e,t^*} \leq 1 \quad \forall a,e,t \tag{40}$$

Minimum possible average log inventory level

The minimum possible average log inventory levels for each aggregated period are determined using a similar approach than for the chips.

$$Bille_{e,t^*-1_{t^*>1}} + BilleInit_{e,t^*} - i_{e,t^*} \leq BaseInvBille_{e,t^*} \quad \forall e,t^* \tag{41}$$

$$InvBilleEff_{e,t^*} = Bille_{e,t^*-1_{t^*>1}} + BilleInit_{e,t^*} - BaseInvBille_{e,t^*} \quad \forall e,t^* \tag{42}$$

$$InvBilleEff_{e,t^*} = \sum_a \left[\lambda^{\log}_{a,e,t^*} \cdot (a-1) \cdot \left(\frac{CChipper}{NChipper_e} \right) \right] \quad \forall e,t^* \tag{43}$$

$$InvBilleArea_{e,t^*} = \sum_a \left\{ \lambda^{\log}_{a,e,t^*} \cdot \frac{(a-1)^2 \cdot \left(\frac{CChipper}{NChipper_e} \right)}{2} \right\} \quad \forall e,t^* \tag{44}$$

$$\sum_a \lambda^{\log}_{a,e,t^*} = 1 \quad \forall e,t^* \tag{45}$$

$$\sum_b \Omega^{\log}_{b,e,t^*} = 1 \quad \forall e,t^* \tag{46}$$

$$\lambda^{\log}_{a,e,t^*} \leq \sum_{b=a,a<|a|} \Omega^{\log}_{b,e,t^*} + \sum_{b=a-1,a>1} \Omega^{\log}_{b,e,t^*} \quad \forall a,e,t^* \tag{47}$$

$$0 \leq \lambda^{\log}_{a,e,t^*} \leq 1 \quad \forall a,e,t \tag{48}$$

Minimum possible average pulp inventory level

In the case of pulp, since it is a material produced by the manufacturing processes, slight modifications must be made to the approach used for chips and logs. First of all, the equivalent inventory level must be calculated by looking at the difference between the inventory level at the end of the period t^* and the base inventory (50). Also, in constraint (51) the different extreme points of the intervals represent various final inventory levels that are equivalent to a certain number of days at maximum production rate (and up to |D| days). Finally, in order to calculate the minimum possible average inventory level, it is also assumed that the pulp is instantaneously consumed at the beginning of the period (worse case possible) and thus, only the production profile needs to be considered.

$$InvGrad_{g,t^*-1_{t^*>1}} + InvPateInit_{g,t^*} - \sum_c \left(hL_{g,c,t^*} + hS_{g,c,t^*} \right) \leq BaseInvGrade_{g,t^*} \quad \forall g,t^* \tag{49}$$

$$InvGradeEf_{g,t^*} = InvGrad_{g,t^*} - BaseInvGrade_{g,t^*} \quad \forall g,t^* \tag{50}$$

$$InvGradeEff_{g,t^*} = \sum_a \left[\lambda^{pulp}_{a,g,t^*} \cdot (a-1) \cdot \sum_l Rout^{Max}_{r|rg,l} \right] \quad \forall g,t^* \tag{51}$$

$$InvGradeArea_{g,t^*} = \sum_a \left\{ \lambda^{pulp}_{a,g,t^*} \cdot \frac{(a-1)^2 \cdot \sum_l Rout^{Max}_{r|rg,l}}{2} \right\} \quad \forall g,t^* \tag{52}$$

$$\sum_a \lambda^{pulp}_{a,g,t^*} = 1 \quad \forall g,t^* \tag{53}$$

$$\sum_b \Omega^{pulp}_{b,g,t^*} = 1 \quad \forall g,t^* \tag{54}$$

$$\lambda^{pulp}_{a,g,t^*} \leq \sum_{b=a,a<|a|} \Omega^{pulp}_{b,g,t^*} + \sum_{b=a-1,a>1} \Omega^{pulp}_{b,g,t^*} \quad \forall a,g,t^* \tag{55}$$

$$0 \leq \lambda^{pulp}_{a,g,t^*} \leq 1 \quad \forall a,g,t \tag{56}$$

LEVEL 2- CAMPAIGN PLANNING AND ORDER SCHEDULING

At the lower level, the decisions that need to be made require a more exact representation of the managed system. The campaign planning and order scheduling model, inspired by the *Model B* presented by [24], includes detailed daily constraints that ensure that the manufacturing capability of the mill is well reflected at the supply chain level. Although this increases the modeling complexity, it is compensated by the reduction in the length of the time horizon considered (only three months). It can be described as follows: *given* the initial and targeted final material inventory levels and inventory holding costs, the actual detailed fibre supply capacities and costs, the daily fibre handling capacity, the detailed pulp production capability at the mill including, for example, minimum and maximum capacities and sequence dependent transitions, the actual customer order quantities, time windows, net sales revenues, and the manufacturing costs including explicitly the transition costs, *find* the appropriate production campaigns and transitions on each production line as well as the daily selection/timing of fibre supply, flow of materials along the supply chain, material inventory levels, pulp production rate, and shipping/timing of customer orders that maximize the total profit over the 12-week time horizon. The level 2 model is also formulated as a mixed-integer linear programming problem with a discrete time representation.

Variables

Continuous Variables (all continuous variables ≥ 0)

$i_{e,t}$	Flow of logs to the chipper during period t, for all wood species e
$Bille_{e,t}$	Quantity of logs (for all wood species e) in inventory at time t
$ab_{e,fb,t}$	Flow of logs to the mill (for all woods specie e) from supplier fb during time t
$ac_{e,fc,t}$	Flow of chips to the mill (for all woods specie e) from supplier fc during time t
$Supply_{e,t}$	Quantity of chips (for all wood species e) in inventory at time t
$ConsumpE_{e,l,t}$	Flow of chips, for all wood species e, from the piles to the production line l during time t
$Pprod_{g,l,,t}$	Quantity of pulp g produced on production line l during period t

$PprodExternal_{g,l,t}$	Quantity of pulp g, produced on production line l, available for external customers during period t
$h_{g,c,t}$	Quantity of pulp g shipped for customer order c at time t
$InvGrad_{g,t}$	Quantity of pulp g in inventory at time t

Binary Variables

$a_{r,l,t}$	Equal to 1 if recipe r is selected on line l during t, otherwise equal to 0
$b_{r',r,l,t}$	Equal to 1 if a transition from recipe r' to recipe r is required on line l during the period t, otherwise equal to 0
$v_{r,l,t}$	Equal to 1 if there is production on line l of recipe r during t, otherwise equal to 0
$u_{r,l,t}$	Equal to 1 if there is no production on line l of recipe r during t, otherwise equal to 0

Objective Function

In the lower level model, the objective function which maximizes the total profit over the time horizon is defined similarly to the level 1 model presented earlier. Most of the cost items that were discussed are also considered in (57) but are defined with a higher level of detail. First, the revenues generated from external demand are calculated only based on the satisfied customer orders. The revenues associated with the internal demand are determined using the amount of pulp that is transferred each day to the paperboard mill. In terms of fibre supply, the costs specific for each supply period are used and the chipping cost is based on the daily production. As in the level 1 model, three types of manufacturing costs are considered. First, unit-level costs are calculated based on the daily production on each of the pulp lines. In the best case, since decisions will be made on potential margins realized, these manufacturing costs should be determined using an integrated process and cost model taking into account the particularities of the operations. In the worst case, standard recipe and costing approaches can be used. Second, since it is important to systematically take into account the trade-offs between the flexibility of the operations (i.e. a higher number of production campaigns) and the batch-level costs when determining the optimal campaign plan, the transition costs are explicitly represented at the lower level. Consequently, the sequence dependent nature is taken into account and the cost used are determined by the mill based on the amount of scrap and off-spec pulp produced for each type of transition. At the facility level, daily and fixed costs are also considered in level 2. Finally, inventory holding costs for chips, logs and pulp are calculated based on the average inventory level for each period t.

$$
\begin{aligned}
&\max \Pr ofitL2 = \\
&\sum_t \sum_c \sum_g \mathrm{Re}venu_{c,g} h_{g,c,t} + \sum_t \sum_g \left(DemandInternal_{g,t} \cdot \left(\mathrm{Re}venuInt_{g,t} + CDInterne_g \right) \right) \\
&- \sum_t \sum_l \sum_g Pprod_{g,l,t} CU_{g,l} - \sum_t \sum_l \sum_r \sum_{r',r' \neq r} CB_{l,r',r} b_{r',r,l,t} \\
&- \sum_p \sum_{t \geq TAo_p}^{t \leq TAf_p} \sum_{fc} \sum_e ac_{e,fc,t} Cac_{e,fc,p} - \sum_p \sum_{t \geq TAo_p}^{t \leq TAf_p} \sum_{fb} \sum_e ab_{e,fb,t} Cab_{e,fb,p} - \sum_t \sum_e CostChip_e i_{e,t} \\
&- \sum_e \left\{ CInvB_e \cdot \left(\frac{\sum_p \sum_{fb} \left(Cab_{e,fb,p} \cdot CapFB_{e,fb,p} \right)}{\sum_p \sum_{fb} CapFB_{e,fb,p}} \right) \cdot \sum_t \left[\left(Bille_{e,t} + Bille_{e,t-1_{t>1}} + BilleInit_{e,t} \right) / 2 \right] \right\} \\
&- \sum_e \left\{ CInvC_e \cdot \left(\frac{\sum_p \sum_{fc} \left(Cac_{e,fc,p} \cdot CapFC_{e,fc,p} \right)}{\sum_p \sum_{fc} CapFC_{e,fc,p}} \right) \cdot \sum_t \left[\left(Supply_{e,t} + Supply_{e,t-1_{t>1}} + SupplyInit_{e,t} \right) / 2 * \right] \right\} \\
&- \sum_g \left\{ CInvP_g \cdot \left(\frac{\sum_c \left(\mathrm{Re}venu_{c,g} \cdot Demand_{c,g} \right)}{\sum_c Demand_{c,g}} \right) \cdot \sum_t \left[\left(InvGrad_{g,t} + InvGrad_{g,t-1_{t>1}} + InvPateInit_{g,t} \right) / 2 * \right] \right\} \\
&- \sum_t \sum_l \left(CTD_l \cdot \sum_r v_{r,l,t} \right) - \sum_t CTF
\end{aligned}
\tag{57}
$$

Constraints

Fiber procurement constraints

The constraint (58) ensures that the flow of chips from the supplier *fc* to the mill is less or equal than the capacity of the supplier during this period for each supply period determined by TAo_p and TAf_p. Each of these supply periods are defined such as their corresponding time windows (typically weeks) are always included within a month (i.e. they do not span across multiple months). Using the same approach, the constraint (59) can be defined for the flow of logs to the mill.

$$\sum_{t \geq TAo_p}^{t \leq TAf_p} ac_{e,f_c,t} \leq CapFC_{e,f_c,p} \quad \forall e, f_c, p \tag{58}$$

$$\sum_{t \geq TAo_p}^{t \leq TAf_p} ab_{e,f_b,t} \leq CapFB_{e,f_b,p} \quad \forall e, f_b, p \tag{59}$$

Similarly to the level 1 model, (60), (61) and (62) account for the daily capacity for chip delivery, log delivery and the chipping process, respectively. The mass balances for the inventories of logs and chips, from period (t-1) to period t, are calculated by the constraints (63) and (64) and defined for each specific time step t. Finally, constraints (65) and (66) ensure that the maximum possible inventory levels on-site, for logs and chips, are respected.

$$\sum_{e}\sum_{f_c} ac_{e,f_c,t} \leq LCMax \ \ \forall t \tag{60}$$

$$\sum_{e}\sum_{f_b} ab_{e,f_b,t} \leq LBMax \ \ \forall t \tag{61}$$

$$\sum_{e}\left(i_{e,t} * NChipper_e\right) \leq CChipper \ \ \forall t \tag{62}$$

$$BilleInit_{e,t} + Bille_{e,(t-1)_{t>1}} + \sum_{f_b} ab_{e,f_b,t} - i_{e,t} = Bille_{e,t} \ \ \forall e,t \tag{63}$$

$$\begin{aligned}&\sum_{f_c} ac_{e,f_c,t} + \left(i_{e,t} * NChipper_e\right) + SupplyInit_{e,t} + Supply_{e,(t-1)_{t>1}} \\ &- \sum_{l} ConsumpE_{e,l,t} = Supply_{e,t} \ \ \forall e,t\end{aligned} \tag{64}$$

$$Bille_{e,t} \leq MaxLogInv_e \ \ \forall e,t \tag{65}$$

$$Supply_{e,t} \leq MaxChipInv_e \ \ \forall e,t \tag{66}$$

Pulp manufacturing constraints

The daily amount of pulp produced if recipe r is selected on line l is given by (67). The maximum production rate, $Rout_{r,l}^{Max}$, is typically the nominal capacity of the pulping process and $Rout_{r,l}^{Min}$ is the minimum production rate possible given the equipment and process configuration. One of the important aspects to consider at the lower level is lost production. Within (67), the impact of short shutdowns (less than a day - $StopS_{l,t}$) on pulp production is explicitly incorporated. Long shutdowns are also considered via the variable $v_{r,l,t}$, and constraints (69) and (70). Also, given the choices made in terms of sequencing the production campaigns, the impact of transitions must be considered. The time of each particular type of transition, $\theta_{l,r',r}$, is used in order to calculate the reduction in available daily production.

$$\begin{aligned}&\sum_{r|rg}\left[v_{r,l,t} \cdot Rout_{r,l}^{Min} \cdot \left(1 - {StopS_{l,t}}/{24}\right)\right] - \sum_{r|rg}\sum_{r',r'\neq r}\left[Rout_{r,l}^{Min} \cdot \left(\frac{\theta_{l,r',r} \cdot b_{r',r,l,t}}{24}\right)\right] \\ &\leq Pprod_{g,l,t} \leq \\ &\sum_{r|rg}\left[v_{r,l,t} \cdot Rout_{r,l}^{Max} \cdot \left(1 - {StopS_{l,t}}/{24}\right)\right] - \sum_{r|rg}\sum_{r',r'\neq r}\left[Rout_{r,l}^{Max} \cdot \left(\frac{\theta_{l,r',r} \cdot b_{r',r,l,t}}{24}\right)\right] \ \ \forall g,l,t\end{aligned} \tag{67}$$

The constraint (68) calculates the consumption of chips e on production line l during period t. It considers the yield of the pulping process, the proportion of chips required to produce pulp given a recipe r and the production of pulp g. Even though in reality fibres are consumed during transitions, it is very difficult to evaluate the proportion of all chips e consumed during a transition. Thus, only the fibre consumption tailored to the production of pulp is taken into account in (68). This assumption is reasonable as long as the total estimated amount of chips consumed during all transitions over the time horizon are negligible when compared to the total consumption for normal pulp production. Moreover,

the overall fibre cost incurred for each type of transition and determined by the mill is incorporated in the objective function in the batch-level costs $CB_{l,r',r}$.

$$ConsumpE_{e,l,t} = FConv \cdot \sum_{r} \sum_{g \in rg} \left\{ \frac{Pprod_{g,l,t} \cdot Rin_{l,r,e}}{Nprod_{r,l}} \right\} \quad \forall e,l,t \tag{68}$$

The constraint (69) ensures that only one recipe r is selected on line l during t if there is no (one-day) shutdown on this production line during this particular day. If recipe r is selected, then pulp can be produced (i.e. $v_{r,l,t} = 1$) or not produced (i.e. $u_{r,l,t} = 1$) on the production line(70). In the case where a recipe r is not defined for a particular production line (i.e. $Rout_{r,l}^{Max}$ equal to 0), then no production can occur (71).

$$\sum_{r} a_{r,l,t} + StopL_{l,t} = 1 \quad \forall l,t \tag{69}$$

$$a_{r,l,t} = v_{r,l,t} + u_{r,l,t} \quad \forall r,l,t \tag{70}$$

$$\sum_{t} v_{r,l,t} \leq Rout_{r,l}^{Max} \quad \forall r,l \tag{71}$$

If there is a change in the recipe produced on a production line between time (t-1) and t, then a transition needs to take place at time t (72). Furthermore, the constraints (73) and (74) enforce that no transition from recipe r' is possible if this recipe was not produced at time (t-1) and similarly, that no transition to recipe r is possible if this particular recipe is not produced during t. Since each type of transition requires a given amount of time $\theta_{l,r',r}$, it is necessary to ensure that the time available during a day is sufficient to allow for a given transition (75).

$$a_{r,l,t} + a_{r',l,t-1} - 1 \leq b_{r',r,l,t} \quad \forall r,r' \neq r,l,t \neq 1 \tag{72}$$

$$b_{r',r,l,t} \leq a_{r',l,t-1} \quad \forall r,r' \neq r,l,t \neq 1 \tag{73}$$

$$b_{r',r,l,t} \leq a_{r,l,t} \quad \forall r,r' \neq r,l,t \tag{74}$$

$$b_{r',r,l,t} \leq 2 - \left(\frac{StopS_{l,t} + \theta_{l,r',r}}{24}\right) \quad \forall r,r' \neq r,l,t \tag{75}$$

In order to allow the decision maker to have some control over the minimum length of production campaigns for each type of recipe r on each line l, the constraint (76) needs to be introduced. If a transition to recipe r happens at time t on line l, then it forces the production of this particular recipe for a minimum number of periods corresponding to the specified value $Lmin_{r,l}$ given by the planner.

$$L\min_{r,l} \sum_{r',r' \neq r} b_{r',r,l,t} \leq \sum_{\tau \geq t}^{\tau \leq t + L\min_{r,l} - 1} v_{r,l,\tau} \quad \forall l,r,t \tag{76}$$

Also, an important element to consider in order to provide practically feasible production plans is the recipe that is being produced, on each production lines, before the time horizon considered by the model. Two situations are possible. First, if the duration of the production campaign that is being produced is smaller than the minimum length specified (i.e. $Tem\Pr e_{r',l} - L\min_{r',l} < 0$), then it is necessary to ensure the continuity of this campaign in the beginning of the time horizon considered in the planning problem (77). In the case where the campaign is longer than the minimum length (i.e. $Tem\Pr e_{r',l} - L\min_{r',l} \geq 0$), then a transition is possible during the first time period (t = 1). This second situation is addressed with the constraint (78).

$$(L\min_{r',l} - Tem\Pr e_{r',l}) \cdot \mathrm{Rec}\Pr e_{r',l} \leq \sum_{\tau \geq t}^{\tau \leq L\min_{r',l} - Tem\Pr e_{r',l}} v_{r,l,\tau} \qquad (77)$$

$$\forall r, r' = r, l, t = 1 \quad and \quad (Tem\Pr e_{r',l} - L\min_{r',l} < 0)$$

$$a_{r,l,t} + \mathrm{Rec}\Pr e_{r',l} - 1 \leq b_{r',r,l,t} \quad \forall r, r' \neq r, l, t = 1 \quad and \quad (Tem\Pr e_{r',l} - L\min_{r',l} \geq 0) \qquad (78)$$

Demand constraints

As in the level 1 model, both internal and external demands need to be considered in the lower level model. Equation (79) ensures that the daily internal demand of pulp is satisfied from the first production line and equation (80) ensures that all the production on the second line is available for external customers.

$$Pprod_{g,l,t} - PprodExternal_{g,l,t} = DemandInternal_{g,t} \quad \forall g, l = 1, t \qquad (79)$$

$$Pprod_{g,l,t} = PprodExternal_{g,l,t} \quad \forall g, l = 2, t \qquad (80)$$

Equality (81) is used to enforce the continuity of pulp inventories from period (t-1) to t and (82) limits the total inventory level to the maximum warehousing capacity on-site.

$$InvPateInit_{g,t} + InvGrad_{g,(t-1)_{t>1}} + \sum_{l} \Pr odExternal_{g,l,t} - \sum_{c} h_{g,c,t} = InvGrad_{g,t} \quad \forall g, t \qquad (81)$$

$$\sum_{g} InvGrad_{g,t} \leq MaxPulpInv \quad \forall t \qquad (82)$$

Furthermore, the total amount of pulp g shipped for customer order c must be less or equal than the quantity specified for this particular order (83). In addition, the pulp shipped must respect the time window specified for each order (To_c and Tf_c) and it is not possible to ship the pulp before or after this specified period (84) (85).

$$\sum_{t \geq To_c}^{t \leq Tf_c} h_{g,c,t} \leq Demand_{c,g} \quad \forall c, g \qquad (83)$$

$$\sum_{t\geq 1}^{t\leq To_c-1} h_{g,c,t} = 0 \quad \forall c,g \quad and \quad To_c \neq 1 \tag{84}$$

$$\sum_{t\geq Tf_c+1}^{t\leq |T|} h_{g,c,t} = 0 \quad \forall c,g \quad and \quad Tf_c \neq |T| \tag{85}$$

INTEGRATION OF LEVEL 1 AND LEVEL 2

As discussed in Part A, the integration strategy and the flows of information between the models is essential to ensure consistency between the decision levels and to ensure that the campaign planning and order scheduling problem incorporates the long-term issues that may arise in the future. Given the sequential steps required when using the full-scale integrated model, the higher level model is always run before any run at the lower level. Also, three types of information provided by level 1 are used for the integration: the inventory levels (for pulp, chip and log), the number of days of production and the value of the objective function. This information can be determined directly by looking at the optimal results of the aggregated capacity planning model:

- $TargetBille_e = Bille^{opt}_{e,t^*=3}$;
- $TargetChip_e = Supply^{opt}_{e,t^*=3}$;
- $TargetPulp_g = InvGrad^{opt}_{g,t^*=3}$;
- $L1MinDayProd_{g,l,o} = \sum_d W^{opt}_{g,l,d,t^*\leq 3}$, where t^* in the level 2 is equivalent to o in the level 1;
- $UpperBound = \Pr ofitL1^{opt}$, defined only for $t^* \leq 3$.

In order to integrate this information, the following constraints need to be incorporated in the formulation of the campaign planning and order scheduling problem (level 2). First, the inventory levels prescribed by the level 1 model are transferred to the level 2 model and are used as inventory targets at the end of the time horizon (constraints (86), (87) and (88)). Since these inventory targets are determined based on yearly data inputs at the aggregated level, they enforce the lower level model to be consistent with the long-term supply and demand plan.

$$Bille_{e,t} \geq T\arg etBille_e \quad \forall e, t = |T| \tag{86}$$

$$Supply_{e,t} \geq T\arg etChip_e \quad \forall e, t = |T| \tag{87}$$

$$InvGrad_{g,t} \geq T\arg etPulp_g \quad \forall g, t = |T| \tag{88}$$

At the higher level, it is possible to determine the number of days of production for each pulp grade on each production line for each aggregated period. This is the second type of information integrated and it is accomplished using the constraint (89). Since it is assumed that all the required customer orders are available for the first month of the planning horizon in level 2, (89) only incorporates the time period corresponding to the second and third months. In fact, as discussed in Part A, it is possible that not all the precise order information associated with the second and the third months are available and thus, that the demand for these months does not correspond to the expected value at the

aggregated level. Therefore, by using the available order inputs and the constraint (89) to enforce the production of each grade according to the expected demand determined at the aggregated level, it is possible to determine a preliminary campaign plan in the coming months.

$$L1MinDay\,\mathrm{Pr}od_{g,l,o} \le \sum_{r|rgt \ge (o*Q)+(1-Q)} \sum^{t \le o*Q} v_{r,l,t} \quad \forall g,l,2 \le o \le 3 \tag{89}$$

Finally, since it can be demonstrated that the formulated aggregated model is a relaxation of the detailed planning problem (see section *Characterization of the Aggregation*), the optimal value of the objective function of the aggregated model, calculated for the three first months, is used as a valid upper bound (for a profit maximization problem) for the profit determined in level 2 (90). This additional information may reduces the computational effort required to solve the lower level model.

$$\mathrm{Pr}\,ofitL2 \le UpperBound \tag{90}$$

CHARACTERIZATION OF THE AGGREGATION

The analysis of aggregation and disaggregation properties is a very important element to address in multi-scale planning. In fact, it is necessary to ensure maximum consistency between the levels and understand the limitations in terms of optimality and feasibility, if a detailed solution is aggregated at the higher level or inversely, if an aggregated solution is disaggregated at the lower level. As mentioned before, compared to the campaign planning & order scheduling model, the formulation of the aggregated capacity planning model is simplified. Essentially, the higher level formulation is a time aggregation that does not incorporate the detailed data inputs and the specific constraints of the lower level. Therefore, given this simplified representation, it is obviously not possible to guarantee that a solution provided by the higher level model is, when disaggregated, optimal or feasible at the detailed level.

Nevertheless, it is possible to identify the sufficient conditions to respect in order to guarantee the feasibility, at the aggregated level, of any feasible solutions obtained at the lower level. This refers to the conditions for so-called "perfect aggregation" [25]. In additions of the analysis of the feasible region, it is also necessary to characterize the optimality at both levels i.e. to identify the conditions that ensure that the higher level model always provides an upper bound, for a maximization problem, to the profit computed at the lower level. If these two characteristics can be ensured, the aggregated capacity planning problem is a relaxation of the campaign planning & order scheduling problem. More formally, the level 1 problem (92) is a relaxation of the original level 2 problem (91) if the conditions (93) and (94) are satisfied [26]. The first stipulate that the feasible region of the lower level is included within the feasible region of the higher level and the second, that the value of the objective function at the higher level is greater than or equal to the value of the objective function at the lower level, for any set of feasible solutions x at the lower level.

$$z = \max\left\{ \mathrm{Pr}\,ofitL2(x) : x \varepsilon X_{L2} \subseteq R^n \right\} \tag{91}$$

$$z^R = \max\left\{ \mathrm{Pr}\,ofitL1(x) : x \varepsilon X_{L1} \subseteq R^n \right\} \tag{92}$$

$$X_{L2} \subseteq X_{L1} \tag{93}$$

$$\Pr ofitL1(x) \geq \Pr ofitL2(x) \quad \forall x \varepsilon X_{L2} \tag{94}$$

In order to demonstrate these conditions and thus, that the level 1 model is a relaxation of the level 2, the first step consists of expressing the constraints and the objective function of the aggregated formulation as a function of the variables and the parameters of the detailed model. Then, since the general mathematical formulation of the aggregated level is mostly obtained by performing valid mathematical manipulations on the equality and inequality constraints of the detailed formulation, it is possible to systematically analyze and characterize each relevant constraint and the objective function. For this analysis, the same time horizon was assumed in order to ensure the consistency between the models.

Analysis of the constraints

In general, any solution of the lower level is feasible within the aggregated formulation if it maintains nonnegative inventory levels, does not exceed capacity limits and respects the assignments constraints [25]. More specifically, when the constraints are systematically compared, we need to ensure that the constraints of the detailed problem are more restrictive than the corresponding constraints of the relaxed problem. Given the formulation of the level 1 and level 2 models, three types of analysis can be done: capacity, continuity and assignment constraints. The table 1 shows all the relevant constraints that need to be considered in this analysis and classifies them according to the three different types aforementioned. As one can observe, not all the constraints in the aggregated level need to be verified. For instance, the constraints elaborated for the minimum possible average inventory levels do not need to be considered since they will not influence the feasibility, at the higher level, of any solution provided at the lower level. Similarly, the differences in the equality constraints (e.g. for the chip consumption in the pulp mill) do not need to be considered; it is only necessary to check if the resulting inventory balances and the production rates at the pulp mill are feasible at the aggregated level. Finally, the next sections present how the demonstrations can be accomplished for each type and also, further discuss some specific cases that need to be addressed.

Table 1: Level 2 constraints that are specifically analyzed to demonstrate the relaxation

	Relevant Constraints to Verify in the Higher Level
Type A: Capacity	(2), (3), (4), (5), (6), (9), (10), (14), (27), (29), (30), (32)
Type B: Continuity	(7), (8), (26)
Type C: Assignment	(15), (17), (22), (24)

Type A: Capacity Constraints

For example, in the aggregated formulation, the monthly chip delivery capacity is ensured by (4), for each aggregated period t^*(for better understanding, we changed the notation from *LCMax* to $LCMax^A$; the value is still the same). Rewriting this constraint as a function of the variables and the parameters of the detailed level, we obtain (95) where o stands for the aggregated periods (corresponding to the time horizon at the lower level), Q represents the length of an aggregated period and *LCMax* corresponds to the daily chip delivery capacity specified in the lower level model. Basically, the constraint at the aggregated level can be obtained by summing the lower level constraint over time.

$$\sum_{e}\sum_{f_c} ac_{e,f_c,t^*} \leq LCMax^{A} \ \forall t^* \tag{4}$$

$$\sum_{t\geq o^*Q+(1-Q)}^{t\leq o^*Q} \sum_{e}\sum_{f_c} ac_{e,f_c,t} \leq \sum_{t\geq o^*Q+(1-Q)}^{t\leq o^*Q} LCMax \ \forall o \tag{95}$$

$$\sum_{e}\sum_{f_c} ac_{e,f_c,t} \leq LCMax \ \forall t \tag{60}$$

We can observe that if the constraint (60) is satisfied for all time period t than the constraint (95) is necessary satisfied for all aggregated periods and thus (95) is a redundant valid inequality. In other words, all the solutions of the lower level model that respect (60) will also respect the corresponding capacity limitation at in the aggregated level. In fact, for all Type A constraints, it is possible to demonstrate that the level 1 valid inequalities are dominated by a positive linear combination of corresponding level 2 valid inequalities. Therefore, the feasible space of level 2, defined by Type A constraints, must be included within the feasible space of level 1.

The constraints that relate to the demand cycle are a special case of Type A constraints that require further discussion. As mentioned earlier, the constraints considered at the lower level explicitly take into account the time window specified for each order whereas, at the aggregated level, constraint (30) shapes the monthly demand based on the detailed data inputs available at the level 2. By combining the constraint (31) and (32) and by rewriting them in term of the variables and the parameters of the detailed level we can obtain (96). When comparing (83) with (96) (that both ensure that the maximum order quantity is respected) we can see that the latter is a redundant inequality constraint since the sum of $h_{g,c,t}$ is taken over all the time periods of each month instead of using the particular starting and ending dates of the specified order time windows.

Moreover, it is also necessary to check if the constraint (32), specifically defined for each aggregated time period, is dominated by the lower level constraints. For this, we need to recall that the goal of the shaping method used is to, based on the details inputs coming from the lower level, determine the value of $DemS_{c,g,t^*}$ that is the closest as possible to the sum of $h_{g,c,t}$ calculated for each month at the lower level ($DemS_{c,g,t^*}$ can be considered as an upper bound to h_{g,c,t^*}). Thus, the sum of $h_{g,c,t}$ calculated at the lower level, according to the time windows, is necessarily smaller or equal to the value of $DemS_{c,g,t^*}$ that would be determined at the higher level (right part of (97), (98), (99)). Given (84) and (85) and since the sum of $h_{g,c,t}$ at the lower level is more strict than $DemS_{c,g,t^*}$, equations (97), (98) and (99) hold and ensure that the constraints at the aggregated level are never violated for any solutions of the detailed

model. Also, the analysis of the constraint (29), at the aggregated level, can be considered as a specific case where only one parameter $FDem_{c,g,t}$ is equal to 1 and all the others are equal to 0. Finally, since the demand constraints defined at the higher level are dominated by the ones at the lower level, the feasible region at level 2 is included in the feasible region of level 1.

$$DemS_{c,g,t^*} \leq FDem_{c,g,t^*} \cdot DemandS_{c,g} \forall c,g,t^* \tag{30}$$

$$\sum_{t^*} DemS_{g,c,t^*} = DemandS_{c,g} \quad \forall c,g \tag{31}$$

$$hS_{g,c,t^*} \leq DemS_{c,g,t^*} \forall c,g,t^* \tag{32}$$

$$hL_{g,c,t^*} \leq DemandL_{c,g,t^*} \quad \forall c,g,t^* \tag{29}$$

$$\sum_{o} \sum_{t \geq o^*Q+(1-Q)}^{t \leq = o^*Q} h_{g,c,t} \leq Demand_{c,g} \quad \forall c,g \tag{96}$$

$$\sum_{t \geq o^*Q+(1-Q)}^{t \leq o^*Q} h_{g,c,t} = \sum_{t \geq To_c}^{t \leq o^*Q} h_{g,c,t} \leq DemS_{c,g,t^*} \forall c,g,o$$
$$where \ \left[(o \cdot Q + (1-Q)) \leq To_c < (o \cdot Q)\right] \ and \ \left[Tf_c \geq (o \cdot Q)\right] \tag{97}$$

$$\sum_{t \geq o^*Q+(1-Q)}^{t \leq o^*Q} h_{g,c,t} = \sum_{t \geq To_c}^{t \leq Tf_c} h_{g,c,t} \leq DemS_{c,g,t^*} \forall c,g,o$$
$$where \ \left[To_c \geq (o \cdot Q + (1-Q))\right] \ and \ \left[Tf_c \leq (o \cdot Q)\right] \tag{98}$$

$$\sum_{t \geq o^*Q+(1-Q)}^{t \leq o^*Q} h_{g,c,t} = \sum_{t \geq o^*Q+(1-Q)}^{t \leq Tf_c} h_{g,c,t} \leq DemS_{c,g,t^*} \forall c,g,o$$
$$where \ \left[To_c \leq (o \cdot Q + (1-Q))\right] \ and \ \left[Tf_c < (o \cdot Q)\right] \tag{99}$$

$$\sum_{t \geq To_c}^{t \leq Tf_c} h_{g,c,t} \leq Demand_{c,g} \quad \forall c,g \tag{83}$$

$$\sum_{t \geq 1}^{t \leq To_c - 1} h_{g,c,t} = 0 \quad \forall c,g \quad and \quad To_c \neq 1 \tag{84}$$

$$\sum_{t \geq Tf_c + 1}^{t \leq |T|} h_{g,c,t} = 0 \quad \forall c,g \quad and \quad Tf_c \neq |T| \tag{85}$$

Type B: Continuity Constraints

For example, in the aggregated formulation, the mass balance on the inventory of logs is ensured by (7), for each aggregated period t^*. The expression (100) can be obtained by rewriting this constraint as a function of the variables and the parameters of the detailed level (by summing over time) and by considering that no shortages should be allowed in order to have a feasible solution at the aggregated level.

$$BilleInit_{e,t^*} + Bille_{e,(t^*-1)_{t^*>1}} + \sum_{f_b} ab_{e,f_b,t^*} - i_{e,t^*} = Bille_{e,t^*} \quad \forall e,t^* \tag{7}$$

$$BilleInit_{e,t=Q^*(o-1)+1} + Bille_{e,t=Q^*(o-1)_{o>1}} + \sum_{t\geq o^*Q+(1-Q)}^{t\leq o^*Q} \sum_{f_b} ab_{e,f_b,t} \geq \sum_{t\geq o^*Q+(1-Q)}^{t\leq o^*Q} i_{e,t} + Bille_{e,t=o^*Q} \quad \forall e,o \tag{100}$$

$$BilleInit_{e,t} + Bille_{e,(t-1)_{t>1}} + \sum_{f_b} ab_{e,f_b,t} - i_{e,t} = Bille_{e,t} \quad \forall e,t \tag{63}$$

Since (63) ensures that the mass balances on the inventory are respected for each time step t at the detailed level, it is sufficient to ensure that the overall aggregated mass balance is also respected. Thus, (100) is also a redundant inequality constraint and the feasible space of the Level 2 model, defined by Type B constraints, must be included within the feasible space of the Level 1 model.

Type C: Assignment Constraints

In level 1, (24) enforces the minimum number of production days on line $l=1$, given the internal demand. By using the variable $v_{r,l,t}$ at the lower level, we can obtain the corresponding inequality (101). In the level 2 formulation, this is taken into account by equation (79) that ensures that the production $Pprod_{g,l,t}$ is greater than 0 (and thus, that $v_{r|rg,l,t}$ is equal to 1) for all time step t where $DemandeInterne_{g,t} \geq 0$. Consequently, if $DTB_{g,l,o}$ is consistent with $DemandInternal_{g,t}$, we can see that (101) is always respected if a solution of the detailed model is respecting (79) and thus, that the feasible region defined at level 2 is included in the feasible region defined by the level 1.

$$\sum_{d} W_{g,l,d,t^*} \geq DTB_{g,l,t^*} \quad \forall g,l=1,t^* \tag{24}$$

$$\sum_{t\geq o^*Q+(1-Q)}^{t\leq o^*Q} v_{r|rg,l,t} \geq DTB_{g,l,o} \quad \forall g,l=1,o \tag{101}$$

$$Pprod_{g,l,t} - PprodExternal_{g,l,t} = DemandInternal_{g,t} \quad \forall g,l=1,t \tag{79}$$

Also, for both levels, if a recipe r is not defined for a particular production line (i.e. $Rout_{r,l}^{Max}$ equal to 0), then no production can occur ((17) and (71)). (102) can be obtained by rewriting (17) as a function of the variables and parameters at the lower level. By comparison, we can see that (71) dominates (102) since this condition is enforced for each time step rather than in an aggregated manner.

$$\sum_{d}\sum_{t^*} W_{g,l,d,t^*} \leq \sum_{r|rg} Rout_{r,l}^{Max} \quad \forall g,l \tag{17}$$

$$\sum_{o} \sum_{t\geq o^*Q+(1-Q)}^{t\leq o^*Q} v_{r|rg,l,t} \leq \sum_{r|rg} Rout_{r,l}^{Max} \quad \forall g,l \tag{102}$$

$$\sum_{t} v_{r,l,t} \leq Rout_{r,l}^{Max} \quad \forall r,l \tag{71}$$

Finally, it is also required to ensure that the constraint (22) at the aggregated level is respected for any solution of the detailed model. The inequality (103) can be obtained by expressing (22) as a function of the lower level variables and parameters. Given (69) and (70) (where $v_{r,l,t}$ is forced to be equal to 0 if $StopL_{l,t}$ is equal to 1), we can observe that the aggregated constraint (103) is always respected, for any solution of the level 2 model. Again, since this condition is satisfied, the feasible region defined by the level 2 constraint is included in the feasible region defined by the Level 1 constraint.

$$ATime_{l,t^*} = Q - TimeLossP_{l,t^*} \quad \forall l, t^* \tag{21}$$

$$\sum_g \sum_d W_{g,l,d,t^*} \leq ATime_{l,t^*} \quad \forall l, t^* \tag{22}$$

$$\sum_g \sum_{t \geq o^*Q+(1-Q)}^{t \leq o^*Q} v_{r|rg,l,t} \leq Q - \sum_{t \geq o^*Q+(1-Q)}^{t \leq o^*Q} StopL_{l,t} \quad \forall l, o \tag{103}$$

$$\sum_r a_{r,l,t} + StopL_{l,t} = 1 \quad \forall l, t \tag{69}$$

$$a_{r,l,t} = v_{r,l,t} + u_{r,l,t} \quad \forall r, l, t \tag{70}$$

Analysis of the Objective Function

The second step consists in analyzing if the level 1 is an upper bound to level 2. In order to do that, the objective function of level 1 is expressed as a function of the variables and parameters of the detailed level (104). Then, the analysis can be performed directly by comparison of the terms in the objective function of the two levels.

$$
\begin{aligned}
&\max \Pr ofitL1 = \\
&\sum_{o}\sum_{c}\sum_{g}\sum_{t\geq o^{*}Q+(1-Q)}^{t\leq o^{*}Q} Revenu_{c,g}\, h_{g,c,t} + \sum_{o}\sum_{g}\sum_{t\geq o^{*}Q+(1-Q)}^{t\leq o^{*}Q}\left(DemandInternal_{g,t}\cdot\left(RevenuInt_{g,t}+CDInterne_{g}\right)\right) \\
&-\sum_{o}\sum_{d}\sum_{l}\sum_{t\geq o^{*}Q+(1-Q)}^{t\leq o^{*}Q} Pprod_{g,l,t}\cdot CU_{g,l} - \sum_{o}\sum_{l} ACB_{l} z_{l,o} \\
&-\sum_{o}\sum_{fc}\sum_{e}\sum_{\substack{p,\\ TAo_{p}\geq o^{*}Q+(1-Q)\\ AND\ \ TAf_{p}\leq o^{*}Q}}\sum_{t\geq TAo_{p}}^{t\leq TAf_{p}} ac_{e,fc,t}\, Cac_{e,fc,p} - \sum_{o}\sum_{fb}\sum_{e}\sum_{\substack{p,\\ TAo_{p}\geq o^{*}Q+(1-Q)\\ AND\ \ TAf_{p}\leq o^{*}Q}}\sum_{t\geq TAo_{p}}^{t\leq TAf_{p}} ab_{e,fb,t}\, Cab_{e,fb,p} \\
&-\sum_{o}\sum_{e}\sum_{t\geq o^{*}Q+(1-Q)}^{t\leq o^{*}Q} CostChip_{e}\, i_{e,t^{*}} \\
&-\sum_{e}\left\{Q\cdot CInvB_{e}\cdot\left(\frac{\sum_{p}\sum_{fb}\left(Cab_{e,fb,p}\cdot CapFB_{e,fb,p}\right)}{\sum_{p}\sum_{fb} CapFB_{e,fb,p}}\right)\cdot\sum_{o}\left(BaseInvBille_{e,o}+\frac{InvBilleArea_{e,o}}{Q}\right)\right\} \\
&-\sum_{e}\left\{Q\cdot CInvC_{e}\cdot\left(\frac{\sum_{p}\sum_{fc}\left(Cac_{e,fc,p}\cdot CapFC_{e,fc,p}\right)}{\sum_{p}\sum_{fc} CapFC_{e,fc,p}}\right)\cdot\sum_{o}\left(BaseInvChip_{e,o}+\frac{InvChipArea_{e,o}}{Q}\right)\right\} \\
&-\sum_{g}\left\{Q\cdot CInvP_{g}\cdot\left(\frac{\sum_{c}\left(Revenu_{c,g}\cdot Demand_{c,g}\right)}{\sum_{c} Demand_{c,g}}\right)\cdot\sum_{o}\left(BaseGradeChip_{e,o}+\frac{InvGradeArea_{e,o}}{Q}\right)\right\} \\
&-\sum_{o}\sum_{l}\left[CTD_{l}\cdot\left(\sum_{g}\sum_{t\geq o^{*}Q+(1-Q)}^{t\leq o^{*}Q} v_{r|rg,l,t}\right)\right] - \sum_{o}\sum_{t\geq o^{*}Q+(1-Q)}^{t\leq o^{*}Q} CTF
\end{aligned}
\tag{104}
$$

By inspection, it is clear that for any solutions of the detailed model the terms of the aggregated profit function are mostly equal to the terms of the detailed formulation. This is the case for the external revenues, the unit-level costs, the procurement costs (logs, chips and chipper) and the facility-level costs. Nevertheless, three elements require further analysis: internal revenues, inventory costs and transition (batch-level) costs. First, it is important to mention that the price for internal demand, $RevenuInt_{g,t}$, is updated on a monthly basis at the lower level. Since this is consistent with the higher level, the second term of the objective function (104) is equivalent to the value calculated at the lower level, for all feasible solutions considered. Second, the calculations of inventory costs for both levels are equivalent except for the terms that evaluate the average inventory level (it is important to note that in (104), $CInvB_e$, $CInvC_e$ and $CInvP_g$ refer to the daily percentage define in the lower level problem). In order to respect the condition (94), the average inventory level at the detailed level should always be greater than the average inventory at the aggregated level i.e the inventory cost in the aggregated formulation is a lower bound to the inventory cost calculated in the detailed model. Given the proposed approach used to determine the minimum possible average inventory level, we can ensure that the average inventory levels in level 1 are always less than or equal to the average inventory levels in the level 2 ((105), (106) and (107)).

$$\sum_{o}\left(BaseInvBille_{e,o}+\frac{InvBilleArea_{e,o}}{Q}\right)\leq \sum_{t}\left[\left(Bille_{e,t}+Bille_{e,t-1_{t>1}}+BilleInit_{e,t}\right)/2\right]\ \forall e \tag{105}$$

$$\sum_{o}\left(BaseInvChip_{e,o}+\frac{InvChipArea_{e,o}}{Q}\right)\leq \sum_{t}\left[\left(Supply_{e,t}+Supply_{e,t-1_{t>1}}+SupplyInit_{e,t}\right)/2\right]\ \forall e \tag{106}$$

$$\sum_{o}\left(BaseGradeChip_{e,o}+\frac{InvGradeArea_{e,o}}{Q}\right)\leq \sum_{t}\left[\left(InvGrad_{g,t}+InvGrad_{g,t-1_{t>1}}+InvPateInit_{g,t}\right)/2\right]\ \forall g \tag{107}$$

Third, since the transitions and daily production recipes selected are not explicitly represented, it is not possible to compute the exact batch-level costs at the aggregated level. Thus, we need at least to ensure the cost calculated at the aggregated level is a lower bound to the exact batch-level costs at the lower level. In order to do this, the first step consists of the determination of the minimum number of transitions possible, $z_{l,o}$, on a given line. In the aggregated model, this can be done with the constraints (18) and (20) that correspond to (108) and (109) when expressed as a function of the variables for the detailed level. Then, using the calculated value of $z_{l,o}$ and the minimum cost for a transition on each production line, ACB_l, it is possible to provide a lower bound to the transition cost calculated at the lower levels (110).

$$X_{g,l,o}\geq\frac{\sum_{t\geq oq+(1-q)}^{t\leq oq}v_{r|rg,l,t}}{Q}\ \forall g,l,o \tag{108}$$

$$z_{l,o}=\sum_{g}X_{g,l,o}-1\ \forall l,o \tag{109}$$

$$\sum_{o}\sum_{l}ACB_l z_{l,o}\leq\sum_{t}\sum_{l}\sum_{r}\sum_{r',r'\neq r}CB_{l,r',r}b_{r',r,l,t} \tag{110}$$

Implications of the Aggregation Property

By a systematic analysis of the key constraints and the objective functions of the aggregated and detailed model, we demonstrated that the conditions (93) and (94) are respected. In other words, the level 1 model is a relaxation of the level 2 model. This particular property of the aggregated formulation has the following implications:

- The optimal profit of the aggregated formulation will always provide a valid upper bound to the optimal profit function of the lower level, for the corresponding problem i.e. $z^R \geq z$ ((92),(91)). Therefore, z^R can be used to accelerate the resolution of the level 2 model. As mentioned earlier, this information, provided by the results of the aggregated capacity model, is systematically integrated to the campaign planning & order scheduling model (see Section *Integration of Level 1 and Level 2*).
- Since the feasible region of the aggregated formulation incorporates the feasible region at the lower level, we know that if the aggregated capacity planning problem is infeasible than the detailed planning problem is also infeasible.
- It ensures a certain level of consistency that is particularly important considering the fact that two models are integrated. Also, it provides more confidence in the results obtained with the multi-scale decision support tools.

However, it is important to recognize that this aggregation property does not prevent the fact that a feasible solution at the aggregated level can correspond to an infeasible solution at the detailed level. In that particular case, it is necessary to identify the violated constraints in the lower level, analyze the corresponding solution at the aggregated level and determine the appropriate strategy to resolve this problem. Finally, it is relevant to note that this demonstration has been done in the particular context of a temporal aggregation. In other context, for example the aggregation of products and recipes, a similar demonstration may be challenging to accomplish.

RESULTS AND DISCUSSION

The goal of this section is to demonstrate the advantages of multi-scale supply chain planning by implementing the proposed framework for a test case of a real-world application in the pulp and paper industry. Four main aspects of this approach, previously discussed in *Part A* and *Part B*, are specifically addressed in the following sub-sections:

1. Characterization of the higher and lower level formulations with respect to the optimality, feasibility and computational effectiveness
2. Benefits of an optimization-based planning approach that supports flexible capacity management in the pulp and paper industry
3. Importance of an integrated multi-scale approach that supports decision making at the tactical and operational levels and allows the lower level model to account for future supply and demand trends
4. Need for an on-line approach that systematically accounts for the dynamic nature of the decision environment and provides reliable planning and scheduling decision support.

All the results presented here have been generated by implementing the planning models in the GAMS [27] modeling system. The test case was based on real fibre supply and demand data sets and on a supply chain characterization that was done in collaboration with an industrial partner. This involved the specification of all the parameters used in both formulations e.g. chip supplier capacities (for maple, birch and mixed hardwood), production capacity of all pulping lines, customer orders, etc. Throughout this section, the test case (i.e. base case) was used as the basis for each analysis performed. Also, a total of 8 cases, that are modifications of the original test case, were defined to further investigate various supply chain perspectives. These cases will be described in greater detail in each of the following subsections.

Analysis of the Level 1 and Level 2 models

Before discussing the application of the supply chain planning framework, it is necessary to characterize the formulations used at each hierarchical level. More specifically, in this section, the computational effectiveness of both models is compared and a practical illustration of the aggregation properties is provided. In both cases, the test case was used for the analysis.

The first part of the analysis that aims at characterizing the computational requirements of the models, was accomplished by implementing the higher- and lower-level models in GAMS independently (i.e. without any integration of information between the models). For the purpose of the comparison, the time horizon of the aggregated capacity planning model was reduced to fit with the 3-month time horizon of the campaign planning and order scheduling problem. Additionally, consistency of the endogenous (e.g. storage and equipment capacity, planned shutdowns) and exogenous (e.g. supply and demand orders) conditions considered at each level were ensured. Table 2 summarizes the key information for the comparison of the models. The aggregated capacity problem is less complex compared to the corresponding detailed formulation. The number of binary variables is reduced by approximately 62 %, continuous variables by 85% and equations by 73%. The optimization results were obtained by solving the models on an Intel 2.52 GHz computer, using the MIP CPLEX 9.0 optimizer [28]. The aggregated capacity planning formulation is significantly more computationally effective. For the Level 1 model, a profit with a relative optimality gap of 0.0036% was reached in 15 CPU seconds whereas in the case of the detailed formulation, a 1000 CPU seconds was necessary to find a best feasible solution with a relative optimality gap of 1.008%. Even though the variable $W_{g,l,d,t}$ introduces a significant number of binary variables in the higher level formulation, the computational time required is still reasonable (i.e. limited additional complexity) since asymmetric assignments are not allowed (see constraint (16)) and because no sequencing decisions, such as in the lower level problem, are considered. Finally, the optimal profit obtained for the Level 1 model is greater than the profit obtained for the Level 2 which was expected given the aggregation properties mentioned earlier.

Table 2: Comparison of computational efficiency of the higher and lower level formulations

Problems	Binary Variables	Continuous Variables	Equations	Nodes	Iterations	Time (CPUs)	Relative Optimality Gap (%)	Profit ($)
Level 1 Aggregated Capacity Planning	1 644	3 005	4 400	2 180	25 375	15.4	0.0036	6 290 752
Level 2 Campaign Planning & Order Scheduling	4 320	20 251	16 345	3 562	358 252	1 000	1.008	6 183 861

The previous section highlighted the importance of analyzing the aggregation properties when two formulations of the "same problem" are used to support different decision levels. The aim of the next analysis is to confirm the conclusions that were obtained by the investigation of the models and, more importantly, to illustrate them in the context of a practical test case. Therefore, it is necessary to recall that, in order to ensure that the aggregated capacity planning model is a relaxation of the campaign

planning and order scheduling model, the two important conditions, (93) and (94), need to be verified. In order to respect the first conditions, it is necessary to check that the results obtained by the lower-level problem are not influenced by the addition of the constraints defined in the high-level formulation (i.e. that the feasible region is not reduced due to the addition of the Level 1 constraints). For this, the Level 1 equations were represented as a function of the parameters and variables defined in the lower level model and introduced in the Level 2 GAMS model (see Figure 4). The second condition can be verified by calculating the profit at the aggregated level based on the optimal variables obtained by solving the campaign planning and order scheduling model. For this type of analysis, the two planning models are obviously not integrated together and the integration strategy presented earlier (equations (86)-(90)) are replaced by constraints that specify the final inventory levels for chips, log and pulp.

For (Run =1 to Run = 10)

1) Solve Model L2: maximize (ProfitL2)

Subject to Eqs. (58)-(85)

Where $$\frac{\sum_{t}\sum_{g}\sum_{c} h_{g,c,t}}{\sum_{g}\sum_{c} Demand_{c,g}} = \text{OF(Run)}$$

2) Solve Model L2+: maximize (ProfitL2)

Subject to Eqs. (2)-(32) and (58)-(85)

Where $$\frac{\sum_{t}\sum_{g}\sum_{c} h_{g,c,t}}{\sum_{g}\sum_{c} Demand_{c,g}} = \text{OF(Run)}$$

3) Set the key optimal variables of Model L2+ ($i^*_{e,t}$, $Bille^*_{e,t}$, $ab^*_{e,fb,t}$, $ac^*_{e,fc,t}$, $Supply^*_{e,t}$, $ConsumpE^*_{e,l,t}$, $Pprod^*_{g,l,t}$, $h^*_{g,c,t}$, $InvGrad^*_{g,t}$, $z^*_{l,o}$, $v^*_{r,l,t}$ *) as parameters for Model L1*

4) Solve Model L1: maximize (ProfitL1)

Subject to Eqs (33)-(56)

End For

Figure 4: Solution strategy for the aggregation analysis

The implementation of the models in order to validate the aggregation properties was done according to the solution strategy presented in Figure 4. The analysis was performed for various cases of order fulfillment, which was a useful approach to visualize and identify potential problems in terms of aggregation properties. Within the loop described in Figure 4, the order fulfillment was varied from 9% (*Run 1*) to 99% (*Run 10*). The first step of the algorithm consists of running the Level 2 model for the test case in order to generate the benchmark i.e. the unaltered results of the detailed model (*Model L1*). In the second step, the Level 1 constraints are added to the detailed formulation and the resulting augmented Level 2 model (*Model L2*$^+$) is solved for the test case. Given that the minimum average inventory calculation is specific to the aggregate capacity planning model (and since it requires an inventory cost in the objective function), two additional steps are required in order to calculate the inventory holding cost and thus the profit at the aggregated level. Step 3 ensures that the value of the optimal variables obtained by solving the *Model L2*$^+$ are used to calculate the Level 1 profit in Step 4. Finally, in Step 4, the profit at the aggregated level is determined by solving *Model L1* where the only variables considered are those that relate to the minimum inventory calculation.

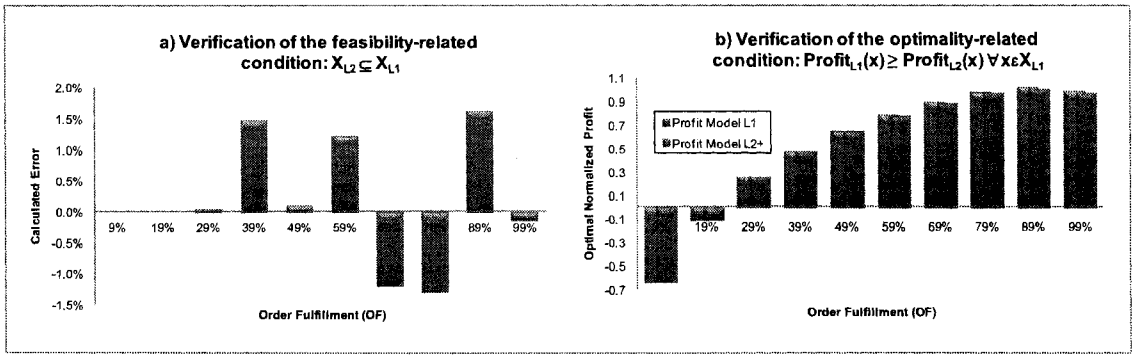


Figure 5: Practical validation of the aggregation properties (relative optimality gap equal to 2.5%)

The results of the analysis show that the aggregate capacity planning problem is indeed a relaxation of the campaign planning & order scheduling problem (Figure 5). Figure 5a compares the results obtained for the *Model L2* and *Model L2*$^+$. The error refers to the relative deviation of the profit calculated by the *Model L2*$^+$ compared to the profit obtained with the standard campaign planning and order scheduling model. Given the relative optimality gap of 2.5%, we can conclude that the higher level constraints do not affect the lower level model solutions and thus, that the feasible region defined by the aggregated model is greater than or equal to the feasible region of the detailed planning model. Figure 5b presents the comparison between the profit determined at the higher (*Model L1*) and lower (*Model L2*$^+$) levels. The results have been normalized using the highest profit obtained for Model L2$^+$ (*Run 9*). It is shown that the profit corresponding to the aggregated formulation is an upper bound to the profit calculated by the detailed planning formulation for all order fulfillment rates. The results of this analysis, obtained by using the test case and by implementing the solution strategy in GAMS, are consistent with the conclusions that were made based on a more theoretical investigation. In addition, this practical approach of examining the aggregation property was very useful to highlight potential issues regarding the optimality and/or the feasibility of the proposed hierarchical models.

Benefits of supply chain planning

As discussed in *Part A*, there is a need in the pulp and paper industry to better integrate the business units along the supply chain. This would not only help breaking the silos but also help maximizing the supply chain profitability instead of maximizing the profitability of each business unit locally, often at the expense of the others. Optimization-based supply chain planning can provide support to evaluate the trade-offs and to manage the supply chain complexity. This is illustrated in this section by considering two perspectives of the aforementioned test case. The first emphasizes the demand and production cycles and the second the procurement and production cycles of a BCTMP pulp mill. In both cases, only the Level 2 model was used to demonstrate the benefits of supply chain planning. Moreover, the models have been run for different levels of order fulfillment. This was done by implementing an additional order fulfillment constraint, such as presented in Figure 4 of the previous sub-section.

The first perspective shows how an optimization-based approach can help to systematically identify the trade-offs between the demand and production cycles and to find the optimal alignment of manufacturing capacity and market demand. For this, three cases have been defined that are all variations of the initial test case (i.e. base case). They are described in Table 3. The first and second cases were use

to assess the impact on capacity planning and supply chain profitability of more and less favorable market pulp demand scenarios. The third case, that combines a weak demand and a shortage of wood fibres, was elaborated to illustrate the impact of an even more constrained supply chain environment. In all cases, these scenarios were simply implemented by modifying the test case values of the pulp prices and the fibre costs (for maple only).

Table 3: Variations of test case considered for the analysis of demand/production cycles

Variations of test case	***Description***	***Implementation***
Case #1	Emulate a *stronger* pulp demand, for all grades, than the test case.	10 % increase to the test case values of $Revenu_{c,g}$.
Case #2	Emulate a *weaker* pulp demand, for all grades, than the test case.	10 % decrease to the test case values of $Revenu_{c,g}$.
Case #3	Emulate a *weaker* pulp demand (*Case #2*) combined with a *shortage* of maple fibre in the beginning of the time horizon (see the second analysis below).	♦ 10 % decrease to the test case values of $Revenu_{c,g}$ ♦ 50% increase to the test case values of $Cac_{maple,fc,p}$ & $Cab_{maple,fb,p}$ for the first six supply period (weeks).

The results obtained are presented in Figure 6 where each curve represents the evolution of the supply chain profitability (normalized using the maximum profit obtained for the base case) as a function of the specified order fulfillment rates for each case considered. The optimal profit, corresponding to the best capacity management strategy in each situation, is identified by an "X". For the more optimistic demand scenario (*Case #1*), the slope of the curve is always positive and thus, maximum capacity utilization corresponds to maximum supply chain profitability. On the other hand, in the case of weak pulp demand, the maximum supply chain profit does not occur at maximum capacity utilization. For *Case #2 & #3*, the slopes of the curves are negative for order fulfillment values greater than 80% i.e. the supply chain profit is decreasing if the pulp mill is forced to produce in order to satisfy this portion of the demand. This situation, which is in contrast with the typical planner's intuition, clearly requires a change in respect to the traditional capacity management strategy. Given the pulp market variability, it is essential for the competitiveness of the market pulp producers to have the tools necessary to assess, at any given time, the true profitability of their SC operations.

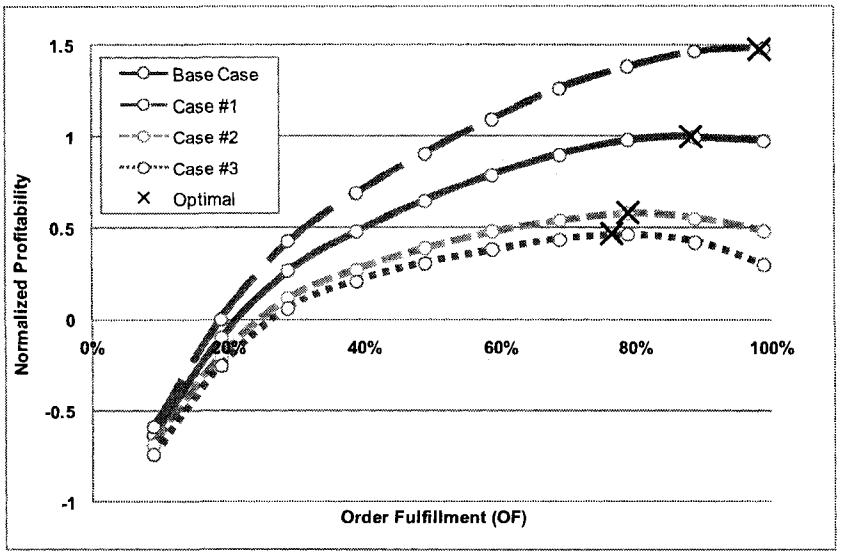


Figure 6: Effect of business environment on optimal supply chain planning

The second perspective illustrated considers more specifically the supply and production cycles of the pulp mill. Here, the aim is to show the benefits of a holistic approach compared to the independent planning of the pulp mill (i.e. without systematically taking into account the supply perspective). For this, the results of the campaign planning and order scheduling model were compared to the results of the same model. However, the integer variables $a(r,l,t)$, which refer to the selection of the grade recipe to produced, were all fixed before the optimization according to an industrial heuristic. This heuristic is based on a predetermined production plan that consists of producing alternatively 5 weeks of maple grades and 1.5 weeks of birch grades on the second pulp line (the first must be accommodate the demand of the internal customer). This provides a good equilibrium in terms of supply and demand and it minimizes the number of transitions between pulp grades of different wood species (for more details, see *Part A*). Finally, it is important to note that even if the integer (recipe) variables are fixed to represent the heuristic, all other continuous variables are still optimized.

To demonstrate the advantage of optimizing the supply chain, three new supply-related cases were defined for the analysis. Again, each case is a variation of the initial test case considered and they were elaborated specifically to analyze the important issue of aligning the fibre procurement and pulp production strategies. As mentioned in *Part A*, this is a particularly relevant issue in the Eastern-Canadian context where fibre supply costs are a key element of overall profitability. Table 4 describes *Cases #4*, *#5* and *#6*. The first consists of simulating a shortage of maple fibre at the beginning of the time horizon, when the production of maple grades is required by the heuristic. The second case combines the condition defined for the first case and additionally considers a reduction of the maximum inventory level. This emphasizes the need for supply-capacity-demand coordination when the inventory levels (or working capital) are reduced. Lastly, the third case incorporates the situations described in the two previous cases and additionally increases the "pressure" on fibre procurement by decreasing the initial inventories. This reduces the possibility of postponing the supply of maple to later time periods and emphasizes the trade-offs at the beginning of the time horizon.

Table 4: Variations of test case considered for the analysis of procurement/production cycles

Variations of test case	*Description*	*Implementation*
Case #4	Emulate a *shortage* of maple fibres in the beginning of the time horizon.	50% increase to the test case values of $Cac_{maple,fc,p}$ & $Cab_{maple,fb,p}$ for the first six supply periods (weeks).
Case #5	Emulate a *leaner* supply chain with lower maximum inventory levels (implying less working capital) - combined with the situation described in *Case #1*.	♦ 50% increase to the test case values of $Cac_{maple,fc,p}$ & $Cab_{maple,fb,p}$ for the first six supply periods (weeks). ♦ 25% decrease of the test cases value of $MaxPulpInv$, $MaxLogInv_c$, $MaxChipInv_c$.
Case #6	Emulate a even more *constrained* supply chain situation with low inventory levels at the beginning of the time horizon - combined with the situations described in *Case #1 & #2*.	♦ 50% increase to the test case values of $Cac_{maple,fc,p}$ & $Cab_{maple,fb,p}$ for the first six supply periods (weeks). ♦ 25% decrease of the test case values of $MaxPulpInv$, $MaxLogInv_c$, $MaxChipInv_c$. ♦ 25% decrease of the test case values of $SupplyInit_{c,t}$, $BilleInit_{c,t}$. ♦ 15% decrease of the test case values of $InvPateInit_{g,t}$*.

* For a reduction greater than 15%, there is no feasible solution for OF = 99%, in the case of the heuristic.

Figure 7 presents the results obtained for the base case as well as the three supply cases considered. In the figure, profit improvement refers to the profit increase realized by the optimization-based planning compared to when the industrial heuristic was applied. The profit improvement is represented as a percentage of the profit realized with the heuristic. Also, only the results obtained for order fulfillment greater or equal to 49% are presented. This is because, given the constrained environment defined by the scenarios considered, infeasible solutions were often obtained for lower order fulfillment values (especially in the case of the heuristic). Also, the results for low order fulfillment are less relevant to consider in terms of analyzing the results of the supply scenarios.

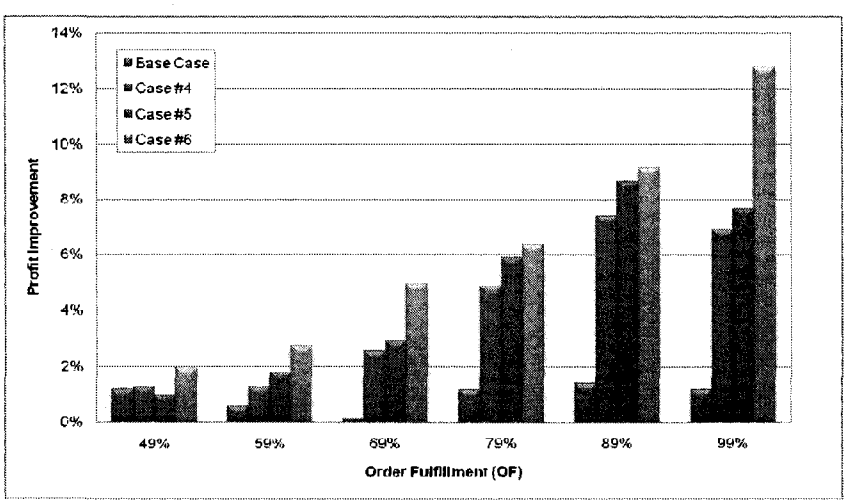


Figure 7: Improvement realized by optimization-based planning compare to industrial heuristics

For the base case, the difference between the heuristic and the optimization is not significant (Figure 7). This suggests that the industrial heuristic is a good planning approach in the case of "normal" supply chain conditions i.e. relatively favorable and balanced demand and supply conditions. It is necessary to recall that, for the model that incorporates the industrial heuristic, the continuous variables are optimized. This might to some extent explain why the heuristics provides profits similar to the fully optimized Level 2 model. Moreover, the more constrained are the supply chain scenarios, the greater is the profit improvement obtained by using the fully optimized planning model as can be concluded by inspecting the results for *Cases #4*, *#5* and *#6* for a given order fulfillment value (the only exception being for *OF* = 49%). For the same reason, profit improvement increases with the specified order fulfillment (i.e. the greater is the order fulfillment, the more constrained is the supply chain).

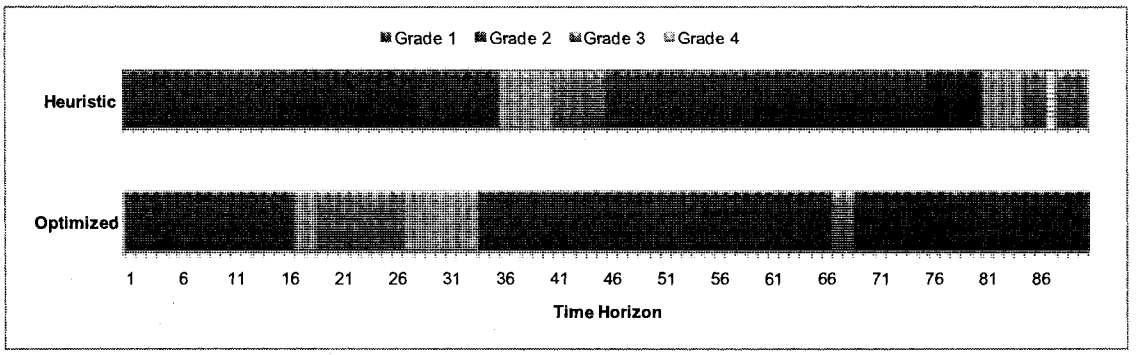


Figure 8: Optimization-based planning allows to find the optimal production campaign for a given supply chain context (for the *Case #6* and *OF* = 99%, as presented in Table 4)

Although they may provide a good framework for planning in a "normal" business environment, industrial heuristics may not perform well in more difficult situations. In this case, optimization-based planning, considering the supply chain as a whole, allows to systematically address the trade-offs along the supply chain in order to adapt to various situations and to maximize the supply chain profitability. For example, Figure 8 shows, for *Case #6* and *OF* = 99%, how the optimized production plan of the second pulp line was adapted to account for fibre supply issues. The birch grades (*Grade 3 & 4*) are produced sooner in the case of the optimized plan in order to decrease the pressure on the procurement of maple fibre at the beginning of the time horizon.

Benefits of the multi-scale approach

A critical element of the proposed planning framework is the capability to support decision making for different supply chain levels. This not only allows incorporating the expertise and information available at each level but, more importantly, to provide the visibility and ensure the consistency of the supply chain decisions. The results presented in this subsection demonstrate the need and the advantages of a multi-scale approach.

As presented in Table 5, two cases (*#7* & *#8*) have been defined for this purpose. It is important to notice that, in both cases, the test case has been used to define the Level 2 model. Thus, *Cases #7* & *#8* are only characterized by different data inputs in the Level 1 model. The first case (*#7*) emulates a strong

forecasted pulp demand at the higher level. This was implemented by increasing the total pulp demand of birch grades (for months 4& 5) and maple grades (for months 6 & 7). The second case (*#8*) incorporates the situation defined in *Case #7* and, in addition, emulates a shortage of fibre for the corresponding months (i.e. months 4 to 7) that might, for example, correspond to a shortage of fibre during the spring season. It was implemented by gradually reducing the forecasted supply capacity in the Level 1 model.

In order to verify the value of the multi-scale model, it was necessary to compare the results obtained by integrated and non-integrated planning approaches. The former were generated by implementing the proposed planning approach and integration strategy (see Figure 2), in an offline fashion. The latter were obtained by considering that the lower-level decisions are made independently i.e. without taking into account the longer-term perspective. Contrary to the integrated approach, this was implemented by first optimizing the Level 2 model (for the test case) and then by running the Level 1 model where the inventory levels and production quantities of the first three months were dictated by the results obtained at the lower level (Level 2).

Table 5: Variations of test case considered for the analysis of the multi-scale approach

Variations of test case	***Description***	***Implementation***
Case #7	Emulate a *stronger* forecasted pulp demand, for the longer-term.	♦ Level 2: all parameters are kept constant (i.e. it is the test case data). ♦ Level 1 – demand situation: o Birch pulp grade – 14% total increase of demand for months M4 & M5 compare to the Level 2 total demand. o Maple pulp grade – 28% total increase of demand for months M6 & M7 compare to the Level 2 total demand.
Case #8	Emulate a *shortage* of wood fibre for the longer-term (e.g. fibre shortage during Spring) – combined with the situation defined for *Case #7*.	♦ Level 2: all parameters are kept constant (i.e. it is the test case data). ♦ Level 1 – demand situation: the demand situation defined for Case #7 is implemented. ♦ Level 1 – supply situation: o Forecasted supply capacity (for log & chip) is reduced for months 4, 5, 6 & 7 by respectively 30%, 45%, 30% & 15%.

The optimal profits obtained at the higher and lower levels are presented in Table 6. First, since the Level 2 corresponds to the test case, the profit for the non-integrated approach is the same for both cases considered and corresponds to the result presented earlier in Table 2. Moreover, in both cases, the optimal profit obtained at the higher level is greater for the integrated multi-scale approach. This is due to the fact that the model can adapt the decision variables in the first three months in order to provide more flexibility for the long-term opportunities, based on the longer term supply chain context. Even if it reduces the short-term profitability (compared to the non-integrated case), we can see that this strategy allows maximizing the overall profitability.

Table 6: Comparison of profit obtained with and without the multi-scale approach

Variations of test case		*Profit Level 1 - High Level ($)*	*Profit Level 2 - Low Level ($)*
Case #7	With Integration	30 187 147	3 095 322
	Without Integration	29 834 465	6 183 861
Case #8	With Integration	28 145 629	2 123 449
	Without Integration	27 838 890	6 183 861

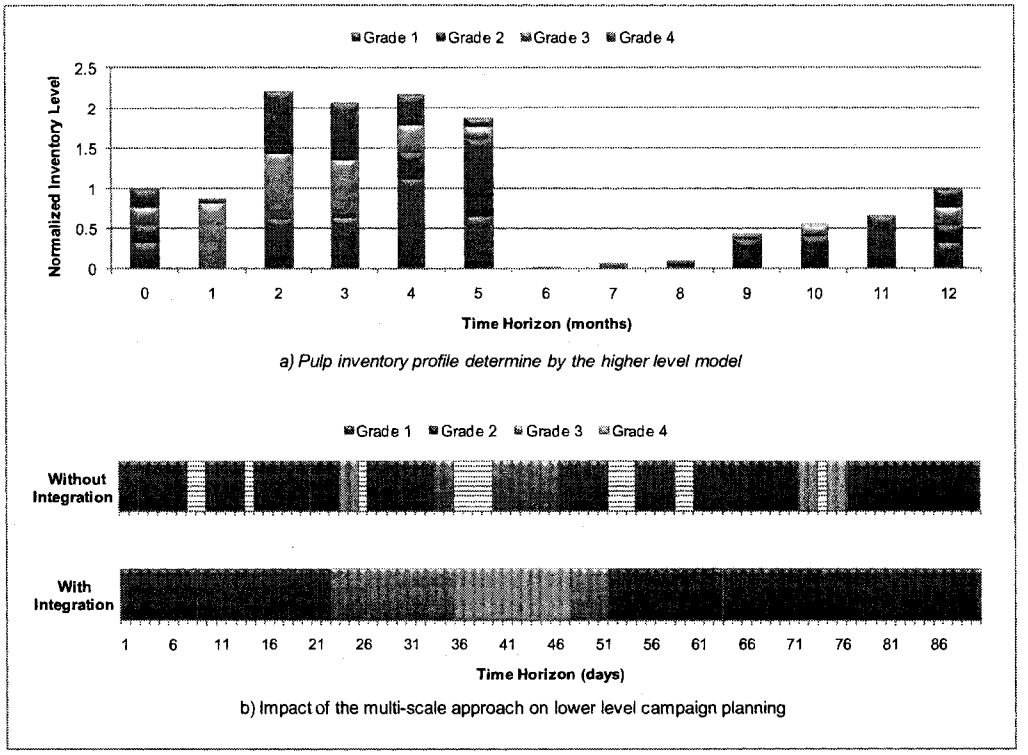


Figure 9: Application of the multi-scale approach for the demand-related *Case #7*.

Figure 9 shows a good example for the demand-related *Case #7*, where the lower level campaign plan is adapted in order to account for the longer-term opportunities identified by the Level 1 model. Figure 9a presents the yearly pulp inventory profile, normalized with the total initial inventory (specified at time 0). It indicates the optimal pulp inventory required in order to realize the most benefits from the strong pulp demand of periods 4, 5, 6 & 7. In this particular case, the pulp inventory levels of the third time period (M=3) are one of the most important indications provided by the higher-level to the lower-level model. By inspecting Figure 9b, we can clearly observe the impact of integrating such information when planning for the production campaigns. In fact, without considering the optimistic future demand forecasts, the production plan obtained at the lower level suggests that there is a surplus of available production capacity. This is obviously not the case considering the future demand, and the pulp

mill should operate at maximum capacity utilization in order to meet the required inventory targets as suggested by the second campaign plan. For the integrated multi-scale approach, significantly more birch grades (grades 3 & 4) are produced. This is required in order to accommodate the strong demand for birch products, early in months 4 & 5.

Another example of the influence of the higher level on short-term planning for the supply-related *Case #8* is provided in Figure 10. Figures 10a and 10b present the inventory profile for wood logs and wood chips for the integrated and non-integrated planning approaches, respectively. Again, the inventory levels have been normalized using the total initial inventory (same for integrated and non-integrated approaches). We can clearly observe the impact of the longer-term procurement context on the inventory level calculated by the Level 2 model. Given the expected shortage of fibres for the upcoming months 4 to 7, the higher-level model provides relatively large chip and log inventory targets compared to the final inventory values specified in the case of the non-integrated planning approach. Therefore, the resulting inventory build-up is the best strategy to ensure that enough fibre will be available at the lower level at a reasonable cost for future months (when the demand is very strong).

Finally, the results demonstrate the advantages of the multi-scale approach. In addition to providing tailored support to the decision maker at each level, this planning approach ensures that the appropriate interactions are made in order to ensure that the lower level model takes into account the longer-term issues when making shorter-term decisions.

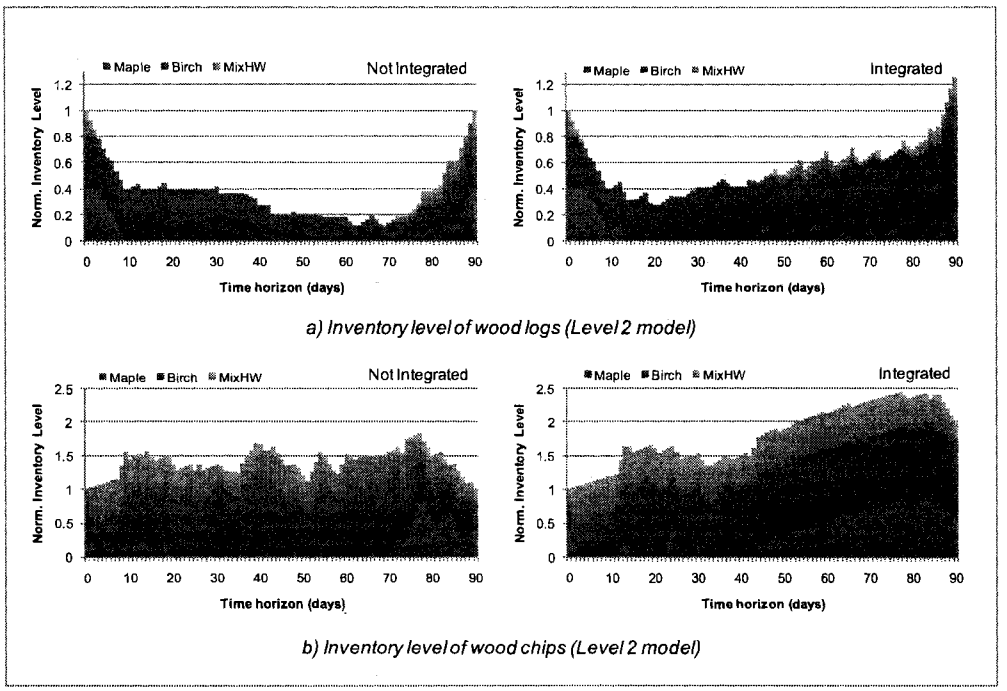


Figure 10: Impact of the longer-term procurement context on the inventory build-up at the lower level.

Benefits of the integrated on-line approach

This last part presents results that illustrate how the multi-scale model can be used online in order to better support the dynamic decision processes and to account for the fact that not all relevant information may be available when planning decisions need to be made. The online application of the multi-scale planning framework for one month, is schematically represented in Figure 11. As mentioned in *Part A*, the first step consists of optimizing the aggregated capacity planning model (Level 1) based on most up-to-date information for month M1 to M3, and on the forecasts available for the remaining months. Then, the second step consists of running the campaign planning and order scheduling model (Level 2) for weeks 1 to 12 based on the information available (e.g. demand orders) at this point in time. Then, for each week of the month, new information must be incorporated and the Level 2 model is re-optimized (*Step 3, 4 & 5*). Finally, to ensure the consistency between the two models, the time horizon considered at the lower level shrinks from 12 to 9 weeks (i.e. WK12 always remains the final week of the time horizon considered).

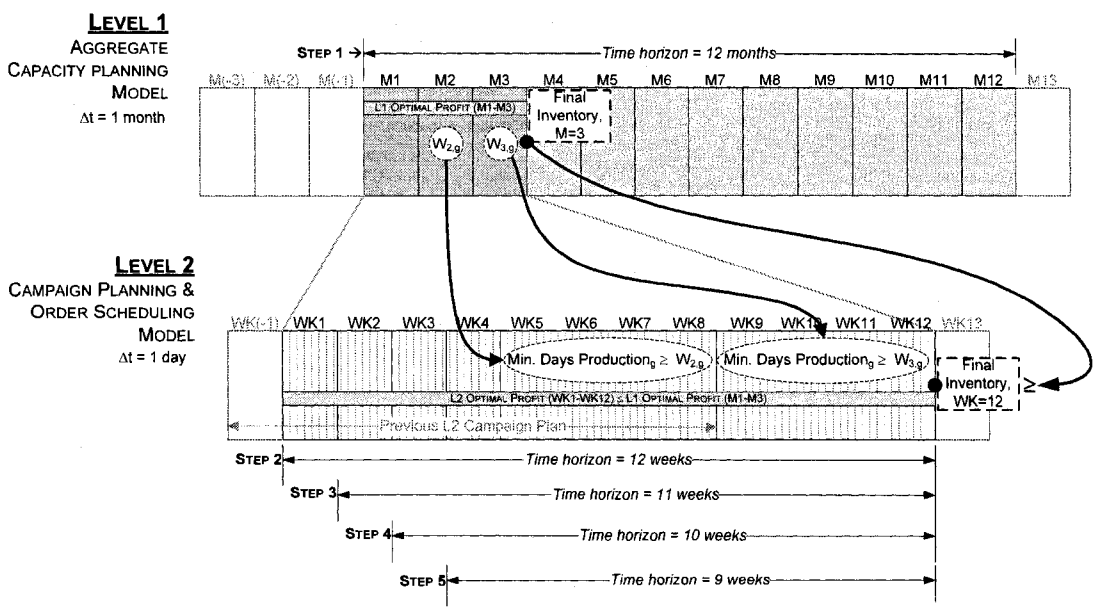


Figure 11: On-line application of the multi-scale framework for a given month.

In order to generate the results, this particular procedure was applied to the *Case #7* presented in the previous sub-section, where the multi-scale model was used in an "off-line" fashion. For *Step 2, 3, 4 & 5* of the Level 2 model, varying customer orders were considered in order to emulate the uncertainty and lack of demand information. The order lists that were considered for each week are given in Table 7. New customer orders are represented in *italic* and changing information are marked with an " * ". The customer orders of week 4 correspond exactly to the input instance of the test case considered until now. Finally, it is important to mention that after each step the decisions variables of the corresponding days

are frozen for the following steps (this allows to take into account that the production that is done cannot be changed anymore).

Table 7: Demand information gradually available over time

Customer Order	*Pulp Grade*	*Weeks*			
		1	*2*	*3*	*4*
C1	Grade 1	-	-	-	*303*
C2	Grade 1	*5000*	5000	6701*	6701
C3	Grade 1	*8000*	11281*	11281	11281
C4	Grade 1	*5311*	5311	5311	5311
C5	Grade 1	-	*8354*	8354	8354
C6	Grade 1	*6198*	6198	6198	6198
C7	Grade 1	-	-	*6336*	6338
C8	Grade 1	*178*	178	178	178
C9	Grade 2	-	-	-	*5239*
C10	Grade 2	*1500*	2968*	2968	2968
C11	Grade 2	*6852*	6852	6852	6852
C12	Grade 2	-	*375*	375	375
C13	Grade 3	*648*	648	648	648
C14	Grade 3	-	-	*2018*	2018
C15	Grade 3	*1520*	1520	1520	1520
C16	Grade 3	*679*	679	679	679
C17	Grade 4	*470*	470	470	470
C18	Grade 4	*150*	150	150	305*
C19	Grade 4	-	*700*	700	700
C20	Grade 4	*200*	510*	510	510
C21	Grade 4	*682*	682	682	682
C22	Grade 4	-	-	*590*	590
C23	Grade 4	-	-	-	*728*
C24	Grade 4	*252*	252	252	252
C25	Grade 4	*44*	44	44	44

The results obtained by the on-line application of the planning framework are presented in Figure 12. The production campaigns are more defined as new demand information becomes available. After the first week, not enough customer orders are known and production campaigns are difficult to determine with confidence throughout the entire time horizon. After the last week, given that customer orders are well known, the production plan becomes more precise. One of the particularities of the on-line approach is that, given the receding time horizon, only the first week of a production plan is implemented. Thus, the campaign plan obtained for the rest of the horizon will never be implemented. This gives enough flexibility to accommodate for uncertainties in future orders or events. Moreover, by comparing the results obtained for the last week (Figure 12) to the results of *Case #7* in the previous sub-section (Figure 9), it becomes clear that if not enough preliminary information is provided at the beginning of the time horizon, there is a greater risk that the decisions suggested by the online planning are not consistent with the planning that would be "theoretically" obtained by an off-line approach based on a perfect knowledge of customers orders. Even though it is sub-optimal compared to the off-line

approach, the on-line approach is nevertheless an interesting way to not only be consistent with the dynamic nature of decision processes, but also to deal with uncertainties and new information as they become available and to improve the planning (at higher and lower levels) over time.

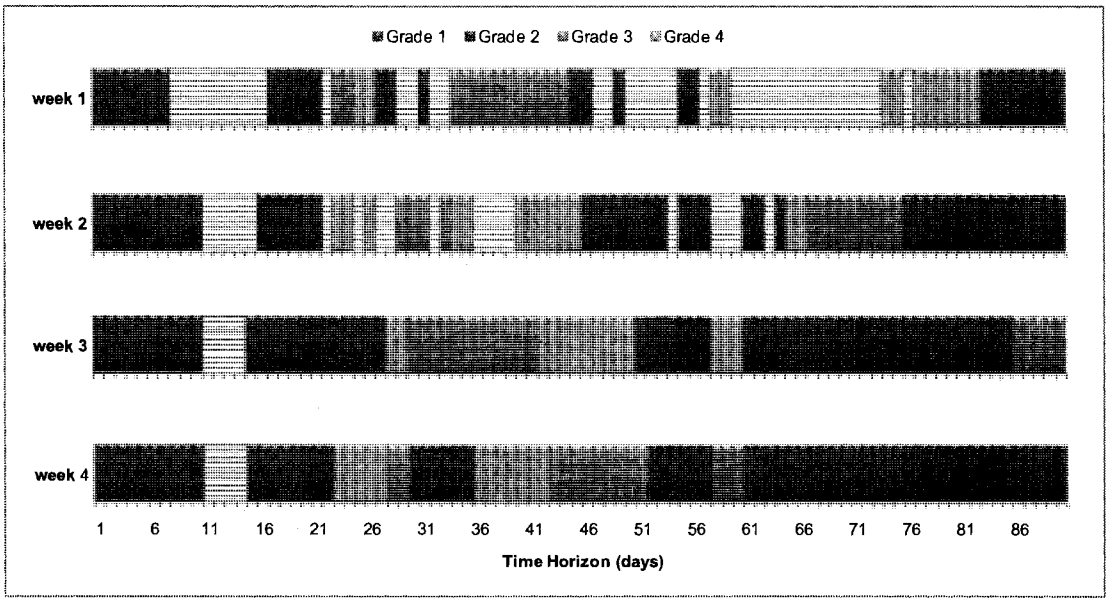


Figure 12: Evolution of the campaign plan as new demand information becomes gradually available.

CONCLUSIONS

In the pulp and paper industry, supply chain management is increasingly recognized as a key driver to ensure operational excellence and competitiveness in regional and global marketplaces. Decision support tools, for enterprise-wide optimization, can help to manage the complexity of the supply chain by systematically addressing the trade-offs across the various business units and decision levels. In this context, planning and scheduling is an important class of supply chain problems that provides a holistic view of these trade-offs and, more importantly, helps to determine the best way of using the available resources to maximize supply chain performance. This two-part paper presented the development of a multi-scale on-line supply chain planning framework and its application to the case of the fibre supply chain of a high-yield pulp mill. The first part (*Part A*) described the pulp and paper supply chain as well as the planning and scheduling decision processes and introduced the proposed supply chain planning framework. In this second part (*Part B*), the aim was to present the mathematical formulation of the models and to show the benefits of the approach by providing results of the application of the framework to a test case.

The proposed planning framework incorporates a higher-level decision making supply chain model suitable for tactical planning to find the optimal balance of fibre supply and demand throughout the year, and a lower level decision making model for operational planning that maximizes short-term profitability given the supply chain capability and supply and demand orders. At the lower level, the campaign planning and order scheduling problem include a detailed daily representation of the

manufacturing capability of the mill where the resulting modeling complexity is compensated by the reduction of the time horizon considered. At the higher level, the aggregated capacity planning problem is essentially an aggregation of the lower level problem that considers a simpler representation of the managed system and a longer time horizon. The models were run with a receding time horizon where each time the state of the managed system was updated and new information was incorporated. The higher-level model provides indications that allow the lower-level model to indirectly account for future supply and demand trends, without having to extend the time horizon of the more detailed lower-level model. Lastly, both models are formulated as mixed-integer linear programming problems with a discrete time representation.

The results provided by the implementation of the formulations for a test case elaborated based on a real-world pulp and paper application, demonstrated the benefits related to the four main characteristics of the planning framework. First, it was shown that optimization-based planning allows to better manage the trade-offs across the supply chain cycles of the pulp mill (i.e. procurement, production and demand cycles) and thus, to support flexible capacity management strategies. Second, the results also showed the importance of the multi-scale approach to identify the trade-offs across supply chain decision levels. This ensures that the long-term supply and demand trends are taken into consideration when planning at the lower level. Third, it was shown that the online implementation of the planning framework can accommodate the dynamic nature of the decision processes involved and thus improve the plan/schedule as new orders or information becomes available to the decision maker. Finally, the importance of doing a systematic investigation of the aggregation properties for planning frameworks such as the one presented (where two formulations of the same problem are used) was highlighted. The results of the theoretical and practical analysis demonstrated that the higher level model is a relaxation of the lower level model.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank in particular Jason Linkewich at Tembec Inc. for his support and, Kevin Riemer and Matty Janssen for their expert advice throughout this project. This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chair at École Polytechnique de Montréal, and by the Centre for Process Systems Engineering at Imperial College London. Martin Laflamme-Mayer is supported by a scholarship provided from *Le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies.*

NOTATION

LEVEL 1- AGGREGATED CAPACITY PLANNING

Sets and Indexes

T^*	Set of time periods, index $t^* \varepsilon T^*$
D	Set of days of production available within a month, index $d \varepsilon D$
E	Set of wood species, index $e \varepsilon E$
F_c	Set of chip suppliers, index $f_c \varepsilon F_c$
F_b	Set of log suppliers, index $f_b \varepsilon F_b$
L	Set of pulp production lines at the mill, index $l \varepsilon L$

R	Set of production recipes, index $r \varepsilon R$ *Alias (r,r')*
G	Set of pulp grades produced at the mill, index $g \varepsilon G$
$RG_{r,g}$	Set of exclusive associations between production recipes and pulp grades that can be produced, index $rg \varepsilon RG$
C	Set of customers, index $c \varepsilon C$
A	Set of extremes points for the linear interpolation (minimum average inventory level) within an aggregated period, index $a \varepsilon A$ ($\|A\| = 1 + \|B\|$)
B	Set of segments for the linear interpolation within an aggregated period, index $b \varepsilon B$ ($\|B\|$ = number of days included in an aggregated period t^*)

Parameters

Q	Number of day within an aggregated period

Fibre Procurement and Handling

$Cchipper$	Maximum monthly chipping capacity on-site
$NChipper_e$	Yield of the chipping process, for each wood specie e
$LBMax$	Maximum monthly log delivery capacity at the mill
$LCMax$	Maximum monthly chip delivery capacity at the mill
$CapFC_{e,fc,t^*}$	Forecasted supply capacity of chip supplier fc, for wood specie e, during period t^*
$CapFB_{e,fb,t^*}$	Forecasted supply capacity of log supplier fb, for wood specie e, during period t^*
$SupplyInit_{e,t^*}$	Initial inventory of chips e in the piles ($= 0 \ \forall \ t^*>1$)
$BilleInit_{e,t^*}$	Initial inventory of logs e on-site ($= 0 \ \forall \ t^*>1$)
$InvBilleFinal_e$	Final inventory of logs e in the piles
$InvChipFinal_e$	Final inventory of chips e in the piles
$MaxLogInv_e$	Maximum inventory of logs e on-site
$MaxChipInv_e$	Maximum inventory of chips e on-site

Pulp Production

$Rin_{l,r,e}$	Consumption (input proportion in %) of chips e if recipe r is selected on line l
$Rout_{r,l}^{MAX}$	Maximum pulp production rate (in ADMT[†]/day) if recipe r is selected on line l
$Nprod_{r,l}$	Production yield (in %) if recipe r is selected on line l
$TimeTransA_l$	Minimum transition time on line l
$TimeLossP_{l,t^*}$	Planned shutdowns on line l for period t^*
$FConv$	Conversion factor from ADMT to BDMT
$TemPre_{r',l}$	Length of the production campaign of recipe r' that is being produced on line l before the time horizon

[†] ADMT stands for "Air Dry Metric Tons", a unit that is widely used in pulp and paper; it corresponds to pulp that contains 90 %(m/m) of fibre and 10 %(m/m) of moisture. Similarly, BDMT stands for "Bone Dry Metric Tons" and corresponds to 100%(m/m) of fibre.

$RecPre_{r',l}$	Recipe r' that is being produced on line l before the time horizon; equal to 1 if the recipe r' is produced, 0 otherwise
$Lmin_{r,l}$	Minimum campaign length for recipe r on production line l

Pulp Inventory and Demand

$DemandL_{c,g,t^*}$	Forecasted external demand of pulp g from customer c during t^* (=0 $\forall$ $t^* \leq 3$)
$DemandS_{c,g}$	Shaped external demand of pulp g from customer c (corresponds to months 1-3)
$FDem_{c,g,t^*}$	Shaping factor used for the demand of pulp g from customer c during t^*
DTB_{l,g,t^*}	Number of days during t^* for which the demand of pulp g from line l is expected to be greater than 0
$DemandInternal_{g,t^*}$	Forecasted internal demand of pulp g at time t^*
$InvPateInit_{g,t^*}$	Initial inventory for pulp g on-site (= 0 $\forall$ $t^*>1$)
$InvPulpFinal_g$	Final inventory of pulp g
$MaxPulpInv$	Total maximum inventory of pulp on-site

Revenue and Cost

$RevenuL_{c,g,t^*}$	Forecasted net sales revenue for pulp g and customer c during period t^* (=0 $\forall$ $t^*< 4$)
$RevenuS_{c,g}$	Net sales revenue (corresponding to shaped demand - months 1-3) for pulp g and customer c
$RevenuInt_{g,t^*}$	Forecasted net sales revenue for pulp g and the internal customer during period t^*
Cac_{e,fc,t^*}	Forecasted fibre supply cost of chips e from supplier fc during period t^*
Cab_{e,fb,t^*}	Forecasted fibre supply cost of logs e from supplier fb during period t^*
$CostChip_e$	Chipping cost for logs e
$CU_{g,l}$	Unit-level manufacturing costs of producing pulp g on line l
$CDInternal_g$	Avoided manufacturing costs for pulp g in the case of the internal customer
ACB_l	Minimum batch-level costs (per transition) on line l
CTD_l	Forecasted daily (avoidable) costs for each production line l
CTF	Forecasted monthly fixed (unavoidable) costs at the mill
$CInvB_e$	Inventory holding cost for logs e (monthly percentage)
$CInvC_e$	Inventory holding cost for chips e (monthly percentage)
$CInvP_g$	Inventory holding cost for pulp g (monthly percentage)

LEVEL 2- CAMPAIGN PLANNING AND ORDER SCHEDULING

Sets and Indexes

T	Set of time periods, index $t \varepsilon T$
	Alias (t, τ)
O	Set of aggregated periods corresponding to the time horizon at the lower level, $o \varepsilon O$
P	Set of supply periods, index $p \varepsilon P$
E	Set of wood species, index $e \varepsilon E$
F_c	Set of chip suppliers, index $f_c \varepsilon F_c$
F_b	Set of log suppliers, index $f_b \varepsilon F_b$
L	Set of pulp production lines at the mill, index $l \varepsilon L$

R	Set of production recipes, index $r \varepsilon R$ *Alias (r,r')*
G	Set of pulp grades produced at the mill, index $g \varepsilon G$
$RG_{r,g}$	Set of exclusive associations between production recipes and pulp grades that can be produced, index $rg \varepsilon RG$
C	Set of customer orders, index $c \varepsilon C$

Parameters

Q	Number of days within an aggregated period

Fibre Procurement and Handling

$Cchipper$	Maximum daily chipping capacity on-site
$NChipper_e$	Yield of the chipping process, for each wood specie e
$LBMax$	Maximum daily log delivery capacity at the mill
$LCMax$	Maximum daily chip delivery capacity at the mill
$CapFC_{e,fc,p}$	Supply capacity of chip supplier fc, for wood specie e, during supply period p
$CapFB_{e,fb,p}$	Supply capacity of log supplier fb, for wood specie e, during supply period p
TAo_p	Starting time of supply period p
TAf_p	Ending time of supply period p
$SupplyInit_{e,t}$	Initial inventory of chips e in the piles (= 0 $\forall$ t> 1)
$BilleInit_{e,t}$	Initial inventory of logs e on-site (= 0 $\forall$ t> 1)
$MaxLogInv_e$	Maximum inventory of logs e on-site
$MaxChipInv_e$	Maximum inventory of chips e on-site

Pulp Production

$Rin_{l,r,e}$	Consumption (input proportion in %) of chips e if recipe r is selected on line l
$Rout_{r,l}^{Max}$	Maximum daily pulp production rate (in ADMT) if recipe r is selected on line l
$Rout_{r,l}^{Min}$	Minimum daily pulp production rate (in ADMT) if recipe r is selected on line l
$Nprod_{r,l}$	Production yield (in %) if recipe r is selected on line l
$\theta_{l,r',r}$	Time required to do a transition from recipe r' to recipe r on production line l
$Lmin_{r,l}$	Minimum campaign length for recipe r on production line l
$StopL_{l,t}$	Planned production shutdown of one day (for maintenance); equal to 1 if there is a shutdown on line l during time t, otherwise equal to 0
$StopS_{l,t}$	Planned production shutdown of less than one day (in hours) on line l during time t
$TemPre_{r',l}$	Length of the production campaign of recipe r' that is being produced on line l before the time horizon
$RecPre_{r',l}$	Recipe r' that is being produced on line l before the time horizon; equal to 1 if the recipe r' is produced, 0 otherwise
$FConv$	Conversion factor from ADMT to BDMT

Pulp Inventory and Demand

$Demand_{c,g}$	Quantity of pulp g required by the customer order c
To_c	Starting time of the time window requested by customer order c

Tf_c	Ending time of the time window requested by customer order c
$DemandInternal_{g,t}$	Quantity of pulp g required by the internal customer at time t
$InvPateInit_{g,t}$	Initial inventory for pulp g on-site (= 0 ∀ t > 1)
$MaxPulpInv$	Total maximum inventory of pulp on-site

Revenue and Cost

$Revenu_{c,g}$	Net sales revenue for pulp g and customer order c
$RevenuInt_g$	Net sales revenue for pulp g and the internal customer
$Cac_{e,fc,p}$	Fibre supply cost of chips e from supplier fc during supply period p
$Cab_{e,fb,p}$	Fibre supply cost of logs e from supplier fb during supply period p
$CostChip_e$	Chipping cost for logs e
$CU_{g,l}$	Unit-level manufacturing costs of producing pulp g on line l
$CDInternal_g$	Avoided manufacturing costs for pulp g in the case of the internal customer
$CB_{l,r',r}$	Cost of a transition (batch-level) from recipe r' to recipe r on line l
CTD_l	Daily (avoidable) costs for each production line l
CTF	Fixed period (unavoidable) costs at the mill
$CInvB_e$	Inventory holding cost for logs e (daily percentage)
$CInvC_e$	Inventory holding cost for chips e (daily percentage)
$CInvP_g$	Inventory holding cost for pulp g (daily percentage)

LITERATURE CITED

1. Grossmann IE. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. *Comput Chem Eng.* 2004;29(1):29-39.
2. Grossmann I. Enterprise-wide optimization: A new frontier in process systems engineering. *AIChE J.* 2005;51(7):1846-1857.
3. Janssen M, Laflamme-Mayer, M., Zeinou, M.-H., Stuart, P.R. Survey indicates mills' need to exploit IT systems with new business model. *Pulp and Paper.* 2004;78(6):46-51.
4. Seborg DE, Edgar TF, Mellichamp DA. *Process dynamics and control.* 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2004.
5. Chopra S, Meindl P. *Supply chain management : strategy, planning, and operation.* 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall; 2007.
6. Shah N. Process industry supply chains: Advances and challenges. *Comput Chem Eng.* 2005;29(6):1225-1236.
7. Crama Y, Pochet, Y., Wera, .Y. A discussion of production planning approaches in the process industry. *CORE Discussion Paper.* 2001;42.
8. Floudas CA, Lin X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Comput Chem Eng.* 2004;28(11):2109-2129.
9. Kallrath J. Planning and scheduling in the process industry. *OR Spectrum.* 2002;24(3):219-250.
10. Stobbe M, Löhl,T., Schulz, C., Engell, S. Model Based Manufacturing Consolidated Review of Research and Applications 8. Planning and Scheduling in the Process Industry. *Process Control Laboratory, University of Dortmund.* 2002.
11. Shobrys DE, White DC. Planning, scheduling and control systems: why cannot they work together. *Comput Chem Eng.* 2002;26(2):149-160.
12. Kreipl S, Pinedo, M. Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice. *Production and Operations Management.* Spring 2004;13(1):pp. 77-92.

13. Qiu MM, Burch EE. Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, multi-machine environment. *International Journal of Production Research.* 1997;35:3023-3042.
14. Stefansson HS, Nilay, Jensson, Pall. Multiscale planning and scheduling in the secondary pharmaceutical industry. *AIChE J.* 2006;52(12):4133-4149.
15. Papageorgiou LG, Pantelides CC. Optimal Campaign Planning/Scheduling of Multipurpose Batch/Semicontinuous Plants. 2. A Mathematical Decomposition Approach. *Ind Eng Chem Res.* 1996;35(2):510-529.
16. Guillen G, Badell M, Espuna A, Puigjaner L. Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains. *Comput Chem Eng.* 2006;30(3):421-436.
17. Dimitriadis AD, Shah N, Pantelides CC. RTN-based rolling horizon algorithms for medium term scheduling of multipurpose plants. *Comput Chem Eng.* 1997;21(Supplement 1):S1061-S1066.
18. Stefansson HJ, Pall. Shah, Nilay. Integration of multi-scale planning and scheduling problems. Paper presented at: 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering July, 2006; Germany.
19. Hax AC, Meal, H.C. Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. In: Geisler MA, ed. *Studies in Management Sciences - Logistics.* Vol 1. Amsterdam: North-Holland Publishing Company : distributed by American Elsevier; 1975:xvi, 184 p.
20. Shah N. Single- and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges. *AIChE Symp Ser.* 1998;320(94):75-90.
21. Ryu J-H, Dua V, Pistikopoulos EN. A bilevel programming framework for enterprise-wide process networks under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering.* 2004;28(6-7):1121-1129.
22. Kelly JD. Modeling Production-Chain Information. *Chem Eng Prog.* 2005;101(2):28.
23. Laflamme-Mayer M, Shah, N., Pistikopoulos, E.F., Stuart, P. On the evaluation of minimum inventory levels for aggregate planning. *Submitted to Computers & Chemical Engineering.* 2008.
24. Bredstrom D, Lundgren JT, Ronnqvist M, Carlsson D, Mason A. Supply chain optimization in the pulp mill industry - IP models, column generation and novel constraint branches. *European Journal of Operational Research.* 2004;156(1):2-22.
25. Axsater S. ON THE FEASIBILITY OF AGGREGATE PRODUCTION PLANS. *Operations Research.* 1986;34(5):796.
26. Wolsey LA. *Integer programming.* New York ; Toronto: Wiley; 1998.
27. Brooke A, Kendrick, D., Meeraus, A. Raman, R. *GAMS A Users Guide.* Washington DC: GAMS Development Corporation; 2005.
28. Anonymous. Cplex 9.0. *GAMS The Solver Manuals.* Washington DC: GAMS Development Corporation; 2005:87-120.

ANNEXE F

ON THE EVALUATION OF MINIMUM INVENTORY LEVELS FOR AGGREGATE PLANNING

Martin Laflamme-Mayer[a], Nilay Shah[b], Efstratios N. Pistikopoulos[b], Paul R. Stuart[a*]

[a] NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering,
École Polytechnique - Montréal, Montréal H3C 3A7, Canada
[b] Centre for Process Systems Engineering, Department of Chemical Engineering,
Imperial College London, London SW7 2AZ, U.K.

ABSTRACT

This paper concerns multi-scale planning approaches where it is desirable to ensure that the aggregated planning problem provides an upper bound to the profit calculated in the corresponding scheduling problem. In this context, it is necessary to ensure that the inventory cost calculated at the aggregated level is a lower bound to the inventory cost determined at the detailed level. This paper presents a mixed-integer linear calculation method that allows the evaluation of the minimum possible inventory levels, specifically for aggregate planning problems. First, a detailed analysis is provided to justify the approach used as the basis of the procedure, then the formulation is described in detail and finally, the approach is demonstrated for a simple lot-sizing problem.

Keywords: Aggregate planning; scheduling; aggregation properties; minimum inventory levels; lot-sizing; mixed-integer linear programming

INTRODUCTION

Planning and scheduling are an important class of supply chain problems for the process industry (Shah, 2005). Given a fixed supply chain (SC) design, this consists of finding the optimal allocation of the available resources in order to maximize the profitability under various endogenic and exogenic business situations. Since these problems are often complex and involve the systematic evaluation of a large number of trade-offs, mathematical programming approaches are usually used to formulate and solve models, which provide support to decision-makers. Planning typically refers to high level decision processes that aim at the coordination of supply chain activities over a relatively long time horizon (e.g. a few months up to a year) and that consider aggregated data inputs (e.g. demand forecasts) (Dogan, 2006; Shobrys & White, 2002). In the case of scheduling, the goal is to determine the sequence, timing and volume of activities required to meet performance objectives (Dogan, 2006; Shobrys & White, 2002). At this lower level, the time horizon considered is usually shorter (e.g. a few days up to 2-3 months) and more details are incorporated in the formulation (customer orders, more exact

* To whom all correspondence should be addressed. Contact: paul.stuart@polymtl.ca

representation of activities, etc.). Even though it would be possible to formulate a unique model, including both planning and scheduling, to support various decision levels of the same problem, many approaches are hierarchical and provide tailored models for each decision level. This is because monolithic planning models do not acknowledge the typical hierarchical nature of decision making activities (Hax, 1975), and also because such approaches result in large size models that require unreasonable computational effort to solve them (Dogan, 2006). The advantage of multi-scale approaches is thus widely recognized for supply chain planning and scheduling problems (Shah, 1998). Examples of such approaches are presented in the literature (Dogan, 2006; Guillen et al., 2006; Laflamme-Mayer, Shah, Pistikopoulos, Linkewich et al., 2007; Laflamme-Mayer, Shah, Pistikopoulos, & Stuart, 2007; Stefansson, 2006).

For multi-scale approaches, the rigorous integration of the planning and scheduling models is required in order to ensure consistency between the decision levels. Since the formulation of the aggregated model (planning) is simple compared to the detailed model (scheduling), the analysis of aggregation and disaggregation properties is a very important element to address in order to understand the limitations in terms of optimality and feasibility. For example in (Laflamme-Mayer, Shah, Pistikopoulos, & Stuart, 2007), where the planning and scheduling models are formulated as mixed-integer linear programming problems with a discrete time representation, it is possible to demonstrate, by a systematic analysis of the key constraints and the objective functions at each level, that the aggregate model is a relaxation of the detailed model. For this, two characteristics must be ensured ((Wolsey, 1998), pages 24-25): 1) the feasible region of the lower level model must be included within the feasible region of the higher level model and 2) the value of the objective function of the higher level model (z^*) must be greater than or equal to the value of the objective function of the lower level model (z), for any set of feasible solutions at the lower level.

In certain cases, it is possible that the inventory holding costs calculated at the aggregated level overestimate the inventory costs determined by the corresponding detailed model. This issue is illustrated in Figure 1 (see the *Average* and *Detailed Profiles*). As shown for this aggregated time period, the cost determined based on the simple average of the initial (I_0) and final (I_T) inventory levels is greater than the cost determined based on the sum of the inventory levels for each time step at the lower level (see eq. (1) where I_t is the inventory for each detailed time step t and, h is the holding cost for the aggregated period of duration T).

$$h \cdot \frac{I_0 + I_T}{2} > \frac{h}{T} \cdot \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) \qquad \textbf{(1)}$$

In terms of the aforementioned aggregation properties, this means that it is not possible to ensure that z^* is greater than or equal to z for all feasible solutions of the detailed model, and thus that the aggregated model is not a relaxation of the detailed model.

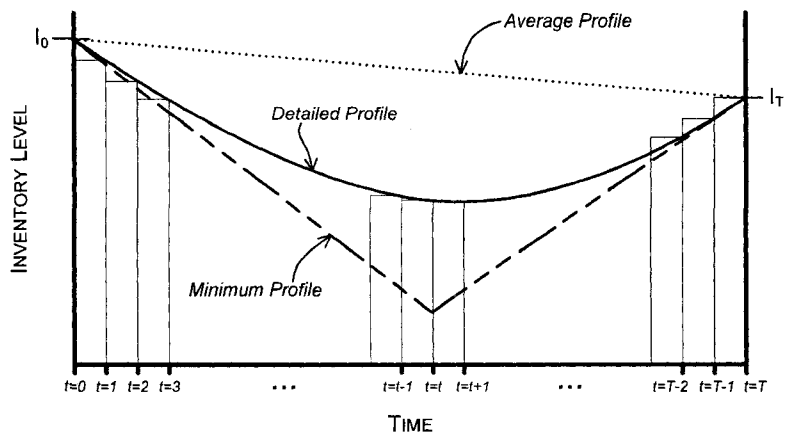


Figure 1: Possible overestimation of the inventory level in an aggregated planning problem

In order to respect the second condition for the relaxation (i.e. $z^* \geq z$), the average inventory determined at the detailed level should always be greater than the average inventory calculated at the aggregated level. It is therefore necessary to develop a calculation method, for the aggregated model, that provides a lower bound on the inventory holding cost. An interesting approach would be to consider the greatest possible depletion and accumulation rate of a material in order to estimate a minimum inventory profile (see Figure 1) given the initial and final inventory levels of an aggregated period, and to use this approach as the basis for the calculation of the inventory costs in the aggregate planning model. Since this requires the evaluation of the area under the inventory function, one of the challenges is to avoid non-linearity and non-convexity in the formulation.

OBJECTIVE

The aim of this work was to develop a linear calculation method to determine the minimum possible inventory level given the initial and final inventory levels of a time period, for an aggregated planning problem formulated as a mixed-integer linear programming problem with a discrete time representation. This issue was addressed in order to ensure that the inventory cost calculated in an aggregate planning problem is a lower bound to the inventory cost determined in the corresponding scheduling problem.

DETAILED ANALYSIS OF MINIMUM AVERAGE INVENTORY LEVEL

The following detailed analysis demonstrates the approach, used as the basis of the procedure described in the next section, for the calculation of the minimum average inventory level in aggregated planning problems. For this purpose, the general situation represented in Figure 2 has been considered and the inventory balances were calculated for each specific time step of an overall aggregated period. Two main assumptions were made for the general case:1) there is no base inventory and, 2) there is no overlap between the production and consumption profiles. Although it is not necessary to consider these two elements for the general demonstration (i.e. base inventory can be removed), the formulation proposed in the next section explains how to deal with these particular cases.

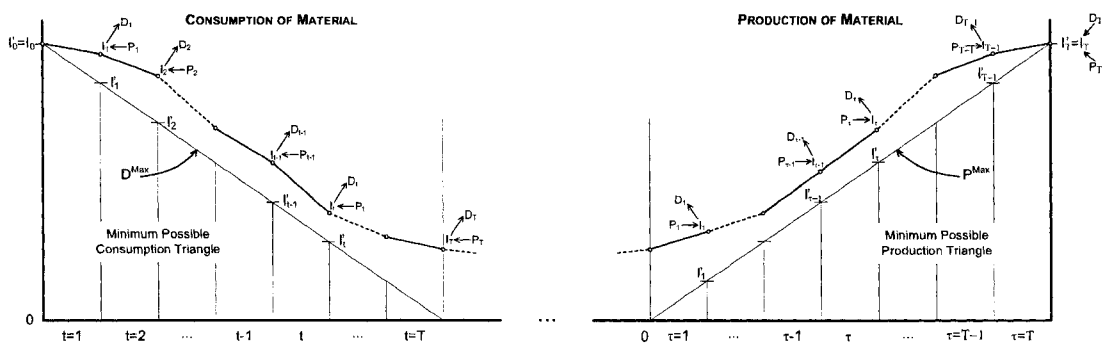


Figure 2: Illustration of the general profiles considered for the detailed analysis.

Consumption of Material

The first step of the demonstration consists of proving that, using the greatest depletion rate, it is possible to estimate the minimum inventory required. In the left side of Figure 2, T corresponds to the number of days of consumption, at maximum rate, necessary to bring the initial inventory level to its lowest possible value; beyond this point all inventory levels $I_t^{'}$ are equal to 0.

For every time period t, the inventory can be calculated, considering the current demand and production (D_t and P_t), using a general mass balance equation (2). The average inventory during time period t is then expressed by equation (3). Thus, the total area under the average inventory profile for the consumption of material (A^C) is determined via the summation of the average inventory for all time steps until time period T (4).

$$I_t = I_{t-1} + P_t - D_t \quad \forall t \tag{2}$$

$$\overline{I_t} = \frac{I_{t-1} + I_t}{2} \quad \forall t \tag{3}$$

$$A^C = \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) = \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{I_{t-1} + I_{t-1} + P_t - D_t}{2}\right) \tag{4}$$

In order to determine the minimum average inventory, it is necessary to consider the greatest depletion case i.e. there is no production of material and the consumption rate is set to the maximum rate for all the time steps ($D_t = D^{Max} \ \forall t$). In this case, the inventory equation can be rewritten as:

$$I_t^{'} = I_{t-1}^{'} - D^{Max} \quad \forall t \tag{5}$$

In this particular situation, the total area corresponding to material consumption profile is minimized (6). For example, in the first period ($t=1$) in Figure 2, the excess inventory between the minimum and detailed profiles is $P_1 + \left(D^{Max} - D_1\right)$. By inspection, since $P_t - D_t \geq -D^{Max}\ \forall t$, it is clear that $A_{\min}^{C}$ is always less than or equal to A^C and thus, that the use of the greatest depletion rate provides a lower bound to the inventory calculated for every time step (7).

$$A_{\min}^{C} = \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{I_{t-1}^{'} + I_t^{'}}{2}\right) = \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{I_{t-1}^{'} + I_{t-1}^{'} - D^{Max}}{2}\right) \tag{6}$$

$$A_{\min}^{C} = \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{2I_{t-1}^{'} - D^{Max}}{2}\right) \leq \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{2I_{t-1} + P_t - D_t}{2}\right) = A^C \tag{7}$$

The second step consists of demonstrating that, by extension of the concept of equation (6), it is possible to determine the minimum possible demand triangle given the initial inventory level. In fact, by further developing (6), we can obtain equation (8) where term $\sum_{t=1}^{T} I_{t-1}^{'}$ can be expanded to consider all the time steps (9).

$$\begin{aligned} A_{\min}^{C} &= \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{2I_{t-1}^{'} - D^{Max}}{2}\right) \\ &= \sum_{t=1}^{T} I_{t-1}^{'} - \tfrac{1}{2}\sum_{t=1}^{T} D^{Max} \\ &= \sum_{t=1}^{T} I_{t-1}^{'} - \frac{TD^{Max}}{2} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\sum_{t=1}^{T} I_{t-1}^{'} = I_0^{'} + I_1^{'} + I_2^{'} + \ldots + I_{T-1}^{'} \tag{9}$$

Since the D^{Max} is known, it is possible to calculate any inventory value $I_t^{'}$ by finding the corresponding number of days of consumption at maximum rate D^{Max}. The equation (9) can thus be rewritten as:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{T} I_{t-1}^{'} &= TD^{Max} + [T-1]D^{Max} + [T-2]D^{Max} + \ldots + [T-(t-1)]D^{Max} + \ldots + D^{Max} \\ &= D^{Max}\sum_{t=1}^{T}[T-(t-1)] \end{aligned} \tag{10}$$

By replacing this new expression of the term $\sum_{t=1}^{T} I'_{t-1}$ in equation (8) and rearranging, we have:

$$
\begin{aligned}
A^{C}_{\min} &= D^{Max}\sum_{t=1}^{T}\left[T-(t-1)\right]-\frac{TD^{Max}}{2} \\
&= D^{Max}\left\{\sum_{t=1}^{T}\left[T-(t-1)\right]-\frac{T}{2}\right\} \\
&= D^{Max}\sum_{t=1}^{T}\left[T-t+1-\tfrac{1}{2}\right] \\
&= D^{Max}\sum_{t=1}^{T}\left[\frac{2(T-t)+1}{2}\right] \\
&= \frac{D^{Max}}{2}\sum_{t=1}^{T}\left[2T-2t+1\right] \\
&= \frac{D^{Max}}{2}\left(2T^{2}+T-\sum_{t=1}^{T}2t\right)
\end{aligned}
\tag{11}
$$

Since $\sum_{t=1}^{T} 2t = T^2 + T$, the total area corresponding to the minimum average inventory profile is represented by (12). In this equation, it is important to recall that by definition T corresponds to the number of days of consumption, at maximum rate, necessary to bring the initial inventory level to its lowest possible value for a given aggregated period. This result, which corresponds to the area of the minimum consumption triangle, is the basis of the proposed inventory formulation.

$$
A^{C}_{\min} = \frac{T^{2}D^{Max}}{2} \tag{12}
$$

Production of Material

The approach used for the production of material is similar to the one presented for the consumption of material. The extreme situation considered, obviously different in this case, consists of assuming that there is no consumption of material and that the production rate is set to the maximum rate for all the time steps ($P_t = P^{Max}\ \forall t$). Therefore, in this context, T refers to the minimum time required (i.e. $\tau = 0$ is the latest moment to start the production) to meet the final inventory target, given that the initial inventory level at $\tau = 0$ is equal to 0 (see the right side of Figure 2). For every time period τ, the inventory level is calculated by:

$$I'_{\tau-1} = I'_{\tau} - P^{Max} \quad \forall \tau \tag{13}$$

Since $P^{Max} \geq P_{\tau} - D_{\tau} \ \forall \tau$, the total area corresponding to the material production profile is minimized, i.e. $A^{P}_{\min} \leq A^{P}$ (14). In the last detailed period ($\tau = T$) for example, the excess inventory between the minimum and detailed profiles is $D_{\mathrm{T}} + \left(P^{Max} - P_{\mathrm{T}}\right)$, given that the final inventory level is $I_{\mathrm{T}} = I'_{\mathrm{T}}$.

$$A^{P}_{\min} = \sum_{\tau=1}^{\mathrm{T}} \left(\frac{2I'_{\tau} - P^{Max}}{2} \right) \leq \sum_{\tau=1}^{\mathrm{T}} \left(\frac{2I_{\tau} - \left(P_{\tau} - D_{\tau}\right)}{2} \right) = A^{P} \tag{14}$$

The total area can be rewritten as equation (15) where the term $\sum_{\tau=1}^{\mathrm{T}} I'_{\tau}$ can be expanded in order to consider all the time steps (16).

$$A^{P}_{\min} = \sum_{\tau=1}^{\mathrm{T}} I'_{\tau} - \frac{TP^{Max}}{2} \tag{15}$$

$$\sum_{\tau=1}^{\mathrm{T}} I'_{\tau} = I'_{1} + I'_{2} + \ldots + I'_{T-1} \tag{16}$$

Since the P^{Max} is known, it is possible to calculate any inventory value I'_{τ} by finding the corresponding number of days of production at maximum rate P^{Max} and equation (16) becomes:

$$\sum_{\tau=1}^{\mathrm{T}} I'_{\tau} = P^{Max} \sum_{\tau=1}^{T} \tau \tag{17}$$

Therefore, $A^{P}_{\min}$ can be rewritten as:

$$\begin{aligned} A^{P}_{\min} &= P^{Max} \sum_{\tau=1}^{T} \tau - \frac{TP^{Max}}{2} \\ &= \frac{P^{Max}}{2} \left[\left(\sum_{\tau=1}^{T} 2\tau \right) - \mathrm{T} \right] \end{aligned} \tag{18}$$

Since $\sum_{t=1}^{T} 2t = T^{2} + T$, the total area corresponding to the minimum average inventory profile is represented by (19). This result has also been used in the proposed formulation, for the evaluation of the area of the minimum production triangle.

$$A_{\min}^{P} = \frac{T^2 P^{Max}}{2} \tag{19}$$

FORMULATION FOR THE CALCULATION OF MINIMUM AVERAGE INVENTORY LEVEL

Given the maximum material production and consumption rates, the initial and final inventory levels and the total material demand for a given aggregated period, the goal of the problem is to determine the minimum possible average inventory level (AMI_t). The model is formulated as a mixed-integer linear programming problem. The approach presented in this section can be integrated within an aggregate planning problem and the calculated value of AMI_t can be used to determine the inventory holding cost in the profit or cost function. It is important to note that, when this formulation is incorporated in an aggregate planning problem, the initial and final inventory levels as well as the demand for each aggregated periods are decision variables of the planning problem (instead of parameters such as in the formulation below).

Sets and Indexes

- T Set of aggregated time periods, index $t \varepsilon T$
- A Set of extremes points for the linear interpolation within an aggregated period, index $a \varepsilon A$ (|A| = 1+ |B|)
- B Set of segments for the linear interpolation within an aggregated period, index $b \varepsilon B$ (|B| = number of detailed time periods included in an aggregated period t)

Variables

Continuous Variables (all continuous variables ≥ 0)

- V_t Base inventory corresponding to the initial inventory surplus during period t.
- Ice_t Equivalent initial inventory level during period t (given the base inventory V_t).
- Bc_t Preliminary (*Step 2*) length of the base of the demand triangle for period t.
- $\lambda c_{a,t}$ Preliminary (*Step 2*) percentage of extreme point a that is used in the linear interpolation during period t, in the case of the depletion profile.
- Ipe_t Equivalent final inventory level during period t (given the base inventory V_t).
- Bp_t Preliminary (*Step 2*) length of the base of the supply triangle for period t.
- $\lambda p_{a,t}$ Percentage of extreme point a that is used in the linear interpolation during period t, in the case of the accumulation profile.
- W_t Base inventory corresponding to the overlapping of demand and supply triangles during period t.
- Ice_t^{II} Equivalent initial inventory level during period t (given the sum of the base inventories V_t and W_t).
- Bc_t^{II} Length (*Step 4*) of the base of the demand triangle for period t.
- Ac_t Area of the minimum demand triangle during period t.
- $\lambda c_{a,t}^{II}$ Percentage (*Step 4*) of extreme point a that is used in the linear interpolation during period t, in the case of the depletion profile.

Ipe_t^{II} Equivalent final inventory level during period t (given the sum of the base inventories V_t and W_t)

Bp_t^{II} Length (*Step 4*) of the base of the supply triangle for period t.

Ap_t Area of the minimum supply triangle during period t.

$\lambda p_{a,t}^{II}$ Percentage (*Step 4*) of extreme point a that is used in the linear interpolation during period t, in the case of the accumulation profile.

AMI_t Minimum average inventory level for the aggregated period t.

Binary Variables

$\Omega c_{b,t}$ Equal to 1 if segment b is selected (*Step 2*) for the linear interpolation during the period t, in the case of the depletion profile. Otherwise equal to 0.

$\Omega p_{b,t}$ Equal to 1 if segment b is selected (Step 2) for the linear interpolation during the period t, in the case of the accumulation profile. Otherwise equal to 0.

s_t Equal to 0 if there is overlapping of the supply and demand triangles during period t. Otherwise equal to 1.

$\Omega c_{b,t}^{II}$ Equal to 1 if segment b is selected (*Step 4*), for the linear interpolation during the period t, in the case of the depletion profile. Otherwise equal to 0.

$\Omega p_{b,t}^{II}$ Equal to 1 if segment b is selected (*Step 4*), for the linear interpolation during the period t, in the case of the accumulation profile. Otherwise equal to 0.

Parameters

M A large number

$MaxD_t$ Maximum possible depletion rate of material during period t

$MaxP_t$ Maximum possible accumulation rate of material during period t

I_t Final inventory level for the aggregated period t.

I_{t-1} Initial inventory level for the aggregated period t

D_t Total demand of material during period t.

STEP 1 – DEMAND-RELATED BASE INVENTORY

The first step consists of the determination of the base inventory that needs to be carried during the aggregated periods if the total demand of material for these periods (D_t) is lower than the total initial inventory (see case 1 in Figure 3). The following inequality leads to the calculation of the base inventory V_t; given the fact that V_t has an associated cost in the objective function (profit maximization or cost minimization), the base inventory will always be equal to the difference between the initial inventory and the demand (otherwise, it will be equal to 0).

$$I_{t-1} - D_t \leq V_t \ \forall t \tag{20}$$

STEP 2 – DIMENSIONS OF CONSUMPTION AND PRODUCTION TRIANGLES

Consumption of Material

The equivalent initial inventory level is calculated by subtracting the base inventory from the initial inventory level. In the case where V_t=0, the equivalent inventory level equals the inventory level at the beginning of period t.

$$Ice_t = I_{t-1} - V_t \ \forall t \tag{21}$$

As mentioned earlier, in order to determine the minimum average inventory, the greatest depletion case needs to be assumed i.e. there is no production of material and the daily consumption rate is set to the maximum possible rate for a given aggregated period t ($MaxD_t$). Since the slope of the consumption profile is known ($MaxD_t$), it is possible to evaluate the dimensions of the consumption triangle. In fact, the equality (22) allows selection of the appropriate interval to compute the area of the minimum consumption triangle. By interpolation, it is possible to find the number of days of consumption (at maximum rate) that corresponds to the height of the triangle (i.e. the equivalent initial inventory level, Ice_t). In other words, the various extreme points that are considered (a) correspond to various inventory levels at the beginning of the period and are equivalent to a certain number of detailed time periods at maximum consumption rate (up to |B| periods). The length of the base of the triangle is given by the corresponding value of Bc_t (23). The equalities (24) and (25) respectively ensure that the linear combination of two extreme points $\lambda c_{a,t}$ (equation (27)) is equal to 1 and that only one interval is selected. Finally, the inequality (26) allows the activation of the appropriate two extreme points $\lambda c_{a,t}$ given the segment $\Omega c_{b,t}$ selected.

$$Ice_t = \sum_{a=0}^{A} \left[\lambda c_{a,t} \cdot a \cdot MaxD_t \right] \forall t \tag{22}$$

$$Bc_t = \sum_{a=0}^{A} \left[\lambda c_{a,t} \cdot a \right] \forall t \tag{23}$$

$$\sum_{a=0}^{A} \lambda c_{a,t} = 1 \ \forall t \tag{24}$$

$$\sum_{b} \Omega c_{b,t} = 1 \ \forall t \tag{25}$$

$$\lambda c_{a,t} \leq \sum_{\substack{b=a, \\ a<|a|}} \Omega c_{b,t} + \sum_{\substack{b=a-1, \\ a>1}} \Omega c_{b,t} \ \forall a,t \tag{26}$$

$$0 \leq \lambda c_{a,t} \leq 1 \ \forall a,t \tag{27}$$

Production of Material

The procedure that was applied for the consumption of material can also be used, with minor modifications, in the case of material production. The first step consists of determining the equivalent final inventory level (28). For this purpose, the greatest accumulation case is considered, where there is no consumption of material and where the production rate is set to the maximum possible rate ($MaxP_t$). Using the equivalent triangles, it is possible to calculate the dimensions of the production triangle, Ipe_t and Bp_t (equations (29) to (34)), by linear interpolation.

$$Ipe_t = I_t - V_t \ \forall t \tag{28}$$

$$Ipe_t = \sum_{a=0}^{A} \left[\lambda p_{a,t} \cdot a \cdot MaxP_t \right] \forall t \tag{29}$$

$$Bp_t = \sum_{a=0}^{A} \left[\lambda p_{a,t} \cdot a \right] \forall t \tag{30}$$

$$\sum_{a=0}^{A} \lambda p_{a,t} = 1 \ \forall t \tag{31}$$

$$\sum_{b} \Omega p_{b,t} = 1 \ \forall t \tag{32}$$

$$\lambda p_{a,t} \leq \sum_{\substack{b=a, \\ a<|a|}} \Omega p_{b,t} + \sum_{\substack{b=a-1, \\ a>1}} \Omega p_{b,t} \ \forall a,t \tag{33}$$

$$0 \leq \lambda p_{a,t} \leq 1 \ \forall a,t \tag{34}$$

STEP 3 – OVERLAPPING OF THE CONSUMPTION AND PRODUCTION TRIANGLES

If the sum of Bc_t and Bp_t is greater than the total length T of the aggregated period, then there is overlapping of the consumption and production profiles. The inequalities (35) and (36) can be used to determine if the situation 2a or 2b, in Figure 3, needs to be considered. In the case of overlapping, the binary variable s_t equals 0 and an additional base inventory W_t must be taken into account, i.e. $W_t \geq 0$ (37).

$$Bp_t + Bc_t - T \leq (1 - s_t)M \ \forall t \tag{35}$$

$$T - (Bp_t + Bc_t) \leq s_t \cdot M \ \forall t \tag{36}$$

$$W_t \leq (1 - s_t)M \ \forall t \tag{37}$$

STEP 4 – CALCULATION OF THE AREA CORRESPONDING TO THE MINIMUM CONSUMPTION AND PRODUCTION TRIANGLES

Consumption of Material

Although the following constraints are very similar to the ones presented in *Step 2*, there are two important modifications. Firstly, the equivalent inventory level, Ice_t^{II}, is calculated using the two base inventory loads, V_t and W_t (38). This strategy, illustrated in Figure 3 (case 3), allows the isolation of the consumption and production triangles (i.e. to obtain the general case discussed in the previous section). The second modification consists of equation (41) where the area under the minimum consumption profile is determined by linear interpolation (case 4 in Figure 3). It is also important to note that if W_t=0 (i.e. case 2b in Figure 3), the previous calculation of the area is still valid according to equations (38) to (45).

$$Ice_t^{II} = I_{t-1} - V_t - W_t \ \forall t \tag{38}$$

$$Ice_t^{II} = \sum_{a=0}^{A} \left[\lambda c_{a,t}^{II} \cdot a \cdot MaxD_t \right] \forall t \tag{39}$$

$$Bc_t^{II} = \sum_{a=0}^{A} \left[\lambda c_{a,t}^{II} \cdot a \right] \forall t \tag{40}$$

$$Ac_t = \sum_{a=0}^{A} \left[\lambda c_{a,t}^{II} \cdot \left(\frac{a^2 \cdot MaxD_t}{2} \right) \right] \forall t \tag{41}$$

$$\sum_{a=0}^{A} \lambda c_{a,t}^{II} = 1 \ \forall t \tag{42}$$

$$\sum_{b} \Omega c_{b,t}^{II} = 1 \ \forall t \tag{43}$$

$$\lambda c_{a,t}^{II} \leq \sum_{\substack{b=a, \\ a<|a|}} \Omega c_{b,t}^{II} + \sum_{\substack{b=a-1, \\ a>1}} \Omega c_{b,t}^{II} \ \forall a,t \tag{44}$$

$$0 \leq \lambda c_{a,t}^{II} \leq 1 \ \forall a,t \tag{45}$$

Production of Material

With minor modifications, the procedure described above for the consumption of material can also be used to determine, by linear interpolation, the area under the minimum supply profile (equations (46) to (53)).

$$Ipe_t^{II} = I_t - V_t - W_t \ \forall t \tag{46}$$

$$Ipe_t^{II} = \sum_{a=0}^{A}\left[\lambda p_{a,t}^{II} \cdot a \cdot MaxP_t\right] \forall t \tag{47}$$

$$Bp_t^{II} = \sum_{a=0}^{A}\left[\lambda p_{a,t}^{II} \cdot a\right] \forall t \tag{48}$$

$$Ap_t = \sum_{a=0}^{A}\left[\lambda p_{a,t}^{II} \cdot \left(\frac{a^2 \cdot MaxP_t}{2}\right)\right] \forall t \tag{49}$$

$$\sum_{a=0}^{A} \lambda p_{a,t}^{II} = 1 \ \forall t \tag{50}$$

$$\sum_{b} \Omega p_{b,t}^{II} = 1 \ \forall t \tag{51}$$

$$\lambda p_{a,t}^{II} \leq \sum_{\substack{b=a,\\ a<|a|}} \Omega p_{b,t}^{II} + \sum_{\substack{b=a-1,\\ a>1}} \Omega p_{b,t}^{II} \ \forall a,t \tag{52}$$

$$0 \leq \lambda p_{a,t}^{II} \leq 1 \ \forall a,t \tag{53}$$

STEP 5 – CONDITIONS

If there is overlapping of the demand and supply triangles, the procedure in *Step 4* needs to determine the right amount of base inventory W_t that corresponds to the situation where the sum of the bases of each triangle, Bp_t^{II} and Bc_t^{II}, is equal to the total length T of the aggregated period. This is ensured, in Step 5, by constraints (54) and (55). In the case where there is no overlap, these constraints will be inactive since the constant M is a large number.

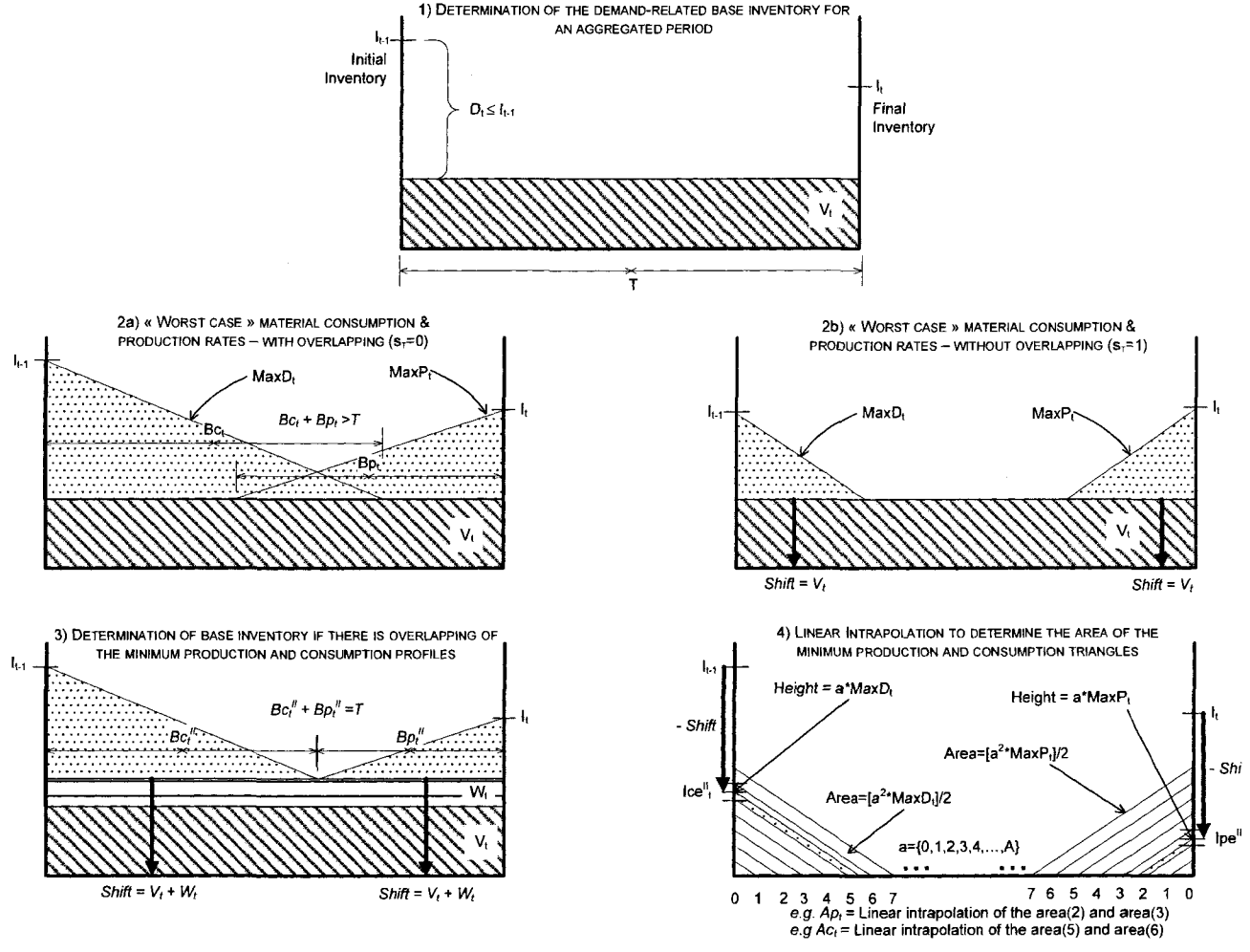
$$Bp_t^{II} + Bc_t^{II} \geq (1-s)T - (s)M \ \forall t \tag{54}$$

$$Bp_t^{II} + Bc_t^{II} \leq (1-s)T + (s)M \ \forall t \tag{55}$$

STEP 6 – CALCULATION OF THE MINIMUM AVERAGE INVENTORY LEVEL FOR THE AGGREGATED PERIOD

The average inventory level corresponding to the minimum consumption and production profiles is calculated by dividing the sum of both areas (Ap_t and Ac_t) by the total length T of the aggregated period. By adding the base inventories V_t and W_t, we can obtain the minimum possible average inventory level given the initial and final inventory of an aggregated period.

$$AMI_t = \left(\frac{Ap_t + Ac_t}{T}\right) + V_t + W_t \ \forall t \tag{56}$$



Average minimum inventory level = $(Ac_t + Ap_t)/T + V_t + W_t$

Figure 3: Illustration of the approach used to calculate the minimum possible average inventory for a given aggregated period.

ILLUSTRATIVE EXAMPLE

In order to illustrate the proposed approach, the minimum average inventory level calculation method was applied to a common lot-sizing problem ((Wolsey, 1998), page 11) . This problem consists of determining the quantity of material to produce (x_t), the periods of production (y_t) and the appropriate inventory level (i_t) in order to find an optimal plan that satisfies the demand and minimizes the total cost for a given time period T (index $\tau \in T$) (57). Equation (58) ensures that the mass balance from one detailed period τ to another is respected and the constraint (59) indicates that the quantity produced must be less than or equal to the capacity, if there is production during time step τ. The non-negativity and integrality conditions for the decision variables are defined by the constraints represented in (60). The detailed information used for the implementation of the model is specified in Table 1.

$$\min z^I = \sum_{\tau=1}^{T} \left(CP \cdot x_\tau + CH \cdot i_\tau + CS \cdot y_\tau \right) \tag{57}$$

$$i_{\tau-1} + x_\tau = d_\tau + i_\tau \quad \forall \tau \tag{58}$$

$$x_\tau \leq P \cdot y_\tau \quad \forall \tau \tag{59}$$

$$i_\tau, x_\tau \geq 0, \quad y_\tau \in \{0,1\} \quad \forall \tau \tag{60}$$

Table 1: Specific information used in the lot-sizing problem.

Parameter	Data Used
Time Horizon	Low level[1] : from τ1 to τ18 High level[2] : from t1 to t3 Number of detailed time periods in an aggregated period: Q =6
Costs	CP =5 per unit; CH = 1 per unit per period τ; CS=15 per period τ of production
Production Capacity	11 units per period t
Demand	(τ1 8) (τ2 15) (τ3 7) (τ4 5) (τ5 7) (τ6 4) (τ7 11) (τ8 14) (τ9 14) (τ10 4) (τ11 4) (τ12 5) (τ13 12) (τ14 12) (τ15 12) (τ16 8) (τ17 4) (τ18 4)
Inventory Conditions	$I_{\tau=0} = I_{\tau=18} = 50$

[1] *Low level: corresponds to the detailed lot-sizing problem*

[2] *High level: corresponds to the aggregated problem*

The first step consisted of solving the detailed lower level problem using GAMS (General Algebraic Modeling System (GAMS), 2007). Then the optimal inventory level, which was a decision variable, was obtained for each detailed time step τ. The resulting detailed inventory profile is shown in Figure 4 (curve labelled *Detailed – Low level*). The profile corresponding to the average inventory level, calculated using the inventory levels at the boundary of each aggregated period, is also represented in this figure (curve labelled *Average – High level*).

The second step was aimed at evaluating the minimum inventory profile at the aggregate level. As shown in Figure 4, each of the aggregated periods $t=1$, $t=2$ and $t=3$ respectively correspond to the detailed periods τ_1 to τ_6, τ_7 to τ_{12} and τ_{13} to τ_{18}. The formulation described previously for the calculation of the minimum inventory was implemented in GAMS and the optimal detailed inventory levels obtained in the first step were used as parameters in this formulation (i.e. the inventory levels that correspond to the boundaries of the aggregated periods were fixed according to the results of the detailed lot-sizing model). In the high level model, the objective function simply consisted of the minimization of the inventory holding cost (61). The minimum inventory profile determined for each aggregated time step t is shown in Figure 4 by the curve labelled *Minimum – Proposed Approach.*

$$\min z^{II} = \sum_{t=1}^{T} \left(CH \cdot Q \cdot AMI_t \right) \tag{61}$$

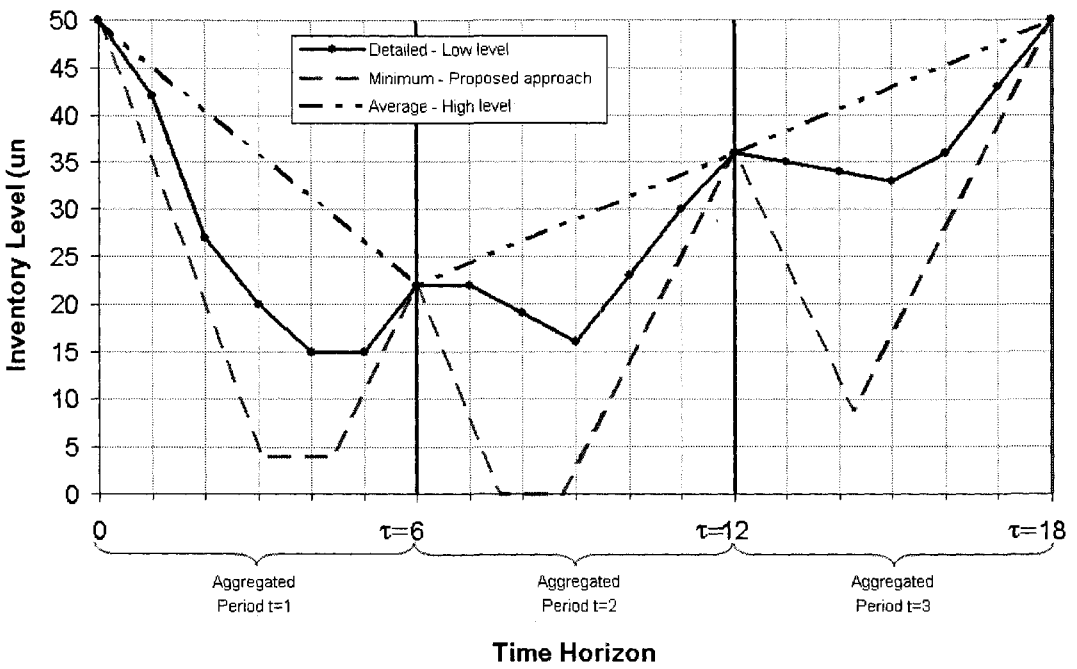


Figure 4: Results of the illustrative example.

In Figure 4, it can be seen that the *Minimum* profile obtained with the proposed formulation is a lower bound to the *Detailed* profile. Also, as mentioned earlier, the *Average* profile, calculated assuming a linear evolution from the initial to the final inventory levels of an aggregated period, overestimates the inventory compare to the *Detailed* profile obtained. For each aggregated period, it is also possible to identify the shapes corresponding to the production and consumption triangles. In the first period, the demand is smaller than the initial inventory level and thus the base inventory $V_{t=1}$ equals to 4 units. Similarly, in the third period, the base inventory $W_{t=3}$ equals to 8.9 units. This indicates that there was an overlapping of the production and consumption profiles determined for this period (similar to case 3 in

Figure 3, where V_t=0). This is also the reason why there is no "plateau" such as there is for the aggregated periods t=2 and t=3.

Table 2 : Calculation methods and corresponding average inventory levels.

	Inventory Calculation Method	Avg. Inventory t = 1	Avg. Inventory t = 2	Avg. Inventory t = 3
1	$\frac{1}{Q}\cdot\sum_{\tau=1}^{\tau=t\cdot Q}\left(\frac{I_{\tau-1}+I_{\tau}}{2}\right)$	25.8 units	23.2 units	37.3 units
2	$\frac{I_{\tau=(t-1)\cdot Q}+I_{\tau=t\cdot Q}}{2}$	36 units	29 units	43 units
3	$AMI_t=\left(\frac{Ap_t+Ac_t}{T}\right)+V_t+W_t$	18.5 units	13.2 units	27.2 units

Finally, Table 2 presents the average inventory levels that can be used to calculate the inventory holding costs for each of the aggregated time periods and for each inventory profile presented in Figure 4. Contrary to the second approach, the values given by AMI_t provide a lower bound to the inventory level calculated at the detailed level. In other words, the proposed approach ensures that the average inventory levels in an aggregated planning problem are always less than or equal to the average inventory levels in the corresponding detailed planning problem (62).

$$AMI_t=\left(\frac{Ap_t+Ac_t}{T}\right)+V_t+W_t \quad \leq \quad \frac{1}{Q}\cdot\sum_{\tau=1}^{\tau=t\cdot Q}\left(\frac{I_{\tau-1}+I_{\tau}}{2}\right) \quad \forall t \tag{62}$$

CONCLUSIONS

Since hierarchical approaches are often used for planning and scheduling, it is important to analyze the properties of the aggregated planning problem in terms of optimality and feasibility, in order to ensure the consistency between the decision levels. In terms of optimality, it is desirable to demonstrate that the aggregate planning problem provides an upper bound to the profit calculated in the scheduling problem. This is not possible if the inventory costs are calculated based on a simple average of the initial and final inventory levels for each aggregated period. In fact, in certain cases, this method of calculation may overestimate the inventory costs compared to the corresponding situation in the scheduling problem. This technical note proposes a mixed-integer linear formulation that allows the determination of the minimum possible average inventory level, for each aggregated period and given the initial and final inventory levels. The approach consists of calculating, by linear interpolation, the inventory profiles corresponding to the greatest material depletion and accumulation rates. As demonstrated with a case study, this procedure ensures that the inventory costs calculated at the higher level is a lower bound to the inventory cost at the lower level. Even though the general case has been presented, this formulation can be simplified depending on the particular application (e.g. instantaneous material supply or consumption can be assumed such as in (Laflamme-Mayer, Shah, Pistikopoulos, & Stuart, 2007)). Finally, the calculation of minimum inventory levels is necessary but not sufficient for an aggregate planning problem to be a relaxation of a scheduling problem. It is also important to carefully

analyze the other terms of the objective functions as well as the feasible regions defined by the constraints at each level of the planning and scheduling problem.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chair at École Polytechnique de Montréal, and by the Centre for Process Systems Engineering at Imperial College London. Martin Laflamme-Mayer is supported by a scholarship provided from Le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies.

REFERENCES

Dogan, M. E., Grossmann, I.E. (2006). A decomposition method for the simultaneous planning and scheduling of single-stage continuous multiproduct plants. *Ind. Eng. Chem. Res., 45*(1), 299.

Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. Raman, R. (2005). GAMS A Users Guide. GAMS Development Corporation, Washington DC.

Guillen, G., Badell, M., Espuna, A., & Puigjaner, L. (2006). Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains. *Comput. Chem. Eng., 30*(3), 421-436.

Hax, A. C., Meal, H.C. (1975). Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. In M. A. Geisler (Ed.), *Studies in Management Sciences - Logistics* (Vol. 1, pp. xvi, 184 p.). Amsterdam: North-Holland Publishing Company : distributed by American Elsevier.

Laflamme-Mayer, M., Shah, N., Pistikopoulos, E. F., Linkewich, J., & Stuart, P. (2007). Multi-scale on-line supply chain planning Part A: Decision processes and framework for a high-yield pulp mill. *to be submitted to AIChE Journal.*

Laflamme-Mayer, M., Shah, N., Pistikopoulos, E. F., & Stuart, P. (2007). Multi-scale on-line supply chain planning Part B: Model formulation and test case results. *to be submitted to AIChE Journal.*

Shah, N. (1998). Single- and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges. *AIChE Symp. Ser., 320*(94), 75-90.

Shah, N. (2005). Process industry supply chains: Advances and challenges. *Comput. Chem. Eng., 29*(6), 1225-1236.

Shobrys, D. E., & White, D. C. (2002). Planning, scheduling and control systems: why cannot they work together. *Comput. Chem. Eng., 26*(2), 149-160.

Stefansson, H. S., Nilay, Jensson, Pall. (2006). Multiscale planning and scheduling in the secondary pharmaceutical industry. *AIChE J., 52*(12), 4133-4149.

Wolsey, L. A. (1998). *Integer programming.* New York ; Toronto: Wiley.

ANNEXE G

CAPACITY MANAGEMENT FOR MARKET PULP PRODUCTION

Martin Laflamme-Mayer[a], Steve Raymond[b], Jason Linkewich[b] and Paul Stuart[a*]

[a] NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering,
École Polytechnique - Montréal, Montréal H3C 3A7, Canada

[b] Tembec Inc., Témiscaming J0Z 3R0, Canada

ABSTRACT

The application of supply chain management concepts will be an important element of the strategy of successful pulp and paper (P&P) companies in the future. To become true low-cost producers, these companies need to develop and apply advanced analytical approaches that will allow them to systematically evaluate the trade-offs between procurement, manufacturing and demand cycles of their supply chain (SC). In a challenging business environment, the capability to align production and demand is essential in order to optimize the SC profitability. This paper describes, for the case of an existing market pulp mill, how this optimal alignment can be continuously ensured using a flexible capacity management strategy in which the production rate is pulled by the profitable demand. Given the key role of the mills in the P&P SC, it is necessary to emphasize the representation of the manufacturing processes at the SC level for its successful implementation. This is addressed using an operations-driven approach that provides the required visibility of manufacturing operations and helps to coordinate business units across the SC.

Keywords: Operations-Driven Cost Modeling, Supply Chain Planning, Optimization, Capacity Management, High-Yield Pulp Mill

INTRODUCTION

The efficient application of supply chain management (SCM) concepts, that aims at creating value by the design, coordination and management of the business units and flows (information, material and cash), will be an important element of the strategy of successful pulp and paper (P&P) companies in the future. This will help these companies to adapt to their new business environment and regain their ability to compete globally and ensure the free cash flow generation from their supply chain (SC) operations. Given increasingly strong cost pressures, the capability to systematically assess the SC cost structure, i.e. the cost to serve customers, is recognized by P&P executives as one of their top priorities. To achieve such capability, this traditionally capacity-focused industry must develop and apply systems-based methods and tools to analyze the important trade-offs between the business units and to support SC decision making. In collaboration with key logistics and operations managers at Tembec, a decision

* To whom all correspondence should be addressed. Contact: paul.stuart@polymtl.ca

support tool has been developed that provides the required visibility into manufacturing operations and helps to better coordinate the manufacturing and demand cycles of the SC. This paper describes this tool that is based on an operations-driven approach which has the potential to help the P&P industry to make better SC decisions and demonstrates how this can be used to determine the optimal capacity management strategy for an existing market pulp mill.

OPERATIONS-DRIVEN SC APPROACH

In recent years, the integration of information across the SC has improved tremendously by the implementation of modern transactional information technologies (IT).[1] From the manufacturing perspective, decision making improved by providing managers with consistent information on what is produced in the plants. However, enterprise-level systems (e.g. ERP) typically incorporate aggregated plant data that are not adequate for SC decision support in process industries (Figure 1) [2]. This is the case in P&P where process information is incorporated on an *ad hoc* basis to support higher level decision processes [3]. Although large amounts of data are provided by the IT supporting manufacturing and business activities, current managerial approaches do not fully exploit these data for advanced decision support and thus, the potential of implementing analytical approaches is yet to be realized.

Since the performance of each mill is in close correlation with the profitability of the whole fibre SC, manufacturing facilities are key drivers of SC efficiency. However, because of the complexity and uncertainty associated to P&P manufacturing operations, it is difficult, compared to discrete-type industries, to make the link between the production and enterprise levels. In this context, SC approaches developed by the PSE community are most interesting since they emphasize the incorporation of chemical engineering knowledge to better represent the process capability at the SC level [1].

For large-scale and capital intensive process industries, there are strong overlaps between production and SC planning [4]. Since these decision making activities by definition take into account the production and business perspectives, planning frameworks can play a key role in integrating the plant and enterprise levels [2, 5]. However, the oversimplified representation of manufacturing capability is a typical weaknesses of SC planning problems of low-margin production plants [6]. So far, the incorporation of more sophisticated process representations has been done for the petroleum industry using so-called *property-based* SC planning approaches [7, 8]. Since these rely on detailed process models (based on mass and energy balances) to characterize the production processes and operating conditions, they often involve non-linear relationships and result in complex SC models that are difficult to solve [1, 7, 9].

Since first-principles relationships are not as widely available in P&P, there is good reason to use and analyze on-line measurements (e.g. production rates, specific energy, consistency, etc.) and to develop data-driven models to characterize the operations at the mill. With the advent of process information management systems (PIMS), many envision the value of incorporating the information that lies in the lower-level process data in higher-level systems [2, 3, 9, 10]. Given the convergence of mill's PIMS and enterprise systems, there is an opportunity to 1) use lower-level process data to characterize the operating conditions, 2) to link the production and business perspectives by integrating critical process and cost information and 3) to reflect manufacturing operations for higher-level SC decision support.

This challenge has been addressed by developing a margin-centric SC approach combining descriptive and prescriptive models (Figure 1). An operations-driven cost model can be use to characterize the manufacturing costs of continuous P&P processes [11]. This advanced cost modeling technique, inspired

by Activity-Based Costing (ABC) [12], uses a rich set of resource- and process-related drivers that are based on the analysis of the mill's historical process and cost data. The presented application at a high-yield pulp mill, outlines how to structure and analyze critical data and to develop a cost model suitable for the identification and interpretation of the cost implications of various operating regimes [13]. This bottom-up approach provides a perspective that not only improves the understanding of the mill's cost structure but also provides the process information necessary for the representation of the mill's operations at the SC level.

Since SC problems are complex, it can be very challenging to simultaneously evaluate the various trade-offs and determine the best SC operative strategy without adequate decision support tools [14]. An SC planning model [15, 16], incorporating the relevant issues considered by the decision makers involved in the procurement, manufacturing and demand cycles of the fibre SC, is used to provide the visibility across the supply chain and decision levels (Figure 1). The optimization-based framework improves current decision processes by providing a set of business-valuable information (e.g. feasible production plan, allocation of supply & demand orders, inventory levels, bottlenecks, constraints, etc.) that helps to maximize the overall SC profitability. This capability to manage the complexity of the fibre SC is critical for the cost effectiveness of market pulp producers [16, 17].

This paper will focus on the integration of the mill and enterprise levels and demonstrate the importance and the potential benefits for the P&P industry by better representing the manufacturing cycle in SC planning problems.

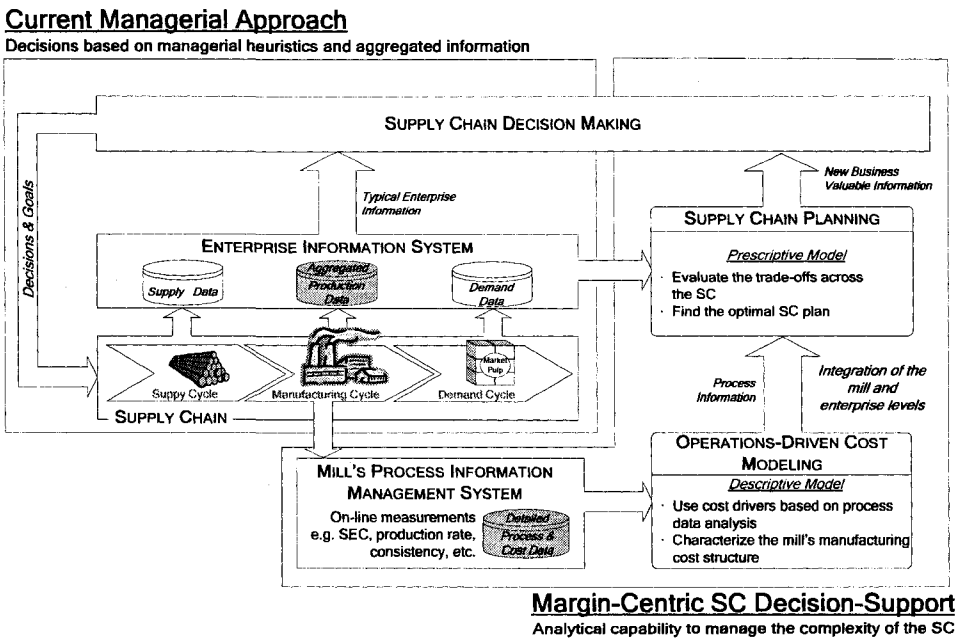


Figure 1: Margin-centric approach for SC decision support in P&P.

OBJECTIVE

The main objective of this paper is to show, for the case of an operating high-yield pulp mill, the potential benefits of implementing flexible capacity management strategies, allowing for a more profitable alignment of pulp production and requirements in difficult market pulp contexts. Given the focus on the integration of the mill and enterprise levels, this work will demonstrate the importance of better representing the manufacturing cycle in P&P SC planning problems and hence, the advantages of the operations-driven approach.

CASE STUDY

High-Yield Pulp Mill

The case study considered consists of the fibre supply chain of a high-yield pulp mill including the fibre procurement, the manufacturing and the distribution/customer cycles (Figure 2). Raw material inventory planning and supplier selection based on incremental costs and expected availability are the key elements for fibre procurement planning. The mill produces high-yield pulp from hardwood chips using a bleached chemi-thermomechanical pulping process where four main production steps are involved: chemical pre-treatment, pressurized refining of wood fibres, bleaching of the pulp, and drying/finishing operations. Various pulp grades are obtained by varying the process operating conditions according to standard recipes. The final product is sold to customers in the form of baled dried pulp. For each cycle, continuous and dynamic SC decision making processes must be executed at different decision levels. The integrated planning of these cycles is desirable in order to achieve good supply chain coordination, and is an important issue for market pulp mills.

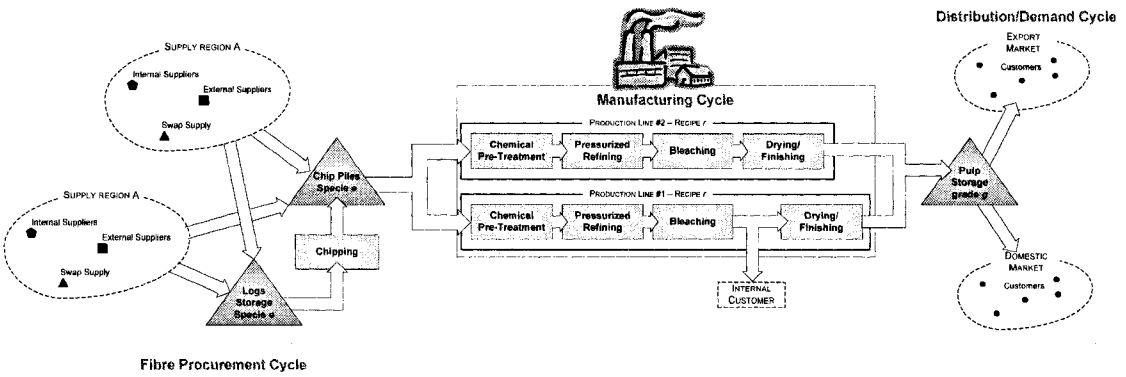


Figure 2: Fibre supply chain of the high-yield pulp mill.

Capacity Management in Low Pulp Demand / Low Pulp Price Contexts

The decision processes involved in determining the best way to manage capacity in order to meet product demand are complex and need to consider factors such as available production capacity, inventories, customer orders and expected margins. The traditional capacity-focused planning approach assumes that optimal SC profitability occurs at optimal capacity utilization and results in maximizing the overall equipment efficiency (OEE) at P&P mills. However, SC decisions made on this basis tend to focus more on production volume than on margins. Nowadays, it is increasingly recognized that, to improve financial performance, the SC context must be considered in an integrated way in order to identify the

appropriate planning strategy and achieve optimal SC profit. This is particularly important for an unfavourable market place, i.e. low demand and low price, where the capability to find the optimally balanced SC has a significant impact on the market pulp producer's profitability. For this reason, the case study aims at exploring flexible capacity management strategies based on the mill's capability to operate over a broad range of production rates. Since these capacity-related decisions must be based on a careful assessment of the cost/revenue generation within the SC, it is essential to consider the evolution of the mill cost structure over the range of production rates considered. Unit-level manufacturing costs must be calculated based on the characterization of the process conditions, which are adapted according to the production intensity. By incorporating this information at the SC level, the right capacity management strategy that maximize the overall SC profit can be identified for various demand scenarios.

RESULTS & DISCUSSION

Operations-Driven Cost Modeling

The cost implications of varying production intensity have been determined using the modeling technique presented in Laflamme-Mayer et al. [11]. This multidisciplinary approach emphasizes the importance of the process perspective (as opposed to the product perspective) for identifying the source of costs in continuous process environments, and both the production process and the specific operating conditions are systematically considered. By using bottom-up process and cost information, resource and process activity drivers can be identified and used to characterize the cost generation within the mill's main processing operations.

The direct manufacturing costs were calculated, for a given grade, as a function of the production rates (Figure 3). All the results presented are normalized using the cost for the standard rate of production. The direct manufacturing costs per ton are constant over the range considered. This result can be explained by the combination of two effects that compensate each other. The first consists of the relation between fibre-fibre interactions and the specific energy applied in the refiners. Higher production rates result in augmented interactions that significantly reduce the energy requirements (in Figure 3, Case I is assuming an efficient, high consistency bleaching process i.e. the consumption of chemicals per ton of pulp is constant and set for standard rate of production). The second effect consists of the relation between the retention in the bleaching towers and the amount of chemical used per ton of pulp. The higher the production rate, the lower the retention and therefore, the higher the chemical charge applied for bleaching must be (in Figure 3, Case II is assuming that the specific energy is constant over the range considered and set for the standard rate of production). Since the cost implications of these two effects are of similar proportion, and given that they evolve in opposite direction with respect to the production rate, the cost curve obtained for the mill case is flat. For the purpose of the SC analysis, both effects have been considered separately in order to demonstrate the importance of characterizing the mill's cost structure, especially in the context of finding the optimal alignment between manufacturing capacity and profitable pulp demand.

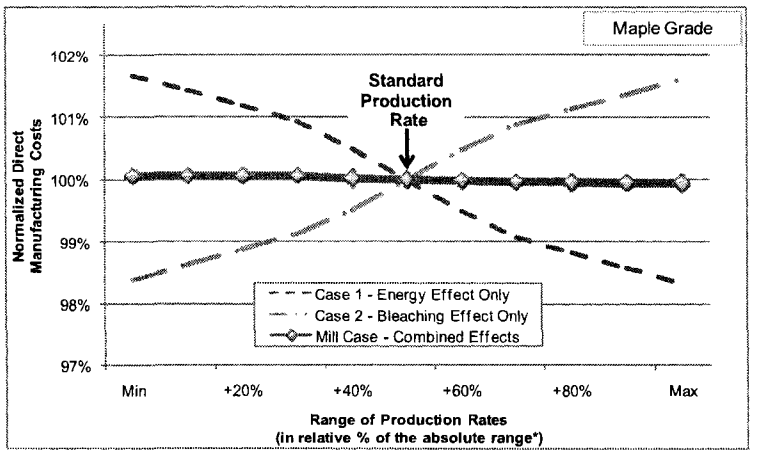


Figure 3: Process-based manufacturing costs.
For this particular maple grade, the absolute range *Min-Max* corresponds to ± 14% of the standard production rate.

Supply Chain Planning

The SC planning model used in this study consists of the campaign planning and order scheduling model of the multi-scale decision support framework presented in Laflamme-Mayer et al. [16]. It has been modified to incorporate the non-linear cost structures using a piecewise linear approach. It is formulated as a mixed-integer linear programming problem with a discrete time representation. The time horizon considered is three months and the time step is one day. The objectives of the model are to determine the optimal sequence of production, to identify low incremental cost fibre suppliers, to select high margin customer orders and to allocate the selected orders within the production campaigns. Detailed capacity and assignment constraints are used respectively to represent the limitations of the resources available and the decisions that need to be made such as the production of a given recipe during a particular time period. Constraints are also introduced to represent logical conditions within the operations such as sequence-dependent transitions. The timing of supply and demand opportunities are also taken into account. The detailed constraints ensure that the manufacturing capability is well represented.

The capability to assess when the satisfied demand results in improved overall SC profit is critical for low-cost P&P producers (Figure 4). The results obtained show the evolution of the supply chain profitability (normalized using the maximum profit obtained for the test case) as a function of the specified order fulfillment rates for different demand scenarios. The weak and strong demand scenarios are represented by increasing or decreasing the pulp price set for the initial test case (variations of +/- 10%). In general, the weaker the demand, the lower is the realizable SC profit. For the more optimistic demand scenario (demand price @ +10%), the slope of the curve is always positive and maximum capacity utilization corresponds to maximum SC profitability. On the other hand, in the case of weak pulp demand, the maximum SC profit does not occur at maximum capacity utilization. For the case of demand price @ -5% & -10%, the slopes of the curves are negative for order fulfillment values greater than 80%, i.e. the SC profit is decreasing if the pulp mill is forced to produce in order to satisfy this portion of the demand. To maintain the highest profitability, it is thus critical to understand the trade-offs between the demand and manufacturing cycles.

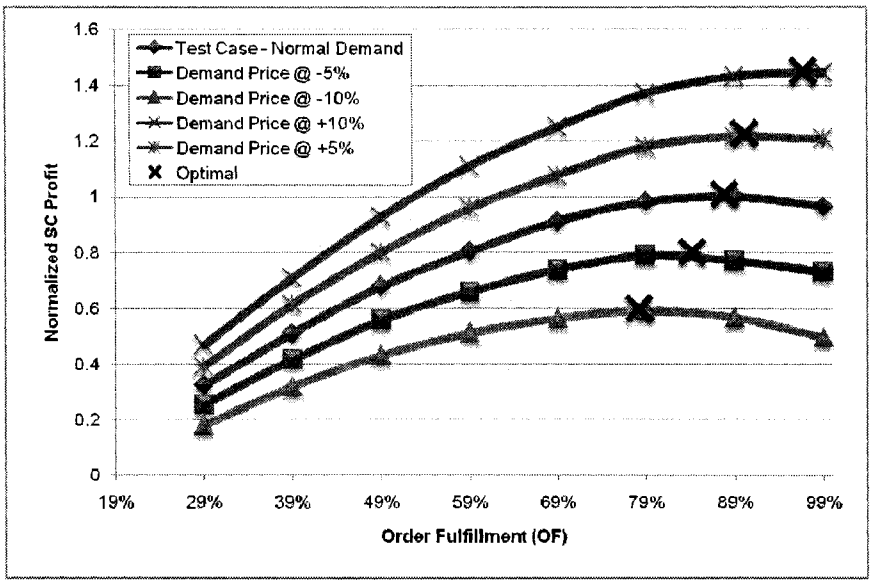


Figure 4: SC profitability for different weak and strong pulp demand contexts. For each situation, the optimal profit corresponds to the best capacity alignment.

Case Considered	Description
1- Capacity Management with Shutdown	- Production shutdowns are allowed - 30% of daily costs can be saved - Production rate set to maximum (i.e. max OEE when producing)
2- Capacity Management with Shutdown	- Production shutdowns are allowed - 15% of daily costs can be saved - Production rate set to maximum (i.e. max OEE when producing)
3- Flexible Capacity Management	- Flexible production rate (with the range earlier discussed) - No production shutdowns are allowed
4- Maximum Production	- Production rate set to maximum (i.e. max OEE) - No production shutdowns are allowed

Table 1: Different capacity management strategies in weak demand situations

Different strategies can be used to better manage the capacity in weak demand situations (Figure 5 and Table 1). The results clearly indicate that the maximum production approach, where planning decisions lead to a high utilization of the production lines, leads to significantly lower SC profit compared to approaches that seek to align the capacity with profitable pulp demand (see the white arrows in Figure 5). This is due to the fact that a part of the pulp produced is sold at a price that decreases the overall profit. Moreover, for all demand scenarios considered, the highest SC profit is obtained by using temporary production shutdowns. With this strategy it is possible to achieve a perfect match between the quantity of

pulp produced and the profitable demand. Also, compared to the flexible capacity management approach, the use of production shutdowns allows a reduction of the daily cost incurred by the mill (labour, supplies, maintenance, etc.). Although 15% savings is a more reasonable figure with respect to the mill case, the results for 30% savings highlight the importance of assessing the real costs of idle assets and of evaluating the trade-offs between this and the expected margin scenarios. Since temporary production shutdowns are difficult decisions to make (given social reasons, uncertainties, counter-intuitive, etc.), the flexible capacity management approach is a particularly interesting alternatives for capacity management. In this case, the production rate at the mill is pulled by the profitable demand and the SC profit realized can be maintained without shutting down the mill. This is especially true if only a limited part of the daily costs can be saved. Finally, given the range of production rates, the flexible approach may not be sufficient in very difficult demand scenarios (e.g. ≤ - 10%) and, eventually, production shutdowns may also be required (Figure 5). However, the flexible approach would still help to balance the SC and prevent unnecessary pressure on the other cycles e.g. fibre procurement, finishing, etc.

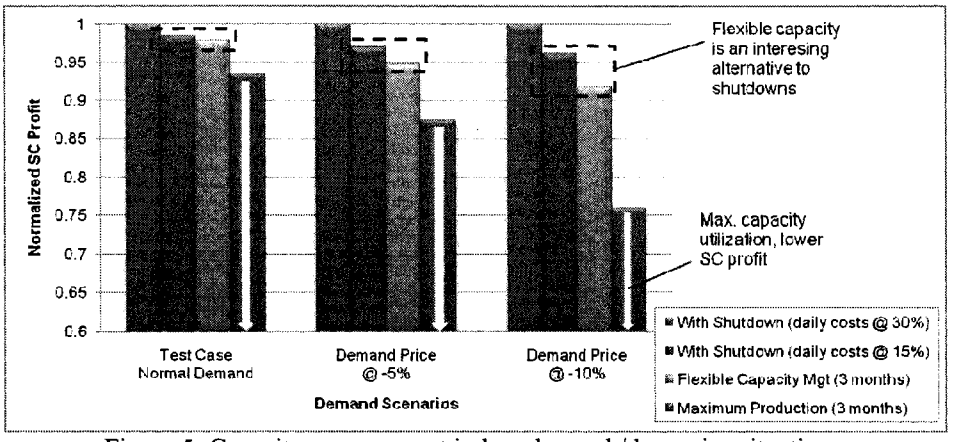


Figure 5: Capacity management in low demand / low price situations.

Figure 6 illustrates, for the weak demand scenario demand price @ -5%, how the optimal alignment can be reached with a flexible capacity management strategy. The optimal profit curve was generated by sequentially finding the optimal SC profit that can be realized if the production rate is set for each value of the range and if no shutdowns are allowed. Whilst the Total Demand available was a specified input to the problem, the Profitable Demand that was calculated by solving the problem without fixing the production rate (see Figure 5) can be considered as a target to reach. Given the demand scenario considered, the Profitable Demand corresponds to approximately 85% of the Total Demand available. The Pulp Produced was obtained by doing the summation of all pulp produced after the models were run for each production rate considered. The best SC profit was obtained at a reduced production rate of *Min+20%* (Figure 6). As indicated, this is due to the alignment of the quantity of pulp produced and the profitable demand (see *A*). A lower production rate (e.g. *Min*) does not allow to take advantage of all the demand opportunities (Profitable Demand > Pulp Produced) and thus, the corresponding profit is reduced (see *B*). Furthermore, for all production rates greater than *Min+20%* (e.g. see *C*), the profit is also reduced since unprofitable demand is satisfied (Profitable Demand < Pulp Produced).

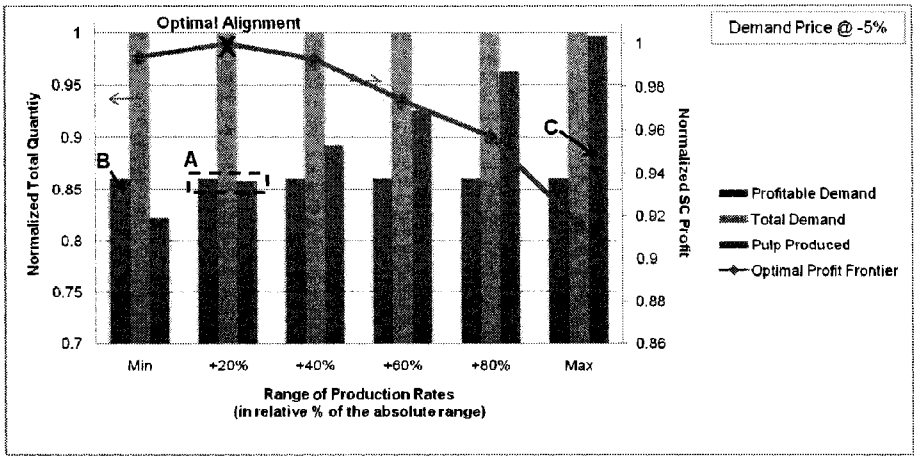


Figure 6: Finding the optimal alignment between manufacturing capacity and market demand.The Profitable Demand, Total Demand available and quantity of Pulp Produced are indicated, respectively from left to right, by the bars. The best SC profit is indicated by an "X".

The mill cost structure is an essential element to consider at the SC level in order to ensure optimal SC profit. This is particularly important in weak demand situations where the impact on SC profitability of each additional order should be evaluated based on a careful assessment of the cost/revenue generation (Figure 7, Demand Price @ -5%,). Figure 7 shows, for the weak demand scenario demand price @ -5%, the optimal profit curves that were obtained for the three manufacturing cost structure introduced in Figure 3. If additional orders are taken in Case I, the impact on SC profit is relatively limited. Contrarily, for Case II, SC profit is rapidly decreasing if additional orders are taken. This is an important aspect to take into account especially when, for example, less profitable orders are accepted to maintain customer loyalty or also, when compromise are made on the pulp price in order to get additional orders to fulfill the unused production capacity at mill.

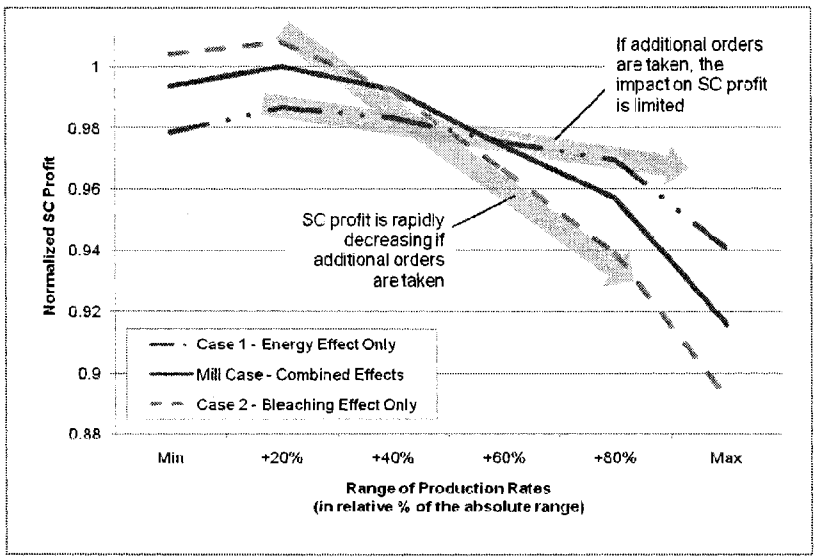


Figure 7: Effect of manufacturing cost structure (see Figure 3) on SC profit, for taking additional orders. The plain line corresponds to the mill case (same as Figure 6) and the dashed lines indicate the results obtained for Case I & II.

The mill cost structure also has a significant impact on the optimal alignment between the manufacturing and demand cycles (Figure 8). For each demand scenario, the optimal profits obtained for the Case I & II and the Mill Case are almost similar (+/-1%); depending on the cost structure, different alignments are used to achieve the same profit. For instance, for the weak demand scenario, that Case I has a higher order fulfillment in order to operate at higher production rates and thus benefit of the lowest possible manufacturing costs. Contrarily, for the strong demand scenario, Case II has a significantly lower order fulfilment in order to minimize the impact of higher manufacturing costs. Finally, for the Normal Price scenario, since the most appropriate production rate falls close to the middle of the range specified in Figure 3 (i.e. they have similar manufacturing costs), the optimal alignment is similar for the three cases considered (see A).

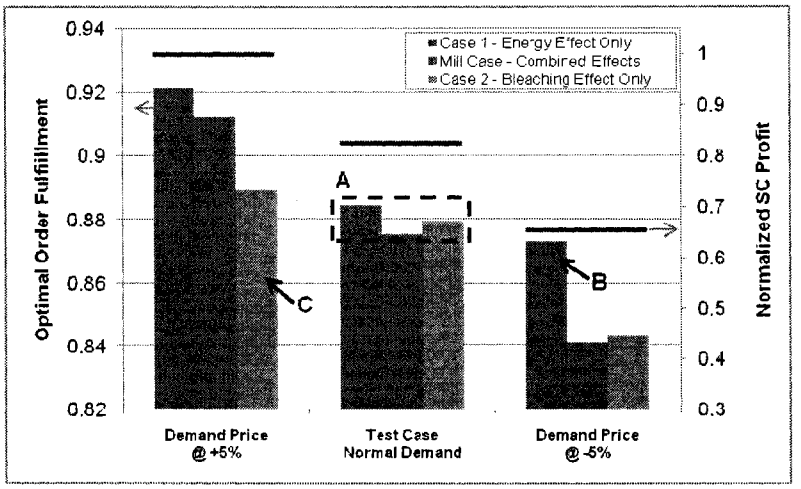


Figure 8: Effect of manufacturing cost structure on the optimal alignment between production capacity and profitable demand.

The results obtained with the flexible capacity management approach are presented for the three manufacturing cost structures considered (Case I, Mill Case, Case II) and for different demand scenarios (+5%, Normal Price, -5%). In the graph, the optimal profit realized are indicated by the straight horizontal lines and the bars give the optimal order fulfillment i.e. the quantity of pulp that was profitable to produce.

IMPLICATIONS

Based on the approach and the results presented, the authors would like to draw attention to the following:

- It was shown that the application of a margin-centric SC approach can provide significant benefits, even for a relatively simple industrial system (see Figure 2). Given the common belief that this is not an important issue for commodity product mills (e.g. newsprint, market pulp, etc.), P&P producers should investigate the benefits of integrating the production and enterprise levels for SC decision support or at least, identify in which situation this may or may not be important.

- Since the principle advantage of the tools used is their capability to provide support for the management of complex systems, greater benefit would be expected if the operations-driven approach would be applied to more complicated cases e.g. a paperboard mill producing many grades/products.

- It is expected that by considering a multi-mill network additional opportunities to improve the SC profitability could be realized. For instance, in the situation where the overall capacity should be reduced, an extended SC model could determine which mill should reduce capacity to maximize the overall profits. However, since more than one mill could serve the same market, a greater emphasis should be put on the trade-off between transportation and manufacturing costs.

CONCLUSIONS

The minimization of the cost per ton at the mill may be a misleading indicator, especially in a challenging business environment. For weak demand scenarios it was shown that maximum capacity utilization may lead to a diminished SC profit. In these cases, the capability to align the production and the profitable demand is essential in order to optimize the SC profitability. This optimal alignment can be continuously ensured using a flexible capacity management strategy where the production rate is pulled by the profitable demand. Given the key role of mills in the P&P SC, it is necessary to emphasize on the representation of the manufacturing processes at the SC level for the successful implementation of such margin-centric approaches. In this study, this was addressed using an operations-driven approach that incorporates a bottom-up cost model to characterize the manufacturing cost structure, and an optimization model for the planning of the fibre SC. To become true low-cost producers, the authors believe that P&P companies need to develop and apply such advanced analytical approaches that will allow them to systematically evaluate the trade-offs between procurement, manufacturing and demand cycles of their SC.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Matty Janssen for his help throughout this project. This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chain at École Polytechnique de Montréal, and by a scholarship provided to Martin Laflamme-Mayer from Le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les *Technologies*.

LITERATURE CITED

1. Grossmann, I., *AIChE Journal*. 51:7(2005).
2. Harkins, B.L., Middleton, E.S., Mushin, D.A., *Hydrocarbon Processing* (1999).
3. Janssen, M., Laflamme-Mayer, M., Zeinou, M.-H., Stuart, P.R., *Pulp and Paper*. 78:6(2004).
4. Kallrath, J., *OR Spectrum*. 24:3(2002).
5. Jovan, V., *Elektrotehniski vestnik 69(5): 305-310, 2002*. 69:5(2002).
6. Shah, N., *AIChE Symposium Series*. 320:94(1998).
7. Schulz, E.P., *Computers & chemical engineering*. 29:6(2005).
8. Shah, N., *Computers & Chemical Engineering*. 29:6(2005).
9. Kelly, J.D., *Chemical engineering progress*. 101:2(2005).
10. Collins, M., in. 2004. Suntec, Singapore: Asian Paper, Suntec, Singapore.
11. Laflamme-Mayer, M., janssen, M., Naliwajka, P., Stuart, P. R., *Submitted to Int'l J. of Production Economics* (2008).
12. Kaplan, R.S.R., Anderson, S. R., *Harvard business review*. 82:11(2004).
13. Laflamme-Mayer, M., Lafourcade, S., Riemer, K., Stuart, P. R., *Submitted to Int'l J. of Production Economics* (2008).
14. Spear, M., *Process Engineering*. 86:7/8(2005).
15. Laflamme-Mayer, M., et al., *to be submitted to AIChE Journal* (2007).
16. Laflamme-Mayer, M., et al., *to be submitted to AIChE Journal* (2007).
17. Bredstrom, D., et al., *European Journal of Operational Research*. 156:1(2004).

ANNEXE H

MANUFACTURING FLEXIBILITY TO SUPPORT COST EFFECTIVE FIBRE SUPPLY

Martin Laflamme-Mayer[a], Steve Raymond[b], Jason Linkewich[b] and Paul Stuart[a*]

[a] NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration, Department of Chemical Engineering,
École Polytechnique - Montréal, Montréal H3C 3A7, Canada

[b] Tembec Inc., Témiscaming J0Z 3R0, Canada

ABSTRACT

The capability to determine the optimal balance between fibre supply and requirements is essential to ensure the competitiveness of high-yield market pulp mills. The application of advanced supply chain (SC) analytical methods and tools has the potential to improve the management of the increasingly complex fibre procurement process. This paper describes, for the case of an existing market pulp mill, a SC planning approach that exploits the manufacturing flexibility at the mill and provides adequate support for cost effective fibre supply. Given the important trade-offs between procurement and manufacturing costs, it is necessary to emphasize the representation of the manufacturing processes at the SC level for the successful implementation of such approaches. This is addressed using an operations-driven approach that provides the required visibility of manufacturing operations and helps to coordinate business units across the SC.

Keywords: Operations-Driven Cost Modeling, Supply Chain Planning, Optimization, Flexible Manufacturing, High-Yield Pulp Mill

INTRODUCTION

Given the difficult and rapidly changing business environment, Canadian pulp and paper (P&P) companies have been challenged to restructure their operations, investments and financing strategies in order to improve their economic performance. They have put significant effort in reassessing their enterprise-wide activities with the aim to act on both revenues and costs. In this context, the ability to apply systems-oriented methodologies and decision support tools will be a critical element for the successful design, coordination and management of the P&P supply chains (SC).

Given the lack of coordination between the procurement and manufacturing cycles, it is often challenging for P&P mills to find the optimal balance between fibre supply and requirements. Since P&P

* To whom all correspondence should be addressed. Contact: paul.stuart@polymtl.ca

companies put great emphasis on the production and the maximization of the overall equipment efficiency (OEE), raw material management is often viewed as of secondary importance [1]. Given their capacity-focused management approach, fibre supply is rarely considered systematically during production planning. This practice is no longer adequate in the Eastern Canadian context where high fibre cost and limited fibre availability have a critical impact on overall profitability. Given the complexity of the fibre SC, it is necessary to systematically assess the impact of planning decisions and to identify the important trade-offs between the manufacturing and procurement cycles.

In collaboration with key logistics and operations managers at Tembec, a decision support tool has been developed that provides the required visibility of manufacturing operations and helps to better coordinate the procurement and manufacturing cycles. This paper describes an operations-driven approach that has the potential to help the P&P industry to make better SC decisions, and demonstrates how this can be used to support the implementation of flexible manufacturing at an existing market pulp mill.

OPERATIONS-DRIVEN SC APPROACH

In recent years, the integration of information across the SC has improved tremendously by the implementation of modern transactional information technologies (IT).[2] From the manufacturing perspective, decision making improved by providing managers with consistent information on what is produced in the plants. However, enterprise-level systems (e.g. ERP) typically incorporate aggregated plant data that are not adequate for SC decision support in process industries (Figure 1) [3]. This is the case in P&P where process information is incorporated on an *ad hoc* basis to support higher level decision processes [4]. Although large amounts of data are provided by the IT supporting manufacturing and business activities, current managerial approaches do not fully exploit these data for advanced decision support and thus, the potential of implementing analytical approaches is yet to be realized.

Since the performance of each mill is in close correlation with the profitability of the whole fibre SC, manufacturing facilities are key drivers of SC efficiency. However, because of the complexity and uncertainty associated to P&P manufacturing operations, it is difficult, compared to discrete-type industries, to make the link between the production and enterprise levels. In this context, SC approaches developed by the PSE community are most interesting since they emphasize the incorporation of chemical engineering knowledge to better represent the process capability at the SC level [2].

For large-scale and capital intensive process industries, there are strong overlaps between production and SC planning [5]. Since these decision making activities by definition take into account the production and business perspectives, planning frameworks can play a key role in integrating the plant and enterprise levels [3, 6]. However, the oversimplified representation of manufacturing capability is a typical weaknesses of SC planning problems of low-margin production plants [7]. So far, the incorporation of more sophisticated process representations has been done for the petroleum industry using so-called *property-based* SC planning approaches [8, 9]. Since these rely on detailed process models (based on mass and energy balances) to characterize the production processes and operating conditions, they often involve non-linear relationships and result in complex SC models that are difficult to solve [2, 8, 10].

Since first-principles relationships are not as widely available in P&P, there is good reason to use and analyze on-line measurements (e.g. production rates, specific energy, consistency, etc.) and to develop data-driven models to characterize the operations at the mill. With the advent of process information

management systems (PIMS), many envision the value of incorporating the information that lies in the lower-level process data in higher-level systems [3, 4, 10, 11]. Given the convergence of mill's PIMS and enterprise systems, there is an opportunity to 1) use lower-level process data to characterize the operating conditions, 2) to link the production and business perspectives by integrating critical process and cost information and 3) to reflect manufacturing operations for higher-level SC decision support.

This challenge has been addressed by developing a margin-centric SC approach combining descriptive and prescriptive models (Figure 1). An operations-driven cost model can be use to characterize the manufacturing costs of continuous P&P processes [12]. This advanced cost modeling technique, inspired by Activity-Based Costing (ABC) [13], uses a rich set of resource- and process-related drivers that are based on the analysis of the mill's historical process and cost data. The presented application at a high-yield pulp mill, outlines how to structure and analyze critical data and to develop a cost model suitable for the identification and interpretation of the cost implications of various operating regimes [14]. This bottom-up approach provides a perspective that not only improves the understanding of the mill's cost structure but also provides the process information necessary for the representation of the mill's operations at the SC level.

Since SC problems are complex, it can be very challenging to simultaneously evaluate the various trade-offs and determine the best SC operative strategy without adequate decision support tools [15]. An SC planning model [16, 17], incorporating the relevant issues considered by the decision makers involved in the procurement, manufacturing and demand cycles of the fibre SC, is used to provide the visibility across the supply chain and decision levels (Figure 1). The optimization-based framework improves current decision processes by providing a set of business-valuable information (e.g. feasible production plan, allocation of supply & demand orders, inventory levels, bottlenecks, constraints, etc.) that helps to maximize the overall SC profitability. This capability to manage the complexity of the fibre SC is critical for the cost effectiveness of market pulp producers [17, 18].

This paper will focus on the integration of the mill and enterprise levels and demonstrate the importance and the potential benefits for the P&P industry by better representing the manufacturing cycle in SC planning problems.

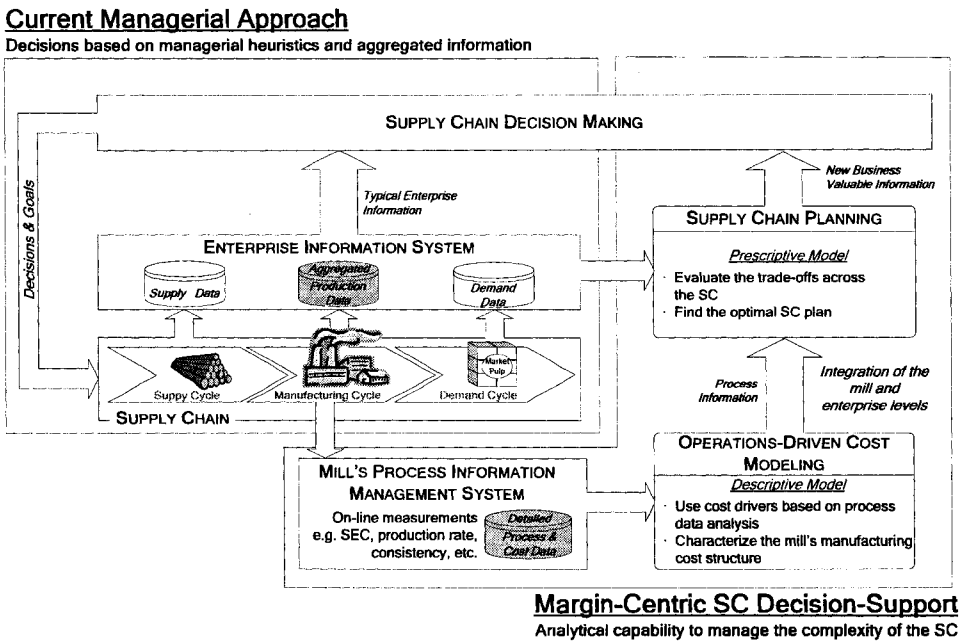


Figure 1: Margin-centric approach for SC decision support in P&P.

OBJECTIVE

The main objective of this paper is to show, for the case of an operating high-yield pulp mill, the potential benefits of implementing flexible manufacturing strategies to ensure cost-effective fibre supply. Given the focus on the integration of the mill and enterprise levels, this work will demonstrate the importance of better representing the manufacturing cycle in P&P SC planning problems and hence, the advantages of the operations-driven approach.

CASE STUDY

High-Yield Pulp Mill

The case study considered consists of the fibre supply chain of a high-yield pulp mill including the fibre procurement, the manufacturing and the distribution/customer cycles (Figure 2). Raw material inventory planning and supplier selection based on incremental costs and expected availability are the key elements for fibre procurement planning. The mill produces high-yield pulp from hardwood chips using a bleached chemi-thermomechanical pulping process where four main production steps are involved: chemical pre-treatment, pressurized refining of wood fibres, bleaching of the pulp, and drying/finishing operations. Various pulp grades are obtained by varying the process operating conditions according to standard recipes. The final product is sold to customers in the form of baled dried pulp. For each cycle, continuous and dynamic SC decision making processes must be executed at different decision levels. The integrated planning of these cycles is desirable in order to achieve good supply chain coordination, and is an important issue for market pulp mills.

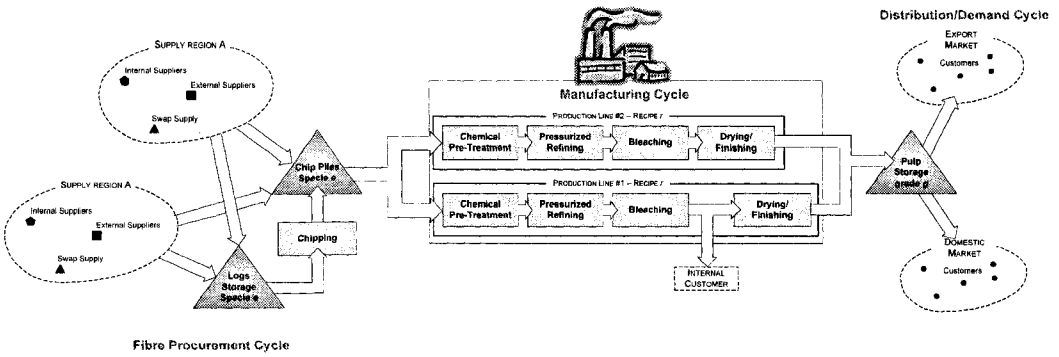


Figure 2: Fibre supply chain of the high-yield pulp mill.

Flexible Manufacturing to Support Fibre Supply

Fibre supply is an important element to ensure the cost competitiveness of high-yield market pulp mills. In Eastern Canada, the decision processes involved in identifying the most appropriate fibre supply strategy are very challenging and dynamic because of a number of issues such as sawmill closures, high cutting rights costs and forest-related regulations. Fibre supply planning is typically based on the production plan established at the mill which specifies the amount of each pulp grade to be produced on each production line. The specific requirements for each hardwood species are evaluated given the chip input ratios specified by the recipes for each pulp grade. However, given the current chip feeding process and the information systems in place, it is practically difficult for the mill to monitor precisely the relative amount of each wood species used at any given time. Therefore, compared to the "ideal" recipe conditions, the "real" chip input ratio is varying. Being good operators, the mill has developed the capability to adjust the operating conditions accordingly on each production line to mitigate the impact of the chip ratio and meet the required pulp grade specifications. Given the available tools to optimize the trade-offs within the SC and to characterize the manufacturing cost structure based on operating conditions, there is an opportunity to exploit the mill's process capability and provide an additional degree of freedom for the procurement of fibre. This paper will demonstrate the potential value of incorporating the chip input ratio as a decision variable in the SC problem to ensure better alignment between fibre supply and the manufacturing cycles.

RESULTS & DISCUSSION

Operations-Driven Cost Modeling

The cost implications of varying chip input ratios for each grade produced at the mill have been determined based on the modeling technique presented in Laflamme-Mayer et al. [12]. This multidisciplinary approach emphasizes the importance of the process perspective (as opposed to the product perspective) for identifying the source of cost in continuous process environments, and both the production process and the specific operating conditions are systematically considered. By using bottom-up process and cost information, resource and process activity drivers can be identified and used to characterize the cost generation within the mill's main processing operations.

A set of feasible discrete recipe scenarios were established for each grade. They were obtained by varying the chip input ratio over a practical range which allows meeting pulp specifications and keeping energy consumption below the peak at all time. For the case of one maple grade, the 28 feasible recipes

were identified based on the combination of three hardwood species i.e. maple, birch and mixed hardwood (Figure 3). For each scenario, the impact of the selected chip input ratios on the operating conditions was characterized in terms of refining energy and bleaching chemicals: it was assumed that the pretreatment conditions were not significantly affected by chip input ratio variations. Using this bottom-up process information, the impact of each recipe scenario on the manufacturing cost structure was evaluated.

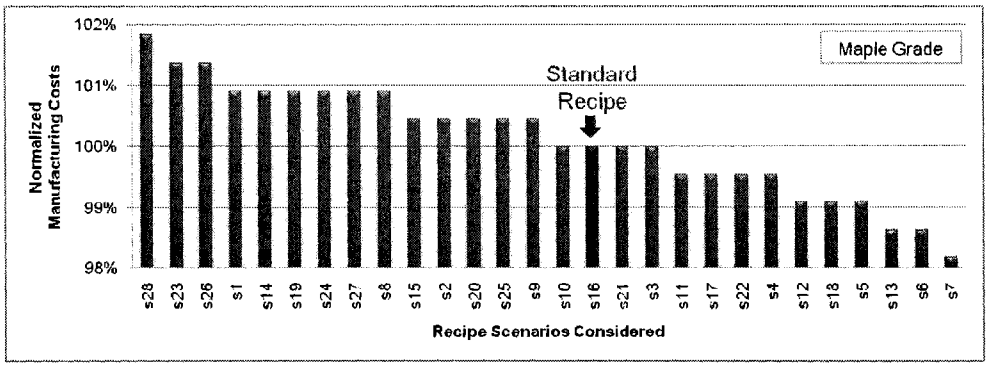


Figure 3: Process-based manufacturing costs evaluated for each identified recipe scenario. Recipe s16 corresponds to the standard recipe currently used at the mill.

Since the range of deviation is relatively narrow, i.e. ± 2% of the manufacturing cost of *s16*, the cost structure flexibility of the mill case is considered to be high (Figure 3). In order to better understand the impact of a less flexible cost structure on the SC level, i.e. more sensitivity to the variation of chip input ratios, we introduced two additional cases of medium (±5%) and low (± 10 %) cost flexibility. In both cases, while the range of deviation was increased, the relative cost performance between each recipe scenarios was kept constant (see Figure 4).

The integration of the process and cost perspectives, using the operations-driven approach, is an essential step that allows for better understanding how (and to what extent) the relative amount of each wood species impacts the cost performance of producing each grade at the mill (Figure 4). The manufacturing cost increases with the proportion of maple chip (see A), which reflects the fact that the bleaching of maple fibres is more difficult compared to other species. Although the refining of birch fibres is more energy intensive, the higher is the birch ratio, the lower are the manufacturing cost (see B) because the augmented electricity cost is largely offset by the improved bleaching efficiency. Finally, for a given maple ratio, the addition of mix hardwood fibres results in augmented costs. Since a high content of aspen fibres in the mix was assumed, the larger the amount of mixed fibres, the lower is the efficiency of the bleaching process that must be adapted to maintain the pulp bulkiness specifications.

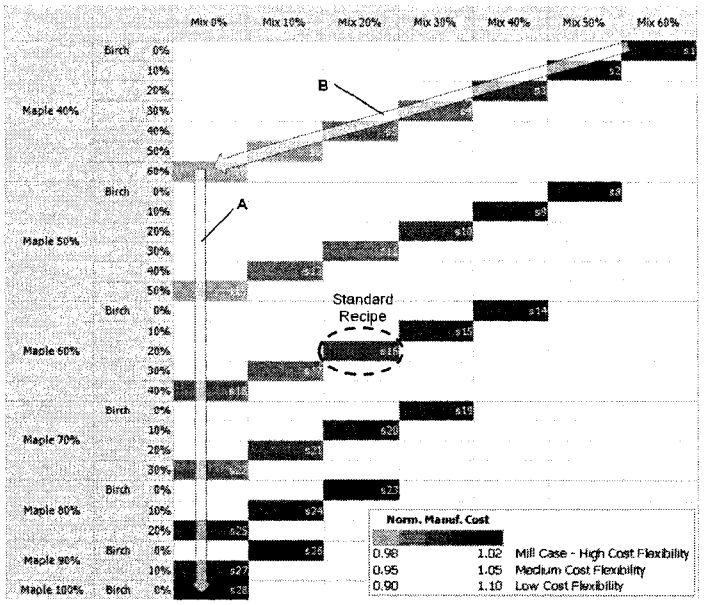


Figure 4: Cost implications of varying chip input ratios for the 28 scenarios considered.

Supply Chain Planning

The SC planning model used in this study consists of the campaign planning and order scheduling model of the multi-scale decision support framework presented in Laflamme-Mayer et al.[17]. It is formulated as a mixed-integer linear programming problem with a discrete time representation. The time horizon considered is three months and the time step is one day. The objectives of the model are to determine the optimal sequence of production, to identify low incremental cost fibre suppliers, to select high margin customer orders and to allocate the selected orders within the production campaigns. Detailed capacity and assignment constraints are used respectively to represent the limitations of the resources available, and the decisions that need to be made such as the production of a given recipe during a particular time period. Constraints are also introduced to represent logical conditions within the operations such as sequence-dependent transitions. The timing of supply and demand opportunities is also taken into account. Furthermore, in order to account for the choice of the most appropriate recipe from the set of feasible scenarios (Figure 3), slight modifications have been introduced into the initial formulation. The consumption of fibre (for each wood species) and the manufacturing costs are not fixed for a given pulp grade but are calculated based on the particular recipe scenario selected at any given time.

Planning Approach	Description
Not Integrated (NI)	– Production campaigns at the mill are fixed according to industrial heuristic – Procurement of fibre must adapt accordingly – Recipes were fixed according to standard for each grade
Integrated (I)	– Procurement and production planning are optimized simultaneously – Recipes were fixed according to standard for each grade
Integrated with ratios (I^+)	– Procurement and production planning are optimized simultaneously – The best recipe can be chosen from the set of scenarios

Table 1: Description of the different planning approaches compared.

In order to demonstrate the benefits of managing the complexity of the SC, three planning approaches (Table 1) were compared for three different fibre supply cases.

For the procurement context defined in Case I, the supply opportunities available are relatively aligned with the fibre requirements at the mill. It is thus possible to reach a close to optimal balance between the procurement and manufacturing cycles with the industrial heuristic and the standard recipe (*s16*) (Figure 5, Case I). For this reason, there is little improvement opportunities when using more advanced planning approach.

Case II is based on the supply opportunities specified in Case I but considers a more constrained fibre supply context. This situation was defined by 1) reducing the maximum inventory level allowed, 2) providing low initial inventory and 3) introducing a temporary shortage of maple fibre during the first month of the time horizon considered. The more constrained the SC, the more difficult it is to assess the trade-offs and thus, the greater is the profit improvement by using advanced decision support tools (Figure 5, Case II). Most of the benefits of SC planning were realized by improving the synchronization between the manufacturing and procurement cycles. Considering that the same supply opportunities were provided in Case I & II and similar profit improvement for I and I^+, indicates that the use of standard recipes can still provide a relatively good alignment with fibre supply.

Finally the third case considers the issue of changing supply opportunities. In Case III, the supply context is defined such that it is not possible to supply more than half the maple fibre capacity that was available in *Case I* at a reasonable cost. This is compensated by a greater availability of birch and mixed hardwood fibres where, compared to Case I, the latter is more expensive. There is a clear effect of the misalignment between the standard recipe *s16* and the newly defined supply situation (Figure 5). Even with the synchronization of the manufacturing and procurement cycles, the integrated approach (I) is not enough to adapt to this situation. In difficult and changing supply contexts, only the I^+ SC planning approach, which allows for the selection of the most suitable recipe (chip input ratios), can ensure the optimal alignment between the fibre supply and requirements. In addition to coordinate the decisions across the SC, this approach takes advantage of the manufacturing flexibility at the mill and allows to get the most out of any given supply context.

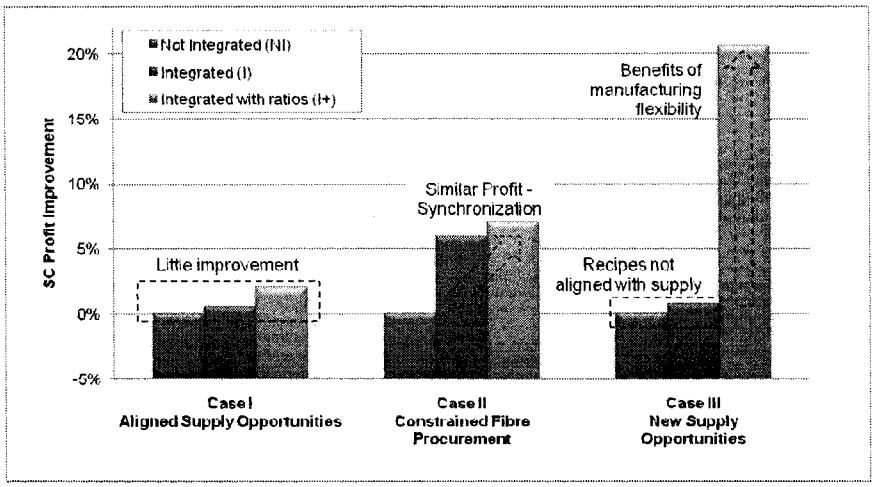


Figure 5: Benefits of managing the complexity of the supply chain.

The capability to identify the trade-offs between direct manufacturing and procurement costs and to evaluate its impact on SC profitability is a critical element for the successful implementation of SC planning based on manufacturing flexibility (Figure 6). Given the supply context introduced in Case III, the profitability curve was obtained by sequentially calculating the optimal profit for each feasible recipe scenario where the maple ratio is set to 40%. The greatest profit can be obtained by selecting recipe 4 that offers the optimal balance between procurement and manufacturing costs. The corresponding chip input ratios (maple 40%, mixed HW 30% and birch 40%) ensures that the most expensive sources of mixed HW and birch are avoided by compromising on the direct manufacturing costs. The selection of any other recipe will result in a reduced overall profit. If a recipe with a larger proportion of birch is selected (recipes 5 to 7), the manufacturing costs savings will be offset by an increase in fibre cost. On the other hand, the manufacturing costs increase with the proportion of mixed HW chips used. For instance, in the case of recipe 3, the potential saving of using cheaper mixed HW fibres is offset by higher manufacturing costs at the mill. The procurement costs significantly increase towards the extremes of the graph, i.e. at mixed HW = 60% or birch = 60%. In order to have large amount of a given wood specie, it is necessary to get fibres from the high range of the incremental fibre supply cost curve.

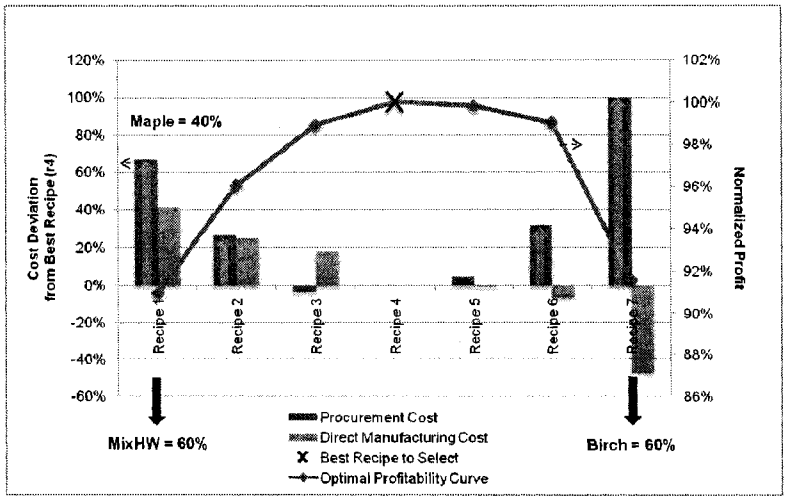


Figure 6: Trade-offs between manufacturing and procurement costs

For a range of recipes (recipes *3*, *4*, *5* and *6*), the profit that can be realized is fairly constant. From the fibre procurement perspective, this means that as long as the fibre supply varies within this range, the impact on the overall SC profit is limited. This situation can be exploited by the procurement manager to improve the alignment between fibre supply and requirements. However, this capability strongly depends on the manufacturing cost structure flexibility (Figure 7). For less flexible cost structures (i.e. the manufacturing costs are more sensitive to variation of the chip input ratio), the plateau is reduced and large profit reductions are experienced if the best recipe to use is not selected. Therefore, for *Medium* and *Low* cost flexibility situations, there is less opportunity compared to the *Mill Case* to use recipe selection as a tool to align fibre supply and requirement while maintaining the SC profit.

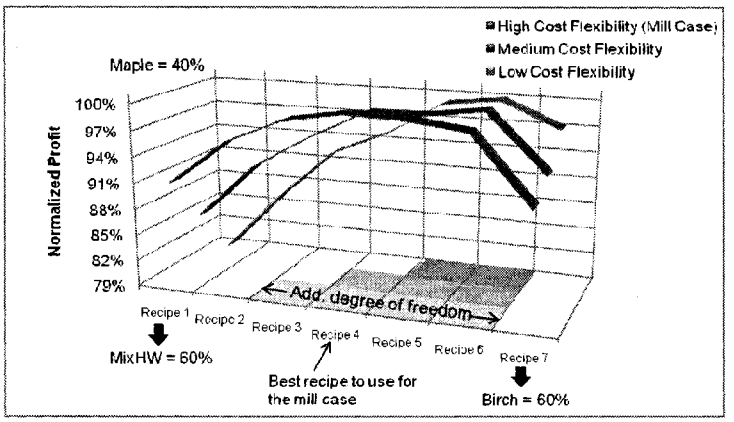


Figure 7: Flexibility of the alignment of fibre supply and requirement

Fibre procurement can take advantage of the mill cost structure flexibility (Figure 8). In the practical case considered, competitors adopt an aggressive procurement strategy due to low inventory levels, and offer a premium on fibre price in order to attract more capacity from regional contractors. The fibre

supply context, based on Case III, takes into account the increased pressure on fibre cost by increasing the fibre costs by 10%, 20% or 30% for the equivalent of 25% of the given birch supply capacity. The higher the flexibility, the greater are the opportunity to maintain the profit level in difficult procurement situations (Figure 8). For instance, in the Mill Case, the cost structure provides enough flexibility to adopt a more disciplined fibre procurement strategy i.e. avoid buying birch fibre at a premium. On the other hand, for the case of Medium and High flexibility, since the impact of selecting another recipe on manufacturing costs is high, there is no other alternative than to pay a premium to get the required amount of fibres. From a practical perspective, in addition to reduce procurement costs, disciplined fibre supply strategies are more desirable because otherwise the resulting competition for fibres tends to contribute to maintaining high fibre prices on the market for a longer period of time.

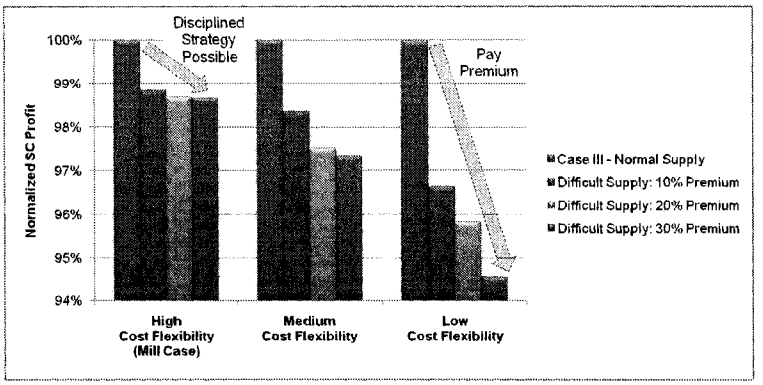


Figure 8: Exploit manufacturing cost structure flexibility to maintain profit level.

IMPLICATIONS

Based on the approach and the results presented, the authors would like to draw attention to the following:

- It was shown that changing process conditions, which lead to various operating regimes for the same pulp grade and production line, have an impact on the direct manufacturing cost structure at the mill. Although this is recognized by process engineers who understand the general cost trends, prior to the application of the operations-driven approach, they did not have access to a quantitative characterization of these costs. The authors believe that it is critical to integrate the production and enterprise perspective and hence, to improve margin-centric decision making at the SC level.

- Since it may not be possible to characterize all recipe scenarios using a data-driven approach, the cost implications of varying chip input ratios can also be determined based on the process engineer's experience, simulations or any other bottom-up approach that emphasizes the process perspective. However, as soon as a new recipe is run, historical process data should be used to characterize its cost performance and this information should replace the initial estimates in the SC planning problems. Over time, the operations-driven approach will facilitate the understanding of the cost implications of key operating conditions and provide better support for SC planning.

- Given the technological expertise of suppliers, P&P best practices are widely available across the industry. The operations-driven approach that combines the use of descriptive and prescriptive models, allows developing a unique margin-centric SC capability. This can be an important source of specific competitive advantage that will likely be difficult for competitors to replicate.

CONCLUSIONS

Fibre supply is an important element to ensure the competitiveness of high-yield market pulp mills. Since the procurement and manufacturing cycles are typically managed in silos, it is often challenging to find the optimal balance between fibre supply and requirements. Given the complexity of the fibre SC, it is essential to coordinate the planning decisions across the business units for the SC. As demonstrated, SC planning approaches, exploiting the manufacturing flexibility at the mill, can provide adequate support for cost effective fibre supply. In addition to improving the synchronization between the manufacturing and procurement cycles, it provides fibre procurement managers with the capability to get the right supply opportunities, in any given supply context. Given the important trade-offs between procurement and manufacturing costs, it is necessary to emphasize on the representation of the manufacturing processes at the SC level for the successful implementation of margin-centric approaches. In this study, this was addressed using an operations-driven approach that incorporates a bottom-up cost model to quantify the impact of the recipe selected on the mill manufacturing cost structure, and an optimization model for the planning of the fibre SC. With the forest biorefinery's rapid expansion in North-American, high fibre cost and limited availability is likely to become a given in the future. Therefore, P&P producers must be prepared to adapt to this new reality and develop the ability to apply advanced analytical approaches that will help them manage the increasingly complex fibre procurement planning process.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Matty Janssen for his help throughout this project. This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chain at *École Polytechnique de Montréal*, and by a scholarship provided to Martin Laflamme-Mayer from *Le Fond Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies*.

LITERATURE CITED

1. Lail, P.W., *Supply chain best practices for the pulp and paper industry*, Atlanta, GA, 2003.
2. Grossmann, I., *AIChE Journal*. 51:7(2005).
3. Harkins, B.L., Middleton, E.S., Mushin, D.A., *Hydrocarbon Processing* (1999).
4. Janssen, M., Laflamme-Mayer, M., Zeinou, M.-H., Stuart, P.R., *Pulp and Paper*. 78:6(2004).
5. Kallrath, J., *OR Spectrum*. 24:3(2002).
6. Jovan, V., *Elektrotehniski vestnik 69(5): 305-310, 2002*. 69:5(2002).
7. Shah, N., *AIChE Symposium Series*. 320:94(1998).
8. Schulz, E.P., *Computers & chemical engineering*. 29:6(2005).
9. Shah, N., *Computers & Chemical Engineering*. 29:6(2005).
10. Kelly, J.D., *Chemical engineering progress*. 101:2(2005).
11. Collins, M., in. 2004. Suntec, Singapore: Asian Paper, Suntec, Singapore.
12. Laflamme-Mayer, M., janssen, M., Naliwajka, P., Stuart, P. R., *Submitted to Int'l J. of Production Economics* (2008).

13. Kaplan, R.S.R., Anderson, S. R., *Harvard business review*. 82:11(2004).
14. Laflamme-Mayer, M., Lafourcade, S., Riemer, K., Stuart, P. R., *Submitted to Int'l J. of Production Economics* (2008).
15. Spear, M., *Process Engineering*. 86:7/8(2005).
16. Laflamme-Mayer, M., et al., *to be submitted to AIChE Journal* (2007).
17. Laflamme-Mayer, M., et al., *to be submitted to AIChE Journal* (2007).
18. Bredstrom, D., et al., *European Journal of Operational Research*. 156:1(2004).

ANNEXE I

SUPPLÉMENT DE LITTÉRATURE

Revue spécifique de travaux pertinents

Le développement du cadre d'optimisation de la SC proposé dans cette thèse a été principalement inspiré par trois articles. Ils ont été respectivement considérés pour l'élaboration du modèle de planification, du modèle d'ordonnancement de la production et de l'approche hiérarchiques en ligne. Les sous-sections suivantes fournissent de plus amples détails sur ces applications particulièrement pertinentes.

P&S intégré de la SC dans l'industrie chimique

Guillén et al. [1] ont présenté, pour l'industrie chimique, une approche intégrée de P&S d'une SC multi-échelons qui incorpore des usines polyvalentes (multi-produits) de production par lots. Deux approches sont considérées. La première, qui consiste en une approche traditionnelle de P&S, vise la maximisation des revenus et ignore les effets sur les flux de trésorerie. La seconde intègre un modèle de gestion des flux de trésorerie qui permet l'analyse simultanée des impacts des décisions opérationnelles sur la performance financière de l'entreprise. La comparaison des résultats obtenus pour ces deux approches souligne les avantages de prendre en compte les aspects financiers dans les problèmes de P&S.

Du point de vue de la présente thèse, un des éléments particulièrement intéressant consiste en la formulation du modèle de planification de la production, au second niveau du cadre de P&S proposé. Il est utilisé afin de déterminer, pour chaque période agrégée, la quantité totale de chaque produit à manufacturer. Pour ce, des variables binaires indiquent le nombre de fois qu'une tâche doit être répétée à chacune des périodes. Puisque ce modèle est utilisé à haut niveau, uniquement des contraintes d'affectation, les bilans de masse et de capacité sont considérés. Tandis que les premières assurent que le nombre de tâches affectées respecte le temps disponible à l'usine, les secondes garantissent que les aspects tels que la consommation des matières premières, les rendements et les intrants/extrants de la production soient considérés. Quant à elles, les contraintes du troisième type forcent le respect de la capacité des équipements, des inventaires, etc. Finalement, le lien entre les variables d'ordonnancement et de planification se fait en fixant les inventaires de produits à la fin

de la première période agrégée selon les résultats détaillés obtenus à l'aide du modèle d'ordonnancement pour la période détaillée correspondante.

Optimisation de la SC dans l'industrie des P&P

Deux publications [2, 3] provenant du *Norwegian School of Economics and Business Administration (NHH)* sont particulièrement pertinentes dans le contexte de cette thèse. Pour l'étude de cas établie avec la compagnie *Södra Cell AB*, les processus de planification de la SC se font à différents niveaux décisionnels. À haut niveau, un calendrier de production préliminaire, basé sur des prévisions, est établi en considérant un horizon de temps de un an. Ensuite, à un niveau inférieur, un processus de planification plus détaillé fournit une cédule de production, assure que les livraisons soient respectées et veille à ce que la demande et l'offre soit équilibrées. Dans ce dernier cas, un horizon de temps de trois mois est pris en compte. L'étude [2] souligne que la coordination du flux de fibre est très importante afin d'assurer la rentabilité de l'entreprise, et que cela nécessite le développement d'outils d'aide à la décision pouvant fournir la visibilité nécessaire tout au long de la SC.

Les détails l'étude de cas ainsi que la formulation des modèles d'optimisation sont présentés par Bredström & al [3]. La SC considérée se compose des cycles d'approvisionnement, de fabrication (qui comprend trois usines de pâte kraft) et de distribution/demande. Tel que mentionné, les objectifs visés par les auteurs consistaient à élaborer des modèles et méthodes d'optimisation pour la planification de la SC à court terme et à évaluer le potentiel de ces outils pour le support à la prise de décisions. Les deux modèles alternatifs proposés considèrent des décisions journalières, prennent en compte un horizon de temps de 3 mois et sont formulés par programmation linéaire et en nombres entiers. Le premier consiste en une approche par génération de colonnes où la planification complète à chaque usine est représentée par une variable. Le deuxième utilise quant à lui une formulation explicite qui est résolue par la technique de séparation et d'évaluation progressive (i.e. « branch & bound »). Afin de réduire le nombre de contraintes prises en compte (et donc les efforts computationnels requis), une méthode a été employée pour faire l'agrégation des périodes de temps correspondant aux décisions moins immédiates. Enfin, ces travaux ont démontrés que les approches de programmation mathématique donnent généralement de meilleurs résultats, l'optimisation de la SC en P&P, que les solutions générées manuellement.

P&S multi-niveaux et « en ligne » de la SC

Stefansson et al. [4, 5] présente, pour le cas réel d'une compagnie pharmaceutique, une application de l'approche de P&S hiérarchique et « en ligne ». Les trois niveaux hiérarchiques du cadre de planification proposé diffèrent tant par l'horizon de temps considéré que par les objectifs visés et le type de données utilisées. Au niveau le plus élevé, le modèle formulé optimise les campagnes de production pour des besoins de planification à long terme. Ensuite, au niveau intermédiaire, le modèle a pour objectif simultané de réviser les campagnes établies au niveau supérieur et d'allouer les commandes courantes (sujettes à des changements) à chacune de celles-ci. Enfin, au niveau inférieur, un troisième modèle, basé sur les commandes qui ont été confirmées par les clients, est utilisé pour l'ordonnancement détaillé des tâches de production. Afin de s'adapter au processus décisionnels les modèles considèrent à chaque niveau un horizon de temps et une fréquence d'utilisation spécifiques (correspondant aux besoins particuliers de chacun des niveaux). À chaque utilisation, l'état du modèle est mis à jour en utilisant les données les plus récentes disponibles et l'optimisation est lancée afin de déterminer le meilleur plan/cédule. Étant donné l'horizon de temps glissant, seulement le plan optimal obtenu pour le début de la période est réellement implanté et, à chaque fois, l'horizon considéré est repoussé. Au fur est à mesure que de nouvelles informations sont disponibles, le plan associé aux périodes ultérieures est raffiné. Bien que cette approche ne soit pas optimale, comparé au cas idéal où toutes les informations pourraient être spécifiées au préalable et avec certitude pour tout l'horizon, les travaux de Stefansson et al. [4] ont démontré qu'elle fournit de bons résultats dans le contexte de problèmes pratiques de P&S.

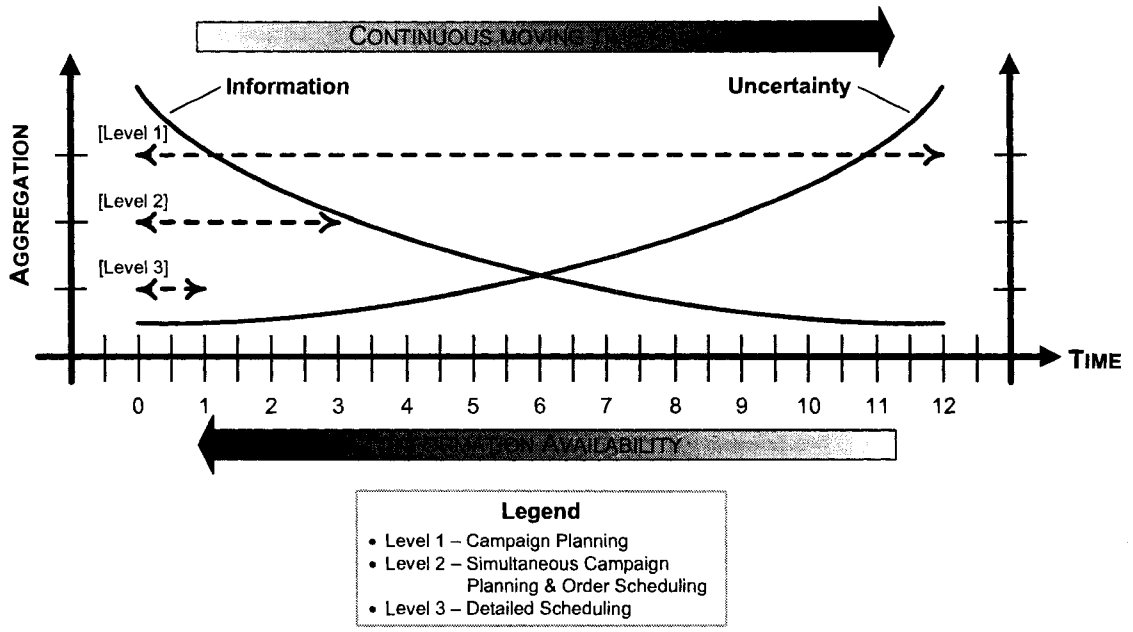


Figure 1 : Processus décisionnels, disponibilité de l'information et incertitudes

(tirée de Stefansson & al. [4])

Références

[1] G. Guillen, M. Badell, A. Espuna, and L. Puigjaner, "Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 421-436, 2006.

[2] D. R. Carlsson, M., "Supply chain management in forestry - Case studies at Sodra Cell AB," *Supply Chain Management and Advanced Planning European Journal of Operational Research*, vol. 163, no. 3, pp. 589-616, 2005.

[3] D. Bredstrom, J. T. Lundgren, M. Ronnqvist, D. Carlsson, and A. Mason, "Supply chain optimization in the pulp mill industry - IP models, column generation and novel constraint branches," *European Journal of Operational Research*, vol. 156, no. 1, pp. 2-22, 2004.

[4] H. S. Stefansson, Nilay, Jensson, Pall., "Multiscale planning and scheduling in the secondary pharmaceutical industry," *AIChE Journal*, vol. 52, no. 12, pp. 4133-4149, 2006.

[5] H. J. Stefansson, Pall. Shah, Nilay., "Integration of multi-scale planning and scheduling problems," in *16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering* Germany, 2006, pp. 2111-2116.

ANNEXE J

EXTENSIONS AU MODÈLE DE PLANIFICATION OPÉRATIONNELLE DE LA SC – FLEXIBILITÉ DE LA CAPACITÉ DE PRODUCTION

Mise en contexte

Les résultats présentés à la Section 4.5 démontrent que, contrairement aux pratiques de gestion « centrée sur la production » et basée sur les recettes, l'utilisation pour la prise de décisions d'affaires d'informations plus précises sur la production facilite l'application de stratégies axées sur les marges. Celles-ci visent à mieux exploiter la capacité des procédés dans le contexte de la SC. Plus particulièrement, une des deux stratégies potentielles présentées consistait en l'exploitation la flexibilité de la capacité de production afin de mieux aligner la production et la demande de pâte (voir Section 4.5.1). Dans ce cas, puisque les décisions reliées à la gestion de la capacité de production doivent être fondées sur une évaluation minutieuse des coûts et des revenus au sein de la SC, il est essentiel de déterminer comment la structure des coûts manufacturiers évolue selon les taux de production envisagés. Pour ce, le modèle de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes présenté à l'Annexe E a dû être adapté. Cette annexe résume les principaux changements qui ont été effectués à la formulation initiale.

Notation additionnelle

Ensembles et indices

A	Ensemble des points extrêmes utilisés pour l'approximation linéaire par morceaux, indice $a \varepsilon A$ ($\|A\| = 1 + \|B\|$).
B	Ensemble des segments utilisés pour l'approximation linéaire par morceaux, indice $b \varepsilon B$.

Variables

Variables continues ≥ 0

$VCU_{g,l,t}$	Coûts directs (journaliers) de production de la pâte g sur la ligne de production l au cours de la période de temps t.
$\lambda_{a,g,l,t}$	Pourcentage du point extrême a qui est utilisé pour l'interpolation linéaire des coûts directs de production pour la pâte g, sur la ligne de production l au cours de la période de temps t.

$DeltaPprod_{g,l,t}$ Quantité de pâte g (journalière) qui doit être débitée de la production totale de la ligne l au temps t, étant donné les transitions et les arrêts.

Variables Binaires

$\Omega_{b,g,l,t}$ Égale à 1 si le segment b est sélectionné pour le taux production de pâte g sur la ligne l au cours de la période de temps t; autrement, égale à 0.

Paramètres

$PtProd_{g,l,a}$ Taux de production de pâte g sur la ligne l correspondant au point extrême a.

$PtCU_{g,l,a}$ Coûts directs (journaliers) de production pour le grade g sur la ligne l étant donné le taux de production correspondant au point extrême a.

Modifications à la formulation

Contraintes

Production de pâte à l'usine

Tel que montré à la Section 4.5.1.2, l'approche de modélisation des coûts axée sur les opérations peut être utilisée pour calculer les coûts en fonction des conditions d'opération, adaptées selon l'intensité de production. Ces structures de coûts non-linéaires ont été incorporées à la formulation originale du modèle de planification de niveau 2 à l'aide de la technique d'approximation linéaire par morceaux (illustrée à la Figure 1).

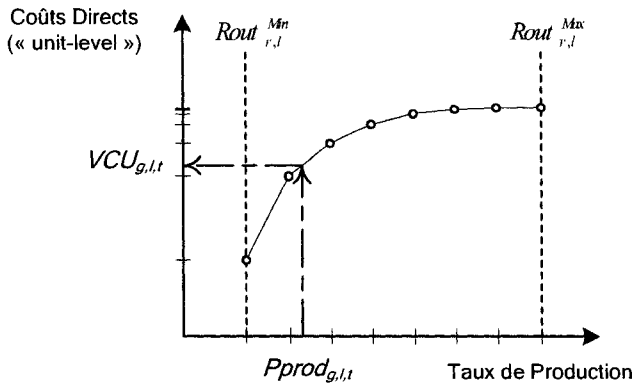


Figure 1: Approximation linéaire par morceaux des structures de coûts, en fonction du taux de production.

Tout d'abord, les contraintes (1) à (6) ont dû être ajoutées à la formulation afin d'approximer les fonctions de coûts. L'équation (1) permet de sélectionner quel intervalle sera utilisé afin de déterminer les coûts de production appropriés. En fait, les $\lambda_{a,g,l,t}$ requis sont activés dépendamment de la valeur de la variable décisionnelle $Pprod_{g,l,t}$. Les mêmes $\lambda_{a,g,l,t}$ sont aussi utilisés, à l'équation (2), pour calculer par interpolation linéaire les coûts de production $VCU_{g,l,t}$.

$$Pprod_{g,l,t} = \sum_a \left(\lambda_{a,g,l,t} \cdot Pt\Pr od_{l,g,a}\right) \quad \forall g,l,t \tag{1}$$

$$VCU_{g,l,t} = \sum_a \left(\lambda_{a,g,l,t} \cdot PtCU_{l,g,a}\right) \quad \forall g,l,t \tag{2}$$

Les équations (3) et (4) assurent respectivement que la combinaison linéaire des points extrêmes activés soit égale à 1 et que seulement un intervalle soit sélectionné. Dans les deux cas, si la variable $v_{r,l,t}$ est égale à 0 (i.e. il n'y a pas de production de pâte g à partir de la recette r sur la ligne l au temps t) alors aucun segment ne peut être sélectionné et $VCU_{g,l,t} = 0$.

$$\sum_a \lambda_{a,g,l,t} + \sum_{r|rg} \left(1 - v_{r,l,t}\right) = 1 \quad \forall g,l,t \tag{3}$$

$$\sum_b \Omega_{b,g,l,t} + \sum_{r|rg} \left(1 - v_{r,l,t}\right) = 1 \quad \forall g,l,t \tag{4}$$

En outre, la contrainte (5) est utilisée pour activer les points $\lambda_{a,g,l,t}$ extrêmes correspondant au segment choisi $\Omega_{b,g,l,t}$. L'inégalité (6) assure que toutes les valeurs de $\lambda_{a,g,l,t}$ soient des pourcentages.

$$\lambda_{a,g,l,t} \leq \sum_{b=a,a<|a|} \Omega_{b,g,l,t} + \sum_{b=a-1,a>1} \Omega_{b,g,l,t} = 1 \quad \forall a,g,l,t \tag{5}$$

$$\lambda_{a,g,l,t} \leq 1 \quad \forall a,g,l,t \tag{6}$$

Il faut aussi noter que l'équation (7), dans la formulation originale du modèle de planification de niveau 2, doit être remplacée par les équations (8) et (9). En fait, l'équation (7), qui tient compte directement de la diminution de la production journalière due aux transitions et arrêts temporaires de production, n'assure pas nécessairement que $Pprod_{g,l,t}$ soit incluse dans la plage des taux de production possibles (i.e. si il y a des transitions et/ou des arrêts, il se peut que $Pprod_{g,l,t} < Rout_{r,l}^{Min}$). Pour cette raison, l'équation (8) assure, dans un premier temps, que les taux de production soient respectés. Dans un deuxième temps, l'équation (9) a été introduite afin de déterminer la quantité de pâte $DeltaPprod_{g,l,t}$ qui doit être débitée de la production totale $Pprod_{g,l,t}$ et ce, afin de tenir compte des transitions et arrêts possibles à chaque journée.

$$\begin{aligned}
&\sum_{r|rg}\left[v_{r,l,t} \cdot Rout_{r,l}^{Min} \cdot \left(1 - StopS_{l,t}/24\right)\right] - \sum_{r|rg}\sum_{r',r'\neq r}\left[Rout_{r,l}^{Min} \cdot \left(\frac{\theta_{l,r',r} \cdot b_{r',r,l,t}}{24}\right)\right] \\
&\leq Pprod_{g,l,t} \leq \\
&\sum_{r|rg}\left[v_{r,l,t} \cdot Rout_{r,l}^{Max} \cdot \left(1 - StopS_{l,t}/24\right)\right] - \sum_{r|rg}\sum_{r',r'\neq r}\left[Rout_{r,l}^{Max} \cdot \left(\frac{\theta_{l,r',r} \cdot b_{r',r,l,t}}{24}\right)\right] \forall g,l,t
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\sum_{r|rg}\left(v_{r,l,t} \cdot Rout_{r,l}^{Min}\right) \leq Pprod_{g,l,t} \leq \sum_{r|rg}\left(v_{r,l,t} \cdot Rout_{r,l}^{Max}\right) \forall g,l,t \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
&deltaPprod_{g,l,t} = \\
&\sum_{r|rg}\left[v_{r,l,t} \cdot Rout_{r,l} \cdot \left(\frac{StopS_{l,t}}{24}\right)\right] + \sum_{r|rg}\sum_{r',r'\neq r}\left[Rout_{r,l} \cdot \left(\frac{\theta_{l,r',r} \cdot b_{r',r,l,t}}{24}\right)\right] \forall g,l,t
\end{aligned} \tag{9}$$

Contraintes liées à la demande

Afin de tenir compte de la nouvelle variable $DeltaPprod_{g,l,t}$, les équations originales (10) et (11), qui tiennent compte de la demande interne et externe de pâte, ont dû être modifiées elles aussi. À la place, les nouvelles équations (12) et (13) ont été considérées. Il est à noter que, dans ces dernières, la production nette disponible est donnée par $(Pprod_{g,l,t} - DeltaPprod_{g,l,t})$.

$$Pprod_{g,l,t} - PprodExternal_{g,l,t} = DemandInternal_{g,t} \quad \forall g, l = 1, t \tag{10}$$

$$Pprod_{g,l,t} = PprodExternal_{g,l,t} \quad \forall g, l = 2, t \tag{11}$$

$$\begin{aligned} &Pprod_{g,l,t} - deltaPprod_{g,l,t} - PprodExternal_{g,l,t} \\ &= DemandInternal_{g,t} \quad \forall g, l = 1, t \end{aligned} \tag{12}$$

$$Pprod_{g,l,t} - deltaPprod_{g,l,t} = PprodExternal_{g,l,t} \quad \forall g, l = 2, t \tag{13}$$

<u>Fonction Objectif</u>

Les coûts directs de production sont, dans la formulation originale du modèle de planification de niveau 2, calculés par l'équation (14). Pour l'approche axée sur les marges, puisque les coûts directs évoluent en fonction de l'intensité de production, ce calcul a dû être adapté (voir équation (15)). Dans ce cas, il est important de souligner que $VCU_{g,l,t}$ donne les coûts journaliers en fonction du taux de production choisi (voir Figure 1) et que $(CU_{g,l} \cdot DeltaPprod_{g,l,t})$ estime la portion de ces coûts qui doit être créditée si une transition ou un arrêt survient au cours d'une journée de production.

$$-\sum_t \sum_l \sum_g Pprod_{g,l,t} CU_{g,l} \tag{14}$$

$$-\sum_t \sum_l \sum_g VCU_{g,l,t} + \sum_t \sum_l \sum_g \left(CU_{g,l} \cdot DeltaPprod_{g,l,t}\right) \tag{15}$$

ANNEXE K

EXTENSIONS AU MODÈLE DE PLANIFICATION OPÉRATIONNELLE DE LA SC – SÉLECTION DES SCÉNARIOS DE RECETTES

Mise en contexte

Les résultats présentés à la Section 4.5 démontrent que, contrairement aux pratiques de gestion « centrée sur la production » et basée sur les recettes, l'utilisation pour la prise de décisions d'affaires d'informations plus précises sur la production facilite l'application de stratégies axées sur les marges. Celles-ci visent à mieux exploiter la capacité des procédés dans le contexte de la SC. Plus particulièrement, une des deux stratégies potentielles présentées consistait en l'exploitation de la flexibilité des opérations à l'usine afin de soutenir des stratégies d'approvisionnement en fibre plus rentables (voir Section 4.5.2). Dans ce cas, la sélection des recettes de production (i.e. des ratios de copeaux utilisés) est incorporée comme variable décisionnelle supplémentaire dans le problème de planification visant à assurer une meilleure adéquation entre l'offre et les besoins en fibre de l'usine.

Pour cette démonstration, le modèle de planification des campagnes de production et d'ordonnancement des commandes présenté à l'Annexe E a dû être adapté afin de permettre le choix du scénario de recette le plus approprié. Cette annexe résume les principaux changements qui ont été effectués à la formulation initiale.

Notation additionnelle

Ensemble et indice

F Ensemble des scénarios de recette considérés, indice $f \varepsilon F$.

Variables

Variable continue ≥ 0

$PSprod_{f,g,l,t}$ Quantité de pâte g produite à partir du scénario de recette f sur la ligne de production l au cours de la période de temps t.

Variable binaire

$yvr_{f,r,l,t}$ Égale à 1 si le scenario f, associé à la recette r, est sélectionné sur la ligne de production l au cours de la période de temps t; autrement, égale à 0.

Paramètres

M	Un grand nombre.

Production de pâte

$Rin_{l,r,e,f}$	Ratio (en %) d'alimentation en copeaux d'essence e si le scénario f, associé à la recette r, est sélectionné sur la ligne de production l.

Coût

$CUS_{g,l,f}$	Coûts de production direct si la pâte g est produite à partir du scénario de recette f sur la ligne de production l.

Modifications à la formulation

Contraintes

Production de pâte à l'usine

Pour l'approche axée sur les marges, les ratios d'alimentation en copeaux (pour chaque essence de bois) ne sont pas fixés pour un grade (recette) de pâte donné mais plutôt, calculés à partir des scénarios de recette sélectionnés ($Rin_{l,r,e,f}$). Pour cette raison, l'équation (1) a été remplacée par l'équation (2) qui assure l'intégration des scénarios de recette pour le calcul de la consommation en fibre.

$$ConsumpE_{e,l,t} = FConv \cdot \sum_{r} \sum_{g|rg} \left\{ \frac{Pprod_{g,l,t} \cdot Rin_{l,r,e}}{Nprod_{r,l}} \right\} \quad \forall e,l,t \tag{1}$$

$$ConsumpE_{e,l,t} = FConv \cdot \sum_{f} \sum_{r} \sum_{g|rg} \left\{ \frac{PSprod_{f,g,l,t} \cdot Rin_{l,r,e,f}}{Nprod_{r,l}} \right\} \quad \forall e,l,t \tag{2}$$

Aussi, les trois contraintes suivantes ont dû être ajoutées. Tout d'abord, l'équation (3) assure que la quantité de pâte g qui doit être produite correspond bel et bien à la somme des quantités produites à partir de chacun des scénarios de recette. Quant à elle, l'inégalité (4) fait en sorte que la production de pâte à partir d'un scénario de recette donné ne peut se faire que si ce scénario est sélectionné. Comme on peut le voir, si $yvr_{f,r,l,t} = 0$ alors la production $PSprod_{f,g,l,t}$ correspondante est aussi nulle. Enfin, l'équation (5) garantit qu'un seul scénario de recette soit sélectionné pour une période t

donné (puisque $a_{r,l,t} \leq 1 \ \forall \ r, \ l, \ t$) et ce, seulement si il est nécessaire de produire la recette r pour cette période (i.e. $a_{r,l,t} = 1$).

$$\sum_{f} PSprod_{f,g,l,t} = Pprod_{g,l,t} \quad \forall g,l,t \tag{3}$$

$$\sum_{g|rg} PSprod_{f,g,l,t} \leq yvr_{f,r,l,t} \cdot M \quad \forall f,r,l,t \tag{4}$$

$$\sum_{f} yvr_{f,r,l,t} = a_{r,l,t} \quad \forall r,l,t \tag{5}$$

Fonction Objectif

Les coûts directs de production sont, dans la formulation originale du modèle de planification de niveau 2, calculés par l'équation (6) où les coûts par tonne sont constants pour un même grade de pâte. Pour l'approche axée sur les marges, puisque les coûts de production évoluent en fonction des proportions utilisées de copeaux d'érable, de bouleau et de mix HW, la structure des coûts de production doit être adaptée en fonction du scénario de recette sélectionné (voir équation (7)). Dans ce cas, $CUS_{g,l,f}$ est obtenu à partir des informations données par la modélisation des coûts axée sur les opérations. Enfin, il faut souligner qu'il a été assumé que les coûts des transitions, d'un grade à l'autre, n'étaient pas affectés par les scénarios de recette. Par conséquent, les mêmes coûts par lot que ceux utilisées dans le modèle initial ont été utilisés.

$$-\sum_{t}\sum_{l}\sum_{g} Pprod_{g,l,t} CU_{g,l} \tag{6}$$

$$-\sum_{t}\sum_{f}\sum_{l}\sum_{g} PSprod_{f,g,l,t} CUS_{g,l,f} \tag{7}$$