

Titre: Cadre méthodologique d'identification de stratégies préférentielles
Title: de bioraffinage forestier par une approche stage-and-gate

Auteur: Cédric Dikko Téguia
Author:

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dikko Téguia, C. (2017). Cadre méthodologique d'identification de stratégies
Citation: préférentielles de bioraffinage forestier par une approche stage-and-gate [Thèse
de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/2501/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2501/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Sophie D'Amours, & Paul R. Stuart
Advisors:

Programme: Génie chimique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CADRE MÉTHODOLOGIQUE D'IDENTIFICATION DE STRATÉGIES
PRÉFÉRENTIELLES DE BIORAFFINAGE FORESTIER PAR UNE
APPROCHE STAGE-AND-GATE

CÉDRIC DIFFO TÉGUIA

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR
(GÉNIE CHIMIQUE)

MARS 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

CADRE MÉTHODOLOGIQUE D'IDENTIFICATION DE STRATÉGIES
PRÉFÉRENTIELLES DE BIORAFFINAGE FORESTIER
PAR UNE APPROCHE STAGE-AND-GATE

présentée par : DIFFO TÉGUIA Cédric

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. PERRIER Michel, Ph. D., président

M. STUART Paul, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme D'AMOURS Sophie, Ph. D., membre et codirectrice de recherche

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph. D., membre

M. FAIRBANK Martin, Ph. D., membre

DÉDICACE

*À mes parents, Georges et Justine, à qui je dois tout,
en particulier mon inspiration et ma force.*

*À mes frères, Bryan, David et Samuel, qui me procurent
une perpétuelle envie de me dépasser.*

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui de près ou de loin ont supporté mon projet de doctorat, et ont contribué à l'enrichissement intellectuel et personnel qu'il constitue pour moi.

Mes premiers remerciements s'adressent au Professeur Paul Stuart, mon directeur de recherche, qui m'a offert l'opportunité de concrétiser un rêve d'enfance, et qui a surtout fait preuve d'une grande confiance à mon égard. Merci d'être un excellent mentor, et de m'avoir prodigué tant de conseils, autant académiques, professionnels que personnels, au fil des années.

Je remercie également le Professeur Sophie D'Amours, ma co-directrice de recherche, pour le support qu'elle m'a procuré, et pour les remises en question qu'elle m'a inspirées.

Ma gratitude va au Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et au Réseau VCO pour leur soutien financier qui aura été essentiel à la réalisation de ces travaux.

I would like to thank the industrial partner companies for supporting the realization of my research, and for their financial as well as in-kind contributions to my project.

I would like to express my appreciation to representatives of the industrial partner companies that participated in MCDM panels, especially Rod A., Eddie P., Jerrett D., and Tom B. Your precious time and feedback have been greatly appreciated.

I have an infinite gratitude for David P., who supported and supervised me during my internship at the case study mill. I will never forget your hospitality and kindness ; thank you for four beautiful months in the Rockies.

I would also like to thank Mike R., Ray M., and Stephen W., whose expertise and mostly kindness truly enriched my internship in Vancouver.

J'aimerais remercier le Dr. Marzouk Benali pour avoir accepté de prendre part aux nombreux panels MCDM qui ont jalonné mon projet. Je vous remercie grandement pour votre disponibilité, vos conseils, votre ouverture d'esprit, et votre faculté à amener les personnes autour de vous à progresser.

J'adresse un merci spécial à tous mes collègues de la Chaire, passés comme présents, qui m'ont encouragé, instruit, corrigé, et inspiré. Je pense particulièrement à Dieudonné qui plus qu'un collègue est un frère, à Virginie, Jean-Christophe, José, Shabnam, Banafsheh, Pierre Olivier, Stéphanie, Fred, et Nima ; et à tous les autres, qui ont fait de ces années un torrent de souvenirs inoubliables.

Un merci chaleureux à mes amis, en particulier à Nino, Bakary, Claude-Hervé, Idrissa, Yannov, et Alex. Votre soutien sous toutes ses formes, vos piques, ainsi que les moments de détente passés en votre compagnie m'ont réellement permis de tenir bon et de traverser certaines périodes difficiles. Je vous en suis grandement reconnaissant.

Un merci unique à mes parents et à mes frères. Merci d'être le roc et la source intarissable de motivation que vous avez toujours été. Rien n'a autant de valeur que votre amour, vos encouragements et vos prières, sans lesquels je n'en serais sûrement pas là.

Un merci infini enfin à Yanne, mon amie, ma co-équipière, mon fidèle soutien. Merci pour ton écoute, merci pour tes paroles, et merci d'avoir toujours cru en moi.

RÉSUMÉ

Les réalités entourant le secteur des produits forestiers ont favorisé la mise en place de stratégies de diversification de produits et l'émergence du bioraffinage, principalement dans les compagnies papetières qui ont vu leur compétitivité être sévèrement affaiblie dans la dernière décennie. Au développement du bioraffinage s'associent indéniablement de nombreux défis, lesquels sont reliés aux diverses perspectives de risques technologique, économique, et stratégique qu'implique la transformation du modèle d'affaires des compagnies concernées.

Une des difficultés majeures dans ce contexte réside en la sélection des produits sur lesquels bâtir la transformation envisagée, étape que rend complexe la vaste panoplie de possibilités qu'offrent la biomasse végétale et les technologies de conversion existantes. Le présent projet de recherche s'est penché sur cette problématique avec pour objectif principal le développement d'une approche de conception permettant de considérer de manière systématique différentes perspectives de risque auxquelles une compagnie forestière pourrait faire face, dans le but d'identifier les stratégies qui selon son contexte, peuvent être qualifiées de préférentielles.

La revue des notions relatives à la conception et au développement de nouveaux produits dans la littérature a permis de recommander les processus de type stage-and-gate pour le développement des alternatives de bioraffinage en raison de l'approche multidisciplinaire d'atténuation du risque qui y est intrinsèque, moyennant toutefois une adaptation pour l'évaluation de portefeuilles multi-produits. Dans la présente thèse, cette adaptation s'est concentrée sur les étapes initiatrices du processus d'innovation. Elle a porté sur la considération d'approches d'implantation séquentielle des portefeuilles de produits de bioraffinage, et sur la définition de critères d'évaluation en vue de l'amélioration de la prise de décision.

Les travaux qui ont supporté le développement de l'approche méthodologique ont été axés autour de deux études de cas, la première examinant l'implantation de stratégies de bioraffinage basé sur la lignine dans une compagnie forestière nord-américaine, et la seconde couvrant le développement de critères représentatifs des perspectives de marché et de compétitivité dans le contexte du bioraffinage basé sur le triticales.

En a résulté une méthodologie constituée de deux *stages* et deux *gates*, qui correspond à une évolution des *stages* « Découverte » et « Définition du projet », dans le processus *stage-and-gate* de deuxième génération typique.

La première étape met l'emphasis sur la clarification des objectifs stratégiques de la compagnie forestière relativement au bioraffinage, notamment de son envergure et de son importance dans la vision à long-terme vis-à-vis de l'activité principale de la compagnie. L'interprétation des motivations et barrières qui en découlent oriente la génération des alternatives à considérer, mais permet principalement d'établir les critères à employer au premier jalon de triage. Il a été démontré que leur utilisation avec des seuils de préférence stricte permet de réduire considérablement l'ensemble d'alternatives initialement défini à un nombre gérable pour les étapes subséquentes de développement.

Aux alternatives retenues sont ensuite associés des plans d'implantation par phases, lesquels sont définis en fonction du positionnement sur la chaîne de valeur associée aux produits ciblés dans chacune des phases, et du mode de développement en intégration verticale ou horizontale qui relie les phases. La comparaison des interprétations faites des critères d'évaluation découlant des analyses de la première étude de cas – pour laquelle des combinaisons procédé-produits-plan d'implantation ont été systématiquement définies – et de ceux de la seconde étude – pour laquelle uniquement des combinaisons procédé-produits ont été considérées – a permis de mettre en relief les améliorations qu'apporte la considération d'une approche d'implantation séquentielle dans le processus *stage-and-gate*, notamment quant à l'appréciation des sources majeures de risque associés aux variantes des portefeuilles de produits lors de leur mise en place.

Les analyses menées selon les perspectives technico-économique, environnementale et de compétitivité donnent ensuite lieu à la définition de critères représentatifs des potentiels de création de valeur et d'atténuation de risque associés à chacune des stratégies. L'emploi d'une méthode de prise de décision à critères multiples (MCDM) est recommandé à cet effet pour faciliter l'agrégation des préférences des acteurs de décision en considérant ces diverses perspectives.

Mis en commun, les résultats des activités de prise de décision dans les deux études de cas ont relevé la place prépondérante des critères de marché et de compétitivité comme facteurs majeurs de la prise de décision relative aux stratégies de bioraffinage. En attestent la pondération qu'ils ont obtenue des acteurs de décision, et leur rôle pour la distinction des stratégies ayant des scores similaires, en comparaison aux critères des perspectives économique et environnementale.

La mise en application au second jalon de triage de la méthodologie de l'ensemble de critères relatifs à la création de valeur et au risque permet d'établir des préférences entre les stratégies de manière effective. La méthodologie développée dans la présente thèse permet ainsi d'identifier de manière systématique un groupe de stratégies qui semblent être les plus prometteuses compte tenu du contexte et des préférences des acteurs de décision de la compagnie forestière. Ces stratégies sont classées préférentielles, et admises dans les étapes subséquentes du processus de conception. La méthodologie permet également d'identifier un second ensemble incluant des stratégies de recours aux stratégies préférentielles, qui selon l'évolution du contexte d'affaires pourraient être réévaluées et éventuellement être intégrées au premier groupe.

ABSTRACT

The business environment surrounding the forest products sector has favored the implementation of product diversification strategies and the emergence of biorefining, mainly in pulp and paper companies whose competitiveness has been severely weakened in the last decade. Developing a biorefinery undeniably implies many challenges, in link with the various technological, economic and strategic risks involved in business model transformation.

One of the most critical challenges in this context concerns the selection of products on which the transformation would be built, a step that is especially complex due to the wide range of possibilities relative to vegetal biomass and to the existing conversion technologies. The main objective of this research project was to develop a product design approach that systematically considers the different perspectives of risk that a forest products company can face, in order to identify strategies that can be characterized as preferred considering the specific context of the company.

The review of concepts relative to product design and to new product development in the literature has led to recommending stage-and-gate processes for the development of biorefinery alternatives, due to the multidisciplinary risk mitigation approach that is intrinsic to those processes. Nevertheless, an adaptation must be defined for biorefinery product portfolios, considering limitations of stage-and-gate processes in regards to the development of portfolios that include multiple products. In this thesis, that adaptation focused on the fuzzy front-end (FFE) section of the innovation process. It consisted of the consideration of phased-implementation approaches for biorefinery product portfolios and of defining refined assessment criteria to improve decision-making.

Research activities that supported the development of the methodological approach were defined around two case studies, the first examining the implementation of lignin-based biorefinery strategies in a North American forest company, while the second assessed the development of criteria representative of market and competitiveness perspectives in the context of a triticale-based biorefinery.

These efforts resulted in a methodology consisting of two stages and two gates, which correspond to an evolution of the "Discovery" and "Scoping" stages in the typical second-generation stage-and-gate process.

The first step aims at clarifying the company's strategic objectives considering the biorefinery, including mainly its scope and role in the long-term vision in regards to the core business activity. The interpretation of drivers and barriers follows ; it orients the generation of biorefinery alternatives to be considered, besides enabling to establish the set of criteria for the first triage gate. It has been shown that using these criteria as showstopper (with strict preference thresholds) leads to significantly reducing the initial set of possible alternatives to a manageable number, that is practical to be assessed in subsequent stages.

Following the early triage, phased-implementation plans are defined for retained alternatives, based on the positioning on the value chains of targeted products in each phase, and on the vertical or horizontal integration approach that would shape the transition between phases. A comparison between the interpretations established by decision panels of criteria deriving from analyses in the first case study – for which process-products-implementation plan combinations were systematically defined – and those of the second study – for which only process-products combinations were considered – highlighted improvements in the stage-and-gate process resulting from the consideration of a sequential implementation approach. This mainly concerns the assessment of major sources of risk associated with product portfolios variants at different steps of their implementation.

Assessment studies carried out under techno-economic, environmental and competitiveness perspectives then result in the definition of criteria representing value proposal and potential risks associated with each strategy. The use of a multi-criteria decision-making (MCDM) method is recommended, as it facilitates the aggregation of decision-maker preferences while considering these various perspectives.

When combined, the results of the decision-making activities in the two case studies showed the overriding importance of market and competitiveness criteria as decision factors in the evaluation of biorefinery strategies. This has been made evident by the importance weights that decision-makers attributed to that category and by their role in distinguishing strategies that had similar scores, in comparison with criteria representing the techno-economic and environmental perspectives.

Employing the entire set of value- and risk-related criteria at the second gate of the methodology enables to effectively establish preferences between the strategies. The methodology developed in this thesis thus results in the systematic identification of a group that includes the most promising strategies given the context and the preferences of decision-makers within the forest products company. These strategies are characterized as preferred and are therefore approved to proceed to subsequent stages of the design process. The methodology also leads to identifying a second group of strategies, which are considered as alternative to the preferred ones. Given changes in the business environment, those might be re-evaluated and eventually be included in the first group.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES FIGURES.....	xvi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xviii
LISTE DES ANNEXES.....	xx
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte et problématique	1
1.2 Objectifs	3
1.3 Plan général de la thèse	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
2.1 Approches de conception et développement de nouveaux produits	5
2.1.1 Types de nouveaux produits	5
2.1.2 Processus de conception de produit chimique	8
2.1.3 Approche Stage-Gate® de développement de nouveaux produits	14
2.1.4 Analyse critique	30
2.2 Définition du portefeuille de produits de bioraffinage.....	31
2.2.1 Approches d'orientation technico-économique	32
2.2.2 Approches d'orientation stratégique.....	33

2.2.3	Analyse critique	37
2.3	Évaluation et prise de décision relatives aux nouveaux produits.....	38
2.3.1	Revue des méthodes et outils dans la littérature	39
2.3.2	Choix des méthodes et bonnes pratiques de gestion du portefeuille	47
2.3.3	Méthodes, outils, et critères de sélection dans les approches de NPD	49
2.3.4	Analyse critique	56
2.4	Synthèse de la revue de la littérature.....	57
2.4.1	Lacunes dans le corps des connaissances	58
2.4.2	Hypothèses.....	60
CHAPITRE 3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....		61
3.1	Méthodologie du projet de recherche.....	61
3.1.1	Génération et triage des alternatives de bioraffinage	64
3.1.2	Intégration et validation des modifications au processus stage-and-gate.....	67
3.2	Introduction des études de cas	79
3.2.1	Développement du bioraffinage dans une compagnie forestière.....	79
3.2.2	Étude des possibilités de bioraffinage du triticales	81
CHAPITRE 4 SYNTHÈSE DES TRAVAUX.....		83
4.1	Présentation des publications	83
4.2	Génération et triage des alternatives pour une implantation en retrofit.....	86
4.2.1	Interprétation et implications des motivations et barrières.....	86
4.2.2	Génération des alternatives de bioraffinage	89
4.2.3	Triage de l'ensemble initial d'alternatives	92
4.3	Définition des stratégies de bioraffinage et des critères d'évaluation.....	94
4.3.1	Approche par phases et plans d'implantation séquentielle.....	94

4.3.2	Analyse de l'intégration au procédé en place	100
4.3.3	Considérations pour les estimations des coûts et des revenus	102
4.3.4	Indicateurs technico-économiques.....	105
4.3.5	Établissement de l'ensemble de critères pour l'atelier MCDM.....	108
4.4	Identification des stratégies préférentielles de bioraffinage de la lignine.....	112
4.5	Évaluation d'alternatives de développement d'une bioraffinerie greenfield basée sur le triticale.....	116
4.5.1	Combinaisons procédé-produits	116
4.5.2	Définition des critères de marché et de compétitivité	119
4.5.3	Réduction de l'ensemble de critères de marché et de compétitivité.....	126
4.5.4	Résultats de l'atelier MCDM multi-perspectives	129
CHAPITRE 5	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	135
5.1	Utilisation des motivations et barrières de la compagnie pour le triage au Gate 1	136
5.2	Considération d'approches d'implantation par phases des stratégies de bioraffinage dans le processus stage-and-gate	137
5.3	Identification des stratégies préférentielles au Gate 2.....	139
5.3.1	Établissement de préférences entre les stratégies	139
5.3.2	Place des critères de marché et de compétitivité	141
5.4	Méthodologie d'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage	142
CHAPITRE 6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	146
6.1	Contributions au corps des connaissances	147
6.2	Orientation des travaux futurs.....	148
BIBLIOGRAPHIE	149
ANNEXES	169

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Techniques et outils d'évaluation et sélection de projets	40
Tableau 2.2: Critères rigides recommandés pour les Gates 1, 2 et 3	51
Tableau 2.3: Top six des critères employés aux Gates 1, 2 et 3 dans l'industrie.....	52
Tableau 2.4: Critères d'évaluation des projets de R&D sur les biocarburants, par le NREL	52
Tableau 2.5: Critères employés pour le triage des dérivés de sucres et de gaz de synthèse	53
Tableau 2.6: Critères MCDM utilisés pour l'évaluation des options de bioraffinage	55
Tableau 4.1: Base des coûts unitaires de la matière première associée aux stratégies de bioraffinage de la lignine.....	104
Tableau 4.2: Base des prix des produits associés aux stratégies de bioraffinage de la lignine....	105
Tableau 4.3: Indicateurs technico-économiques relatifs aux stratégies de bioraffinage de la lignine.....	107
Tableau 4.4: Description de l'ensemble de critères pour l'évaluation des stratégies de bioraffinage de la lignine	110
Tableau 4.5: Comparaison des variantes de procédé et des cas de base de l'étude de cas CTBI	118
Tableau 4.6: Description des critères de compétitivité pour l'étude de cas CTBI.....	122
Tableau 4.7: Résultats de l'évaluation des critères de compétitivité pour l'étude de cas CTBI..	125
Tableau 4.8: Classements des alternatives dans les ateliers MCDM préliminaires	129
Tableau 4.9: Description des critères de l'atelier MCDM multi-perspectives.....	131

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Classes de produits chimiques	7
Figure 2.2 Variante de <i>maison de la qualité</i> , méthode QFD (tiré de [34])	10
Figure 2.3 La pyramide du produit chimique (adapté de [16])	11
Figure 2.4 Vue d'ensemble du processus Stage-Gate® typique (adapté de [59])	16
Figure 2.5 Objectifs et activités des <i>stages</i> dans le processus Stage-Gate® typique.....	17
Figure 2.6 Activités principales du Stage 2, Proposition d'affaires (adapté de [63])	19
Figure 2.7 Composantes d'un modèle d'affaires (adapté de [73])	20
Figure 2.8 Approche de définition de la stratégie d'innovation (adapté de [91])	24
Figure 2.9 Sélection et évolution temporelle des stratégies de développement (adapté de [105]) ..	28
Figure 2.10 Phases typiques de l'implantation séquentielle du bioraffinage (adapté de [130])	35
Figure 2.11 Approche <i>entonnoir</i> , de sélection du portefeuille de bioraffinage (adapté de [132]) ..	36
Figure 3.1 Vue d'ensemble de la méthodologie du projet de recherche	62
Figure 3.2 Vue détaillée de la méthodologie du projet de recherche	63
Figure 3.3 Section 1 de la méthodologie du projet de recherche	65
Figure 3.4 Sections 2 et 3 de la méthodologie du projet de recherche.....	68
Figure 3.5 Méthodologie pour l'établissement de l'ensemble de critères pour le panel MCDM ..	72
Figure 4.1 Liens entre les publications, et avec les hypothèses de recherche	84
Figure 4.2 Schéma bloc simplifié de la situation de départ considérée pour l'étude de cas	97
Figure 4.3 Description et phases d'implantation des stratégies de bioraffinage de la lignine	99
Figure 4.4 Configuration hivernale du réseau énergétique de l'usine.....	101
Figure 4.5 Pondération des critères d'évaluation des stratégies de bioraffinage de la lignine	114
Figure 4.6 Classement des stratégies de bioraffinage de la lignine	116

Figure 4.7 Cas de base des trois plateformes de l'étude de cas CTBI	119
Figure 4.8 Pondération des critères – Atelier MCDM de marché et compétitivité.....	126
Figure 4.9 Classement des alternatives – Atelier MCDM de marché et compétitivité	128
Figure 4.10 Distribution du poids des critères – MCDM multi-perspectives	133
Figure 4.11 Classement des alternatives de la plateforme PLA – MCDM multi-perspectives.....	134
Figure 5.1 Approche stage-and-gate d'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage dans le contexte d'une compagnie forestière	143

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse de cycle de vie
AHP	Méthode de hiérarchie multicritère (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
APFC	Association des produits forestiers du Canada
BAIIA	Bénéfice avant intérêts, impôts et amortissements
BCG	Boston Consulting Group
CTBI	Canadian Triticale Biorefinery Initiative
DDS	Drèche de distillerie avec solubles
FFE	Section en amont du processus d'innovation, qui est généralement peu structurée (<i>Fuzzy Front-End of Innovation</i>)
GES	Gaz à effet de serre
MAUT	Théorie d'utilité multi-attributs (<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>)
MCDA	Analyse décisionnelle multicritères (<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>)
MCDM	Prise de décision à critères multiples (<i>Multi-Criteria Decision Making</i>)
NPD	Développement de nouveau produit (<i>New Product Development</i>)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PDMA	Product Development and Management Association
PIC	Charte d'innovation de produit (<i>Product Innovation Charter</i>)
PLA	Acide polylactique (<i>Polylactic Acid</i>)
QFD	Déploiement de la fonction qualité (<i>Quality Function Deployment</i>)
SFS	Saccharification et fermentation simultanées
SWOT	Forces, faiblesses, opportunités, menaces (<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, and threats</i>)
TPS	Amidon thermoplastique (<i>Thermoplastic Starch</i>)

TRI	Taux de rentabilité interne
VAN	Valeur actuelle nette
VOC	Avis du consommateur (<i>Voice Of the Customer</i>)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Article 1: Analysis of Economically-Viable Lignin-Based Biorefinery Strategies Implemented Within a Kraft Pulp Mill	169
Annexe B – Article 2: Decision-Making Process for the Identification of Preferred Lignin-Based Biorefinery Strategies.....	196
Annexe C – Article 3: Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Market Competitive Analysis for Business Model Development	219
Annexe D – Article 4: Adapting Stage-and-Gate Methodology for Retrofit Implementation of the Forest Biorefinery	242
Annexe E – Article 5 – Chapitre de livre: Strategic Transformation of the Forest Industry Value Chain	273

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

L'industrie forestière occupe une place importante dans l'économie canadienne. La richesse du boisé canadien tant en quantité qu'en variété d'espèces a longtemps assuré sa compétitivité, faisant du Canada un des leaders mondiaux de ce secteur [1,2].

Il convient cependant de reconnaître que les compagnies forestières canadiennes et nord-américaines en général éprouvent certaines difficultés à survivre face aux changements qu'a connu le marché dans les deux dernières décennies. La demande pour les produits tels que le papier journal et le papier d'impression a considérablement chuté dû aux progrès des technologies de la communication et au gain de popularité des média électroniques. Ceci ne facilite pas la tâche des compagnies nord-américaines qui doivent déjà faire face à une concurrence plus vive de producteurs émergents d'Amérique latine et d'Asie qui ont à leur avantage des conditions climatiques permettant une régénération plus rapide de la forêt et une main-d'œuvre beaucoup plus abordable. À cela s'ajoutent la cherté de l'énergie et le peu d'investissement dans les usines nord-américaines, qui se trouvent être vieillissantes et de capacité inférieure à celle de la concurrence [3-5]. Plus récemment, la crise immobilière qu'a connu le marché nord-américain entre 2006 et 2010 a entraîné une réduction majeure de la demande en matériaux de construction, période au cours de laquelle la prise de valeur du dollar canadien vis-à-vis du dollar américain n'a pas toujours rendu avantageuses les exportations.

Les coupures drastiques des coûts et les différentes opérations de fusion et acquisition n'ont pas suffi à endiguer l'affaiblissement des compagnies canadiennes. Les multiples fermetures d'usine viennent le prouver, de telles stratégies n'ont permis qu'à assurer la survie à court-terme des acteurs les plus puissants de l'industrie sans pour autant leur garantir un regain de compétitivité dans le plus long terme. Les experts soutiennent qu'une amélioration plus durable de la situation actuelle de l'industrie forestière passe par une redéfinition de son modèle d'affaires, incluant la diversification du portefeuille de produits que les compagnies proposent [4,6].

Le concept du bioraffinage s'aligne parfaitement sur cette optique. L'Agence Internationale de l'Énergie [7] définit une bioraffinerie comme étant « *la conversion durable de la biomasse en un spectre de produits commercialisables et en énergie* »¹. De la sorte, les procédés actuellement utilisés pour la conversion du bois en pâte et papier bénéficieraient d'une utilisation plus complète de la biomasse en produisant par exemple des biocarburants, des produits chimiques et/ou de l'énergie [8,9]. Dans les dernières années le secteur forestier a intensifié son exploration des différentes opportunités de bioraffinage, avec par exemple l'initiative Future Bio-pathways lancée par l'Association des Produits Forestiers du Canada (APFC) avec pour objectif de déterminer les meilleures voies pour la transformation de l'industrie [10].

Le besoin pour les compagnies forestières et papetières en particulier de rechercher de nouvelles opportunités de valorisation du bois coïncide de manière positive avec une demande grandissante pour des produits durables, faits à partir de matière première renouvelable. Les changements climatiques et la carence annoncée en certains combustibles fossiles ont favorisé le développement du bioraffinage, d'autant plus que l'industrie chimique reste sensible aux fluctuations des prix du pétrole et du gaz naturel, dont elle est encore fortement dépendante [11]. Le bioraffinage à partir de biomasse agricole, qui a initialement été privilégié, rencontre plusieurs détracteurs en raison des problèmes de concurrence qu'il soulève vis-à-vis de l'industrie alimentaire, pour l'accès aux terres arables [12]. L'utilisation des biomasses forestière et lignocellulosique permettrait aux entreprises de se rapprocher d'une certaine forme de carboneutralité, en réduisant leurs impacts environnementaux. L'occasion n'est alors que plus belle de mettre à profit le bois et les différents courants issus des procédés de production du papier.

La diversification de produits envisagée à travers l'implantation du bioraffinage implique toutefois de nombreux défis pour les compagnies forestières. Les technologies de bioraffinage sont pour la plupart encore en développement, et représentent un risque d'intégration aux usines existantes. L'investissement requis peut être substantiel selon le cas, et les compagnies sont le plus souvent réticentes à s'y engager en l'absence de subventions gouvernementales. De plus, la commercialisation des nouveaux produits requerrait de pénétrer des marchés dans lesquels les compagnies forestières ne sont pas familières, et où une concurrence déjà bien établie s'exerce.

¹ Traduction libre

L'un des plus grands défis, en amont de tous ceux cités précédemment, consiste à déterminer le(s) produit(s) à intégrer au portefeuille et la stratégie à appliquer afin de le(s) développer. Chambost [13] a d'ailleurs mis l'accent sur la sélection du portefeuille de produits comme étant une étape critique du processus de transformation du modèle d'affaires des compagnies papetières, de laquelle découlent notamment les stratégies de pénétration et de positionnement sur les nouveaux marchés, et de gestion de la chaîne logistique. La complexité de la sélection des nouveaux produits naît de la multitude de combinaisons qui peuvent être créées entre le type de biomasse utilisée, le procédé de conversion implanté, et les produits qui en résulteraient. Les procédés peuvent donner lieu à des portefeuilles à produit unique ou multi-produits, pour lesquels la stratégie d'affaires définie dépendra grandement du type de marché sur lesquels ils seront promus (commodités, spécialités, ou marchés de niche).

Les possibilités sont vastes, mais juste un nombre restreint d'entre elles, variant du contexte d'une compagnie à une autre, seront réellement fructueuses. Les entreprises ont besoin de rapidement identifier les crapauds les plus susceptibles de se transformer en prince, ce qui est peu évident pour des compagnies qui en favorisant une culture orientée sur les commodités ont peu investi en recherche et développement. La nécessité est criante de se pencher sur la question du développement de nouveaux produits et de la transformation de la stratégie d'affaires des compagnies forestières afin de les guider dans le processus d'implantation du bioraffinage.

1.2 Objectifs

L'objectif principal de cette thèse est de développer une méthodologie systématique de conception pour le développement de portefeuilles de produits qui considère différentes perspectives d'atténuation de risques et de création de valeur, et qui soit adaptée pour l'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage dans le contexte d'une compagnie forestière.

L'atteinte de cet objectif principal s'articule autour des sous-objectifs suivants :

- Développer une approche pratique qui permette d'éliminer les options non viables dans le contexte d'une compagnie forestière donnée dès les étapes initiatrices du processus de conception, et d'ainsi réduire considérablement le nombre d'alternatives envisagées.
- Définir une approche pour l'évaluation d'alternatives de bioraffinage impliquant des portefeuilles multi-produits dans les étapes initiatrices du processus de conception, tenant compte du niveau élevé d'incertitude qui y est associé.
- Définir un ensemble pratique de critères qui permette d'évaluer de manière adéquate les problématiques de marché et de compétitivité associées aux portefeuilles de produits de bioraffinage.
- Adapter le processus de prise de décision afin de permettre l'évaluation multidisciplinaire des alternatives de bioraffinage, menant à l'identification des alternatives préférentielles.

1.3 Plan général de la thèse

Outre le présent chapitre d'introduction, cette thèse comporte cinq chapitres structurés tel que suit :

- Le chapitre 2 présente une revue de la littérature jugée pertinente à la problématique sus relevée, et identifie les lacunes dans le corps des connaissances revues ainsi que les hypothèses de recherche établies à cet effet.
- Le chapitre 3 présente la méthodologie définie pour les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche, puis les études de cas qui en ont permis l'exécution.
- Le chapitre 4 effectue ensuite une synthèse de ces travaux. Y sont notamment présentées les résultats des études de cas ayant servi de base pour la validation des hypothèses énoncées.
- Le chapitre 5 présente une discussion critique des résultats obtenus et de leurs implications en lien avec l'identification des alternatives préférentielles de bioraffinage.
- Enfin, dans le chapitre 6 sont identifiées les contributions au corps des connaissances, et les possibles orientations des travaux futurs en lien avec le présent projet.

Les publications rédigées dans le cadre de ce travail sont présentées dans les annexes, soit quatre articles soumis à des revues scientifiques, et un chapitre de livre publié.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Approches de conception et développement de nouveaux produits

Les principaux axes d'intérêt relatifs à la problématique de l'implantation du bioraffinage pour la transformation stratégique des compagnies forestières sont les domaines de la conception de produit et du développement de nouveau produit (NPD New Product Development). De manière générale, Cussler et Moggridge [14] définissent la conception de produit comme « *le processus par lequel les besoins des clients sont convertis en produits commercialisables* »². Alors qu'elle est plutôt bien établie dans les autres disciplines de génie, l'intérêt pour la conception de produit plutôt que la conception de procédé dans le domaine du génie chimique est plus récent. Certains auteurs stipulent qu'elle précède la conception de procédé, d'autres qu'elle l'englobe [15] ; les frontières demeurant encore floues entre ce qui y est considéré comme étant la conception, l'ingénierie, ou le développement de produit [16]. Quoiqu'il en soit, plutôt que de clarifier les différentes nomenclatures, la présente revue portera sur les processus auxquels elles renvoient afin d'obtenir un nouveau produit. Diverses approches seront analysées dans les sections qui suivent, d'abord individuellement, puis vis-à-vis du contexte du bioraffinage.

2.1.1 Types de nouveaux produits

La conception d'un produit requiert du concepteur qu'il détermine les composantes du produit, leur agencement, le moyen de les faire interagir et la voie de production les plus adéquats à la satisfaction de besoins donnés. Plusieurs approches de conception sont présentes dans la littérature, lesquelles varient principalement selon que le produit est de type *assemblé* ou *formulé* [17].

² Traduction libre

- Les produits assemblés renvoient à ceux qui sont obtenus par la mise en commun de plusieurs composantes solides. Également qualifiés de *concrets* [18], cette catégorie inclut des produits tels que des automobiles, des imprimantes, ou encore à plus petite échelle des circuits électriques. L'accent y est mis sur l'interaction entre les composantes pour la forme physique, l'esthétique, ou les performances de l'ensemble.
- Les produits formulés renvoient quant à eux à ceux qui sont obtenus à partir d'un composé chimique unique, d'un mélange de composés chimiques associé à une recette précise, ou d'une microstructure de molécules. On peut citer à titre d'exemples les réactifs chimiques, le papier, les lotions de soin corporel, ou encore les matériaux polymères. L'emphase ici est mise sur la structure moléculaire pour l'atteinte ou l'amélioration de propriétés associées à des fonctionnalités spécifiques [19].

Lorsque l'on s'intéresse spécifiquement aux produits chimiques, deux classifications ressortent principalement. La première se base sur l'ordre de grandeur des produits synthétisés (Figure Figure 2.1.a) [14]. On parle ainsi de commodités (exemple de l'éthanol), de produits moléculaires (ex. produits pharmaceutiques), de microstructures (ex. adhésifs) et d'appareils³. Cette dernière catégorie s'assimile à de mini-procédés conçus à une échelle réduite afin d'effectuer une transformation physique ou chimique ciblée (ex. rein artificiel), d'effectuer une analyse (ex. test de glycémie), ou de procurer un service à un utilisateur spécifique (ex. emballage d'aliments antibactérien).

La deuxième classification se base quant à elle sur le type de ressources utilisées pour la synthèse des produits (Figure Figure 2.1.b) [20]. On parle alors de produits chimiques de base, de produits chimiques industriels, et de produits de consommation. Les produits chimiques de base sont obtenus de sources naturelles telles que le pétrole, le gaz naturel ou les végétaux, et servent à leur tour à la synthèse des produits chimiques industriels. Les produits de consommation sont quant à eux obtenus par la combinaison de différents produits chimiques de base et/ou de produits chimiques industriels.

³ Traduction de l'anglais *devices*

Costa et al. [16] met quelque peu en commun les deux visions en classifiant les produits chimiques en terme (1) de commodité, (2) de spécialité, (3) de produits formulés (ce terme renvoie ici essentiellement aux microstructures formées de plusieurs composés chimiques), (4) de concepts biologiques, (5) d'appareils effectuant une transformation, et (6) de produits de consommation remplissant une fonction donnée. Il ajoute également une dernière catégorie, celle des produits chimiques virtuels, faisant référence aux logiciels de simulation couramment utilisés pour la conception de procédés.

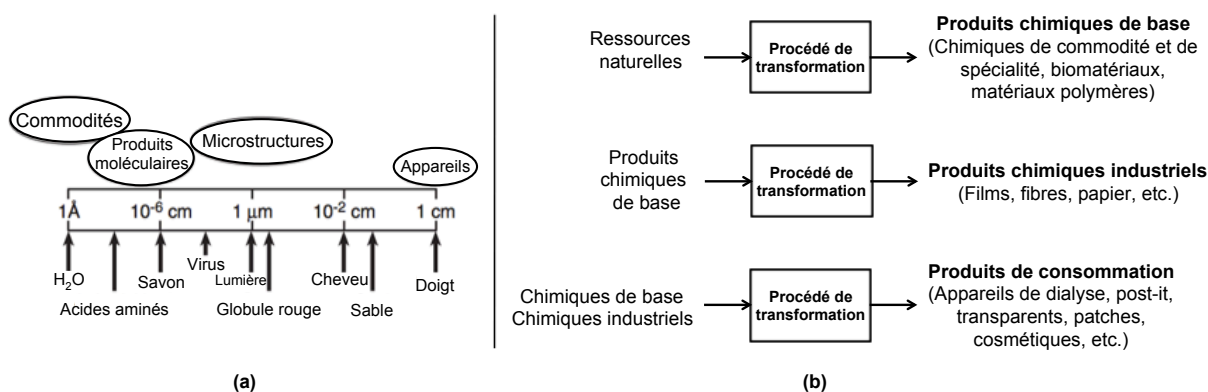


Figure 2.1 Classes de produits chimiques

En lien avec la catégorisation générale des nouveaux produits, les produits chimiques de commodités et de spécialité, les microstructures et les produits moléculaires peuvent être regroupés sous la bannière des produits formulés, tandis que les appareils et autres produits de consommation sont des produits assemblés.

Pour la suite de l'étude, l'accent sera mis sur les produits formulés. Bien que certains produits chimiques correspondent à la description du type assemblé, le domaine de la conception de produit chimique s'est principalement focalisé sur les produits formulés, laissant prioritairement la conception de produits assemblés aux disciplines voisines d'ingénierie mécanique et industrielle. Aussi, la grande majorité des produits issus de procédés de bioraffinage sont des produits formulés, une raison de plus d'y porter un intérêt particulier.

2.1.2 Processus de conception de produit chimique

De la littérature relative à la conception de produit en ingénierie chimique, il ne ressort aucune méthodologie universelle sur laquelle les auteurs s'accordent. Du fait de la variété et de la complexité des produits chimiques, des approches sont plutôt développées vis-à-vis de problèmes spécifiques aux classes de produits. L'approche en quatre étapes de Cussler et Moggridge [14], bien que généraliste, sert de base à plusieurs autres. Elle consiste en :

- L'identification des besoins qui doivent être comblés par le produit.
- La génération d'idées de produits qui pourraient satisfaire les besoins identifiés.
- La sélection de l'idée la plus prometteuse.
- Le raffinement de l'idée de produit et le développement de son procédé de fabrication.

Les déclinaisons qui existent dans la littérature résultent le plus souvent du détail de l'une ou plusieurs des étapes ci-dessus, ou de l'identification d'étapes intermédiaires entre elles. Wibowo et Ng [21] ont ainsi défini une méthodologie en cinq étapes en intégrant une étape d'identification des indicateurs de qualité des produits à concevoir, tandis que Hill [22] en définit une en six étapes pour les produits microstructurés et une autre en huit étapes pour les produits homogènes [15]. Le processus tel que décrit ci-dessous met en commun les idées de différents auteurs.

2.1.2.1 Identification des besoins

Cette étape consiste globalement à identifier les clients ciblés ainsi que leurs besoins et désirs, et à convertir ces derniers en spécifications techniques qui serviront de fondation au développement du produit. Les clients incluent à la fois ceux qui achètent le produit dans le but de le transformer, et les utilisateurs finaux du produit. Des entrevues sont généralement conduites par des groupes incluant des membres des équipes technique et marketing, avec une attention particulière sur les utilisateurs pilotes⁴. Étant donné qu'ils sont des utilisateurs fréquents du produit et qu'ils tireraient le plus de bénéfices de potentielles améliorations, ils sont susceptibles d'avoir identifié des solutions avant-gardistes vis-à-vis des lacunes actuelles du produit [23]. Bon nombre de techniques existent relativement à la préparation du questionnaire d'entrevue, la sélection de l'échantillon de clients à questionner, et à l'interaction que le groupe d'interviewers devrait avoir avec ces derniers [24-28].

L'interprétation des informations fournies lors des entrevues peut s'avérer être d'une certaine complexité. Outre l'identification des points forts et des défauts des produits existants qui est souvent plus directe, il faudrait pouvoir lire entre les lignes afin de différencier les besoins essentiels des attributs facultatifs, et établir un ordre de priorité entre eux. Il convient ensuite de déterminer les propriétés physiques représentatives des attributs désirés, étape où la perception des clients est déterminante, selon qu'elle est exprimée de manière objective (la dureté d'un matériau par exemple) ou subjective (la douceur d'une lotion corporelle) [29]. Pour les produits chimiques, ceci peut être effectué en essayant d'établir successivement (1) la stœchiométrie, (2) les bilans de matière et d'énergie, et (3) les cinétiques de réaction, relatifs aux attributs du produit [14,19]. La littérature recommande d'établir un produit référence vis-à-vis duquel comparer la conception en cours, mais également l'utilisation de la méthode de déploiement de la fonction qualité (QFD Quality Function Deployment) [30-35] permettant de créer des liens entre les besoins du client, l'importance relative des besoins, les caractéristiques techniques du produit, et l'évaluation que le client fait des performances des produits concurrents. La Figure 2.2 illustre une variante de la *maison de la qualité*, outil couramment utilisé pour l'application de la méthode QFD.

⁴ Traduction de l'anglais *lead users*

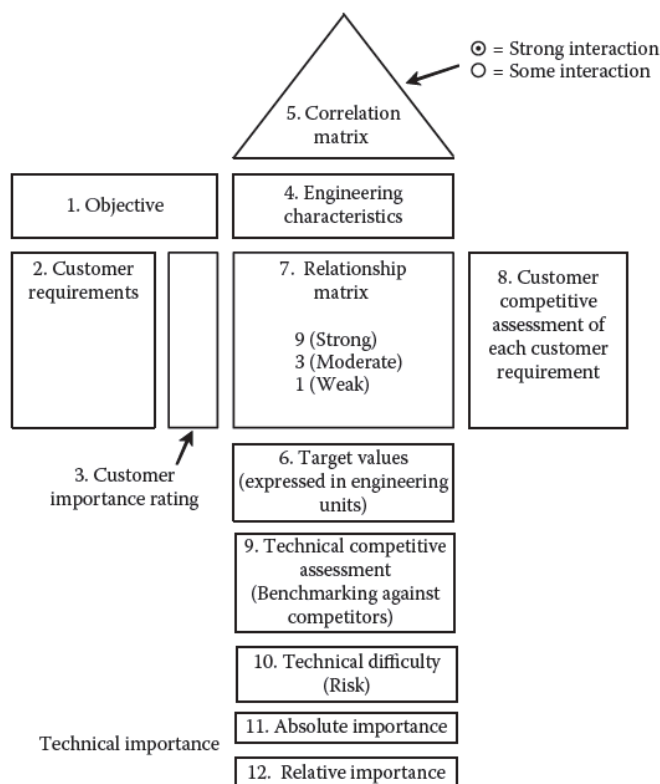


Figure 2.2 Variante de *maison de la qualité*, méthode QFD (tiré de [34])

2.1.2.2 Génération et sélection des idées de produit

À cette étape, un grand nombre d'idées de produit doit être généré, avant que celles-ci ne soient graduellement filtrées jusqu'à obtention du produit final. Les idées de produit, parfois appelées concepts, peuvent être obtenues à partir de diverses sources. On peut notamment citer les utilisateurs des produits présents sur le marché, les inventeurs, les consultants, la littérature relative au produit ou aux besoins à satisfaire, et l'équipe de conception du produit elle-même, dont les dispositions techniques des membres peuvent naturellement donner lieu à des idées intéressantes [20]. En outre, la chimie peut représenter une source importante d'idées, notamment pour les industries pharmaceutique ou des cosmétiques où les formules des produits sont sujettes à un niveau élevé de confidentialité. Deux méthodes sont suggérées pour l'identification des composés potentiellement utiles dans la formulation d'un produit : la première propose de rechercher les agents actifs dans la nature (plantes, animaux, microorganismes) qui remplissent une fonction désirée [36]. La seconde méthode est la chimie combinatoire, pour laquelle des outils informatiques sont utilisés pour simuler les combinaisons possibles de divers composés et identifier lesquelles sont le plus susceptibles de remplir la fonction désirée [37,38].

Dans le processus de développement des produits formulés, plutôt que d'effectuer en série la conception du produit puis celle du procédé, il est recommandé de les considérer simultanément. Il peut s'avérer que plus d'importance soit accordée à optimiser les performances ou la rentabilité du procédé, comme c'est d'ailleurs le cas pour les produits de commodité, qui ne tirent aucun réel avantage à avoir des fonctionnalités différenciées [39,40]. D'un point de vue général, la définition d'un nouveau produit chimique repose sur l'atteinte d'un optimum entre trois piliers à savoir (1) la fonction de propriété, (2) la fonction de procédé, et (3) la fonction d'usage, qui forment ce que Costa et al. nomment la pyramide du produit chimique⁵ [16,41] (voir Figure 2.3).

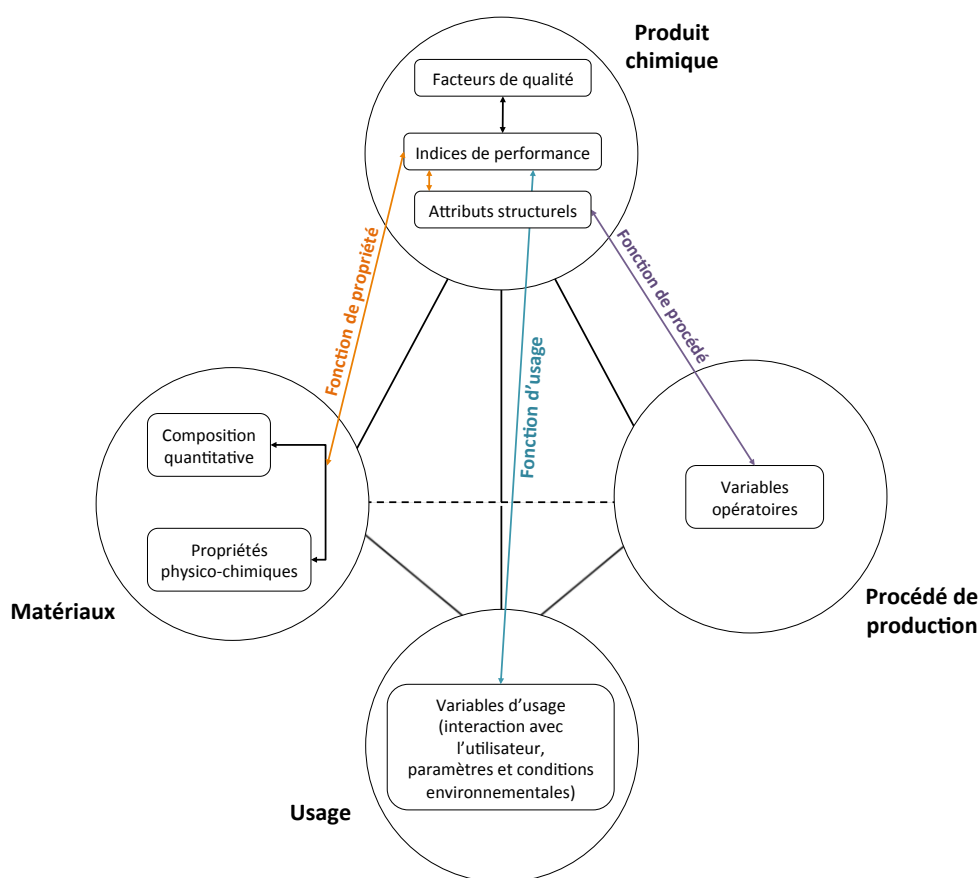


Figure 2.3 La pyramide du produit chimique (adapté de [16])

⁵ Traduction libre

Étant donné qu'il est impossible de prédire qu'un concept résultera assurément en un produit qui satisfera les besoins identifiés, une fois les idées listées, la sélection se fait généralement par élimination des options qui sont les moins prometteuses. Un premier triage peut être effectué sur la base de la pertinence vis-à-vis du contexte, puis des limitations physiques, chimiques, et thermodynamiques des idées proposées. Les concepts restants sont ensuite évalués sur la base d'indices de performance rassemblant des aspects techniques, économiques, environnementaux, esthétiques, établis pour le produit. Les indices de performance doivent être priorisés et pondérés de manière consistante avec les besoins et préférences des clients. Le score global résultant de cette évaluation est utilisé pour classer les concepts et identifier ceux qui iront à l'étape suivante [14].

Une autre approche proposée dans la littérature suggère de représenter la conception du produit sous la forme d'un problème mathématique [42-45]. Ceci reviendrait alors à regrouper l'évaluation des indices de performances sous un indice unique en s'inspirant des fonctions de la pyramide du produit, et ensuite de déterminer les conditions sous lesquelles les performances de l'indice unique sont optimales. Sahinidis et al. [44] ont notamment employé cette approche pour concevoir un réfrigérant de remplacement au dichlorodifluorométhane, en optimisant le ratio de la chaleur de vaporisation sur la capacité thermique du réfrigérant. Schubert et al. [43] l'ont également utilisée pour la conception de produits dispersés tels que des émulsions, la taille des gouttelettes formées étant l'indice à optimiser.

2.1.2.3 Développement du procédé de fabrication

Une fois les concepts les plus prometteurs identifiés, le processus de conception continue avec le prototypage et les tests, les résultats obtenus permettant d'améliorer le produit et de le rapprocher de sa version finale. Parallèlement à ce processus itératif sur le produit, le procédé de synthèse/fabrication doit également être conçu. La littérature abonde de références relatives à la conception (études de pré faisabilité, faisabilité et de définition) et au développement de procédé (échelle laboratoire, plan pilote, unité de démonstration, et échelle commerciale) [20, 46-48]. Le véritable défi ici est d'obtenir un procédé sécuritaire qui permette à la compagnie qui l'implante d'être compétitive à l'échelle désirée, tout en respectant les normes environnementales, de santé et sécurité, et les éventuels règlements relatifs à l'approbation et la commercialisation du produit. Le processus de conception du produit (et intrinsèquement du procédé) peut être considéré achevé avec la construction et la mise en opération du procédé à l'échelle commerciale.

Bien que certaines activités requièrent des équipes multidisciplinaires pour leur exécution, force est de constater que le processus de conception de produit tel que décrit ci-dessus met particulièrement l'emphasis sur la perspective technique du développement. On peut remarquer que dès l'étape initiale d'identification des besoins à satisfaire, il est nécessaire d'avoir une idée assez claire du produit que l'on doit remplacer, ou vis-à-vis duquel l'on doit se comparer. Ceci peut être évident pour une compagnie exerçant dans un secteur d'activité précis, mais pas dans le contexte d'une entreprise en transformation, qui désire diversifier ses produits. Le lien entre l'orientation stratégique de la compagnie et le processus de développement de nouveau produit est un élément critique, qui n'est malheureusement pas largement abordé dans les approches de conception revues dans le domaine de l'ingénierie chimique. Plus récemment, Seider et al. [49] ont mis en lumière cet élément en utilisant l'approche Stage-Gate® pour faire le pont entre le développement de nouvelles technologies et le développement de nouveaux produits chimiques selon leur catégorie. Ceci ouvre la voie à l'intégration des aspects stratégiques et techniques du développement de produit, sur laquelle porte la section suivante.

2.1.3 Approche Stage-Gate[®] de développement de nouveaux produits

La Product Development and Management Association (PDMA) est une organisation internationale fondée en 1976 qui promeut la pratique, organise et publie l'information relative au NPD. Elle regroupe de nombreux professionnels, professeurs et consultants qui travaillent avec des compagnies majeures de l'industrie telles que Procter & Gamble, 3M et Microsoft, et condense le savoir et savoir-faire acquis par ceux-ci dans des publications considérées comme références dans le domaine [50,51].

Diverses études sont conduites par la PDMA auprès des grandes entreprises afin de recenser les activités qu'elles réalisent et d'identifier les pratiques d'innovation qui les distinguent. En ce qui est relatif au processus de développement, il ressort de ces études que 65% à 75% des compagnies ont adopté un processus de type *stage-and-gate*⁶ (ou encore *phase-gate*) pour mener leurs projets de la génération d'idées jusqu'à la commercialisation des produits qui en découleraient [52-54]. Une étude plus récente montre que parmi les compagnies identifiées comme celles ayant les meilleures performances en ce qui a trait aux nouveaux produits, 90% ont implanté une procédure de type stage-and-gate [55].

⁶ Le terme « approche par passage d'étapes » est parfois trouvé dans la littérature. Toutefois, par souci de fluidité, la terminologie en langue anglaise est conservée tout au long du document. Le masculin est invariablement utilisé pour les termes *stage*, et *gate*.

L'approche stage-and-gate consiste à segmenter le NPD en une série d'étapes représentant un ensemble d'activités prédéfinies, et à établir entre les étapes des points d'évaluation et de prise de décision quant à l'avancement et la pertinence du processus en cours [56]. L'idée générale est de diminuer le risque au fur et à mesure que l'on avance dans le NPD en collectant le plus d'information pertinente qui puisse soutenir la décision de continuer ou non à s'investir dans le processus. La littérature situe les débuts de l'approche stage-and-gate aux années 1960, période au cours de laquelle la NASA a commencé à réaliser ses projets en multiples phases d'activités pouvant être évaluées individuellement, et qui devaient respecter un certain nombre de critères pour que le projet soit admis à la phase suivante [57]. L'approche telle qu'appliquée à l'époque est considérée de première génération car chaque phase était placée sous la responsabilité d'un département donné, le projet avançant ainsi d'un département à un autre comme dans une course de relais. Plus tard dans les années 1980, sur la base de son analyse des pratiques des grandes entreprises américaines, Cooper a défini l'approche de deuxième génération puis l'a popularisée en acquérant les droits de marque au bénéfice de sa compagnie, d'où la terminologie Stage-Gate® qui est largement répandue de nos jours [58].

L'approche de Cooper diffère des processus de première génération par le fait qu'elle considère à chaque étape des activités multidisciplinaires, impliquant simultanément des représentants de plusieurs départements de la compagnie. Une équipe multi-département participe au projet de son initiation à son aboutissement, et détient la responsabilité de sa réalisation. L'effectif de l'équipe peut être étendu selon les besoins d'une étape donnée, mais contrairement aux approches de première génération, une continuité est assurée. L'avantage majeur de l'approche de Cooper aura été de réduire le temps de développement des nouveaux produits, et de permettre une meilleure priorisation des projets de la compagnie. Intégrer une perspective multidisciplinaire à la prise de décision plus tôt dans le NPD facilite l'identification des produits moins prometteurs, qui auraient éventuellement été éliminés plus tard (après avoir consommé plus de ressources) si une approche de première génération avait été utilisée.

2.1.3.1 Processus stage-and-gate de deuxième génération

Le processus de développement tel qu'envisagé par Cooper contient typiquement cinq *stages* et cinq *gates*. La terminologie retenue peut d'ailleurs paraître confondante, car le processus débute par un *gate* et non par un *stage*, comme illustré par la Figure 2.4.

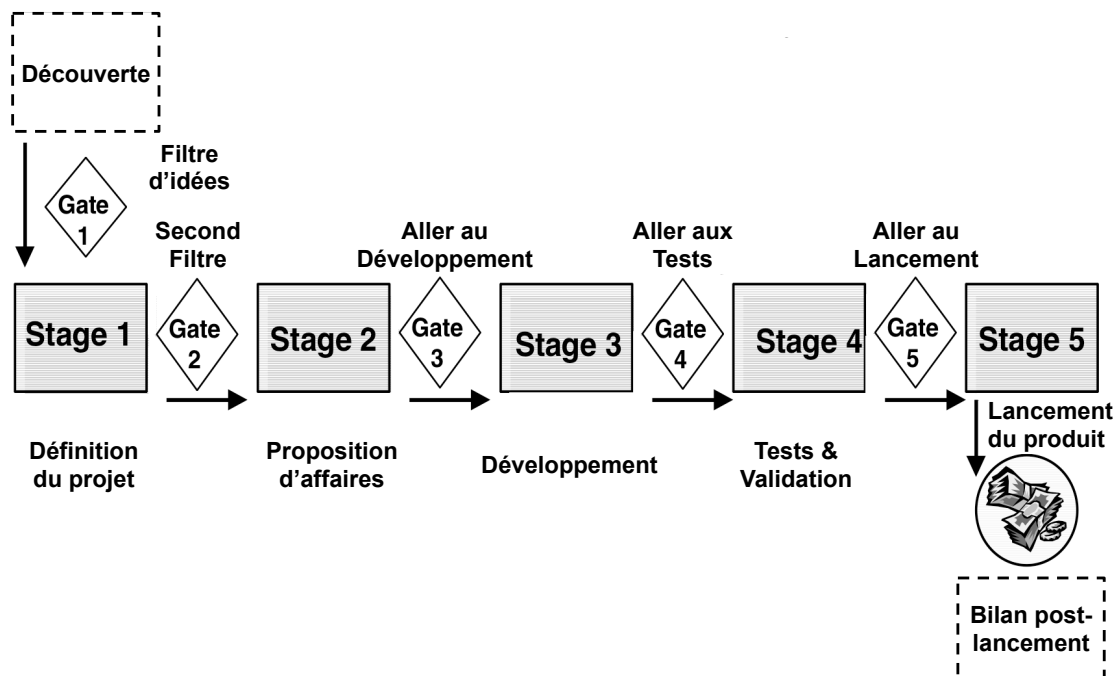


Figure 2.4 Vue d'ensemble du processus Stage-Gate® typique (adapté de [59])

Le détail du processus est principalement tiré des références [59] et [60], et résumé par la Figure 2.5 qui décrit les activités majeures associées aux *stages*.



Objectif(s)						
Générer des idées de produits	Déterminer les avantages du produit des points de vue technique, économique et stratégique.	Définir le produit, ainsi que la proposition de valeur et le modèle d'affaires qui y sont associés.	Développer le produit au point où il atteint les performances ciblées, dans un environnement contrôlé (ex. en laboratoire)	Valider la viabilité de l'entièreté du projet: • Produit • Procédé de fabrication • Acceptation par le client • Économiques	Pénétrer la chaîne de valeur, commercialiser le produit	Analyser les performances du produit et du processus de développement
Activités						
Sources d'idées de produit: • Planification stratégique • Analyse de scénarios • Activités de recherche fondamentale • Étude des tendances technologiques • Étude de l'avis du consommateur (VOC) • Exploration des besoins inarticulés avec des utilisateurs aguérés • Outils et méthodes de stimulation de la créativité en entreprise (voir références [61,62])	• Analyse préliminaire du marché • Analyse préliminaire de la technologie • Justifications financières, stratégiques et compétitives du projet	• Analyses du marché, des lois, normes, règlements, et brevets • Étude et conversion des besoins des clients/utilisateurs en spécifications techniques • Définition et tests du concept de produit • Estimations des coûts et des revenus • Analyse financière • Planification du projet	• Développement physique du produit • Sondage de l'opinion des clients/utilisateurs et amélioration itérative du produit • Conception du procédé de fabrication • Résolution des problématiques légales, réglementaires et normatives • Mise à jour des analyses financières et de marché	• Tests à l'interne • Tests sur le terrain, par des clients/utilisateurs • Production test (ex. à l'échelle pilote) • Vente test (ex. sur un échantillon géographique de clients) • Mise à jour des projections de ventes • Mise à jour des analyses financières et de marché	• Mise en marche du procédé de fabrication à l'échelle commerciale • Application des plans de lancement marketing et opérationnels	<u>Produit:</u> • Évaluation des ventes et des profits réels vis-à-vis des projections <u>Processus:</u> • Évaluation du temps et des coûts de développement vis-à-vis de la planification • Évaluation de l'équipe de projet, et des interactions dans l'entreprise

Figure 2.5 Objectifs et activités des *stages* dans le processus Stage-Gate® typique

2.1.3.1.1 *Stage 1 : Définition du projet (Scoping)*

La Définition du projet concerne des opportunités et idées de nouveaux produits qui ont passé le premier filtre, où leur pertinence vis-à-vis de la stratégie globale définie par la compagnie est préalablement validée. Ce *stage* consiste à effectuer des analyses préliminaires de la technologie et du marché associés au produit, afin de délimiter les frontières du projet, mais aussi son bien-fondé. L'analyse préliminaire du marché devrait permettre de se faire une opinion quant à l'attractivité de l'opportunité. Les informations pertinentes dans cette optique incluent entre autres la taille du marché, son potentiel de croissance, et le potentiel d'acceptation du nouveau produit par les consommateurs.

Les analyses techniques à réaliser sont quant à elles reliées à :

- La définition des objectifs en termes de performances techniques du produit ;
- Les compétences de la compagnie relativement au développement du produit ;
- La nécessité de recruter du personnel ou de créer des partenariats pour ledit développement.

Les informations collectées sont notamment utilisées à l'estimation de l'ordre de grandeur des bénéfices économiques, stratégiques et compétitifs de l'opportunité identifiée, lesquels sont généralement questionnés au Gate 2.

2.1.3.1.2 *Stage 2 : Proposition d'affaires (Business Case)*

Le Stage 2 est l'étape majeure où sont définis le produit et la stratégie d'affaires relative à son développement et sa commercialisation. La proposition d'affaires qui est le livrable principal du *stage* est composée de trois éléments essentiels qui répondent aux questions « quoi », « pour qui », « pourquoi », « comment » et « par qui » associées au développement du produit, soit :

- La définition du produit (quoi et pour qui) ;
- La justification du projet (pourquoi) ;
- La planification du projet (comment et par qui).

Ces éléments sont obtenus par la combinaison de diverses actions tel qu'illustré par la Figure 2.6.

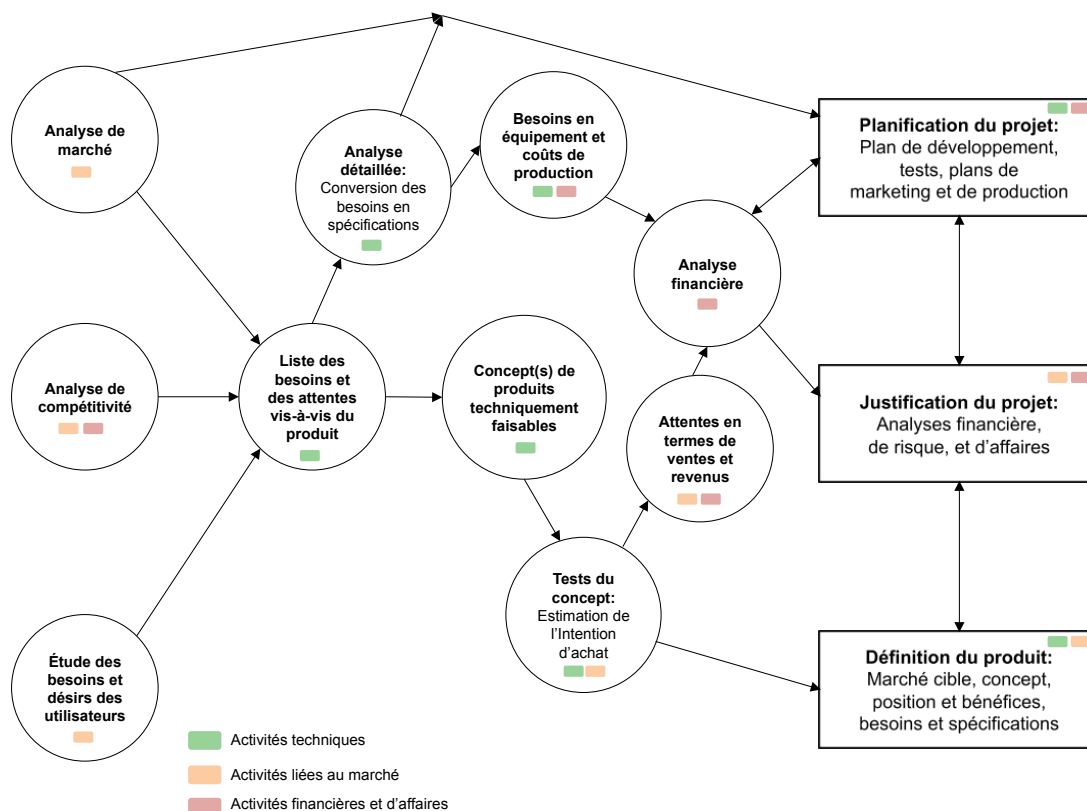


Figure 2.6 Activités principales du Stage 2, Proposition d'affaires (adapté de [63])

Une attention particulière mérite d'être portée à la formulation du modèle d'affaires supportant le développement du produit. Le modèle d'affaires est un facteur décisif du succès du nouveau produit. Selon Osterwalder et Pigneur [64] il définit « *la logique par laquelle une compagnie crée, livre et capture de la valeur* »⁷, et est constitué de neuf éléments (voir Figure 2.7) à savoir : (1) les segments de marché, (2) la proposition de valeur, (3) les réseaux de communication, distribution et vente, (4) les relations avec la clientèle, (5) les flux de revenus, (6) les ressources requises par la compagnie, (7) les activités clés réalisées par la compagnie, (8) les partenariats établis par la compagnies, et (9) la structure de coûts relative au produit. Castellion [65] suggère d'adopter une approche de gestion axée sur la valeur afin d'établir un équilibre entre la valeur créée pour les consommateurs et les bénéfices pour l'entreprise, et propose des moyens d'intégrer cette approche au processus de développement de produit. De nombreuses autres publications couvrant le thème de la définition de la stratégie d'affaires peuvent être trouvées dans la littérature [66-72].

⁷ Traduction libre

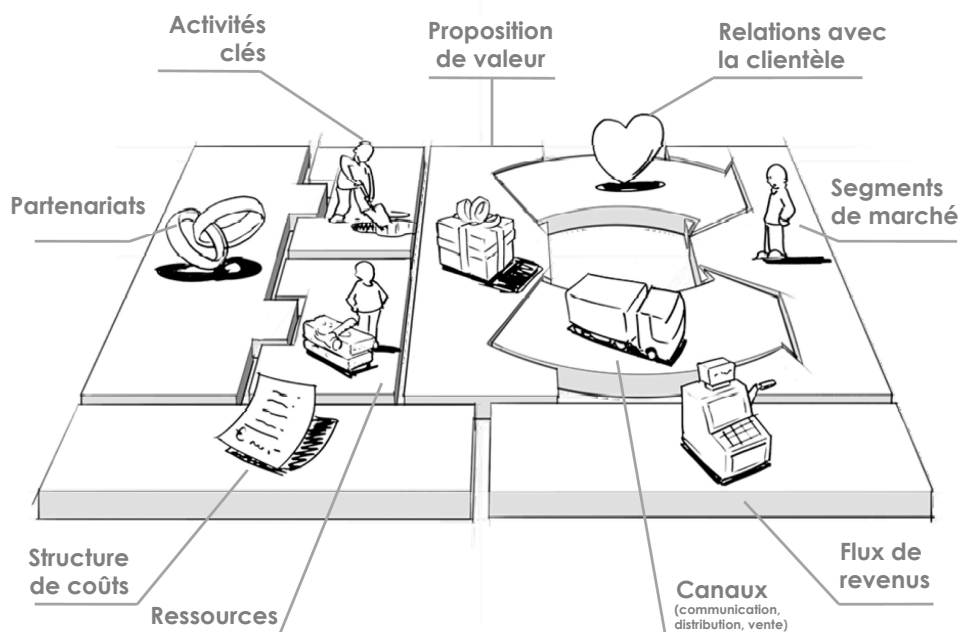


Figure 2.7 Composantes d'un modèle d'affaires (adapté de [73])

2.1.3.1.3 Stage 3 : Développement (Development)

D'après Cooper, ce *stage* marque le début des grandes manœuvres, donc des investissements substantiels tant en capitaux qu'en personnel de la part de la compagnie. La planification effectuée au *stage* précédent voit sa mise en application dans le développement physique du produit, le but à cette étape étant d'obtenir un prototype qui satisfasse les spécifications établies dans un environnement contrôlé. L'aspect technique du développement du produit est primordial à ce niveau. La progression se fait de manière itérative et doit inclure des tests préliminaires du produit par un groupe sélectionné d'utilisateurs aguerris, dont l'expérience permet de raffiner le produit jusqu'à atteinte des objectifs fixés.

L'aspect multidisciplinaire du développement du produit est ici reflété par la réalisation de diverses tâches en parallèle au travail spécifique sur le produit. Elles incluent principalement la conception du procédé de fabrication et de la chaîne logistique qui sera mise en place pour la commercialisation du produit. Le cas échéant, les problématiques relatives à la propriété intellectuelle et aux normes auxquelles le produit doit se soumettre, doivent être envisagées, de même que la révision des plans de marketing, de lancement du produit, et les analyses financières.

2.1.3.1.4 Stage 4 : Tests et validation (Testing & Validation)

Si le prototype est éprouvé avec succès sous des conditions contrôlées et que les justifications financières et stratégiques du projet demeurent, le processus avance au Stage 4, où la viabilité du projet est considérée dans son ensemble.

Concernant le produit, le prototype obtenu doit pouvoir atteindre les performances désirées dans un environnement similaire à celui de son utilisation par l'utilisateur final. Le produit est amélioré au fil des tests effectués, mais des résultats non concluants aux tests sur le terrain peuvent éventuellement causer un retour au *stage* de Développement. Ce processus itératif pousse d'ailleurs certains auteurs à considérer les Stages 3 et 4 comme une unité [56].

Les activités parallèles à la conception du produit sont également accélérées, car cruciales à l'admission du projet au *stage* de Lancement. Doivent être finalisées la conception et l'optimisation du procédé de fabrication, la mise en place des voies d'accès à la matière première et au marché, et la stratégie de lancement. L'obtention finale des accréditations par les agences compétentes peut s'avérer être un obstacle majeur au développement du produit, particulièrement dans des secteurs comme l'alimentaire et le pharmaceutique où sont en jeu des questions d'intérêt public ou impliquant la santé humaine [74-76].

Les Stages 3 et 4 relatifs au développement et à la validation du produit sont reconnus comme étant généralement les plus chronophages. Un accès rapide au marché pouvant procurer divers avantages compétitifs, plusieurs astuces sont proposées dans la littérature afin de raccourcir les cycles de développement de produit, notamment (1) la définition et le respect de jalons afin d'orienter les efforts de l'équipe de développement, (2) la formation d'équipes multifonctionnelles combinant plusieurs départements de la compagnie, (3) la progression des tâches en parallèle, (4) l'anticipation de certaines tâches si la disponibilité de l'information le permet. On a récemment pu noter l'apparition de processus stage-and-gate dit de troisième génération, qui sont concrètement des adaptations des processus de deuxième génération destinées à accélérer l'exécution des projets et faciliter l'accès au marché [77].

2.1.3.1.5 Stage 5 : Lancement du produit (Launch)

Tout produit arrivant à ce *stage* doit avoir reçu l'approbation des décideurs aux *gates* relativement à ses performances techniques, à son potentiel d'acceptation par les utilisateurs sur les segments de marché visés, de même que quant à son procédé de fabrication et à la stratégie commerciale mise en place pour son déploiement. Cette étape revient donc simplement à la mise en application des plans établis et révisés aux *stages* précédents. Le département de marketing est celui qui est majoritairement impliqué, mais les départements techniques peuvent également être sollicités, notamment pour l'amélioration en continu du procédé et l'assistance des utilisateurs dans le but de faciliter l'adoption du produit.

Les *stages* de Découverte et de Bilan post-lancement ne sont selon la terminologie de Cooper considérés que comme des étapes pré- et post-développement du processus stage-and-gate, mais ils n'en demeurent pas moins cruciaux à l'établissement d'un flux constant de nouveaux produits amenés avec succès vers le marché.

Bien que le cœur de l'ouvrage soit réalisé à travers les activités dans les *stages*, les *gates* sont des points critiques du processus de développement. En effet, les activités et les tâches associées à un *stage* donné sont orientées par les livrables définis au *gate* précédant. Les *gates* sont des points de convergence de l'information servant à la fois pour le contrôle de la qualité des tâches réalisées, pour la prise de décision sur la continuation du processus, et pour la priorisation de l'ensemble des projets de la compagnie. La structure d'un *gate* est constituée des trois éléments suivants :

- Un ensemble de livrables : ils doivent être soumis pour évaluation par l'équipe de développement du produit. L'ensemble peut être standardisé pour chaque *gate*, mais il varie généralement d'une entreprise à une autre.
- Un ensemble de critères de prise de décision : les critères peuvent être rigides (la non-satisfaction d'un seul d'entre eux peut entraîner le rejet du projet) ou souples. Les critères souples sont le plus souvent utilisés pour classer et prioriser les projets. Le terme *showstopper* est commun dans la littérature anglo-saxonne, pour faire référence aux critères rigides.
- Un résultat : il s'agit (1) d'une décision concrète soit d'admettre le projet au *stage* suivant, de le renvoyer au *stage* précédant pour que certaines tâches/activités soient refaites, de le mettre en stand-by, ou de le terminer; (2) d'un plan d'action pour le *stage* suivant, incluant la liste de livrables attendus au prochain *gate*.

Une des limitations reconnues du processus Stage-Gate[®] de Cooper est que tel qu'il a initialement été défini, il se prête mal aux projets de recherche en science pure, de développement technologique, ou encore de plateformes de produits [60,78,79]. La raison principale de ce constat est le manque de spécificité de ce type de projet. Ils sont plus vaguement définis, et surtout le produit à développer n'est pas souvent clairement établi, ce qui rend leur appréhension plus complexe. La nécessité d'avoir une vision claire du produit à développer ou à remplacer dès le Gate 1 est une caractéristique qui relie le processus Stage-Gate[®] et les approches de conception de produits chimiques revues auparavant. Plus qu'une simple caractéristique, il s'agit d'une limitation commune aux deux approches.

Le *stage* de Découverte pourrait détenir la solution à ce manquement. À cette étape sont générées les idées de nouveaux produits, lesquelles sont orientées par la stratégie d'innovation définie par la compagnie. Ce lien entre les initiatives individuelles de nouveaux produits et la stratégie corporative est exploré ci-dessous.

2.1.3.2 Définition de la stratégie d'innovation

La définition de la stratégie d'innovation a lieu dans la section en amont du processus d'innovation⁸ (FFE Fuzzy Front-End), soit la section où sont établies la perspective et les frontières de la recherche et du développement. L'utilisation du terme « *fuzzy* » dans la littérature anglo-saxonne renvoie au caractère exploratoire que peut revêtir le processus d'innovation dans cette phase. Le processus en soit n'y est que peu structuré, car faisant interagir plusieurs éléments d'incertitude. Ainsi, la plupart des références dans la littérature couvrant le sujet proposent des tentatives de structuration de la démarche à suivre pour la définition de concepts de produit viables [80-88]. La FFE est considérée préalable à l'exécution formelle du processus stage-and-gate, bien qu'il soit difficile de complètement l'en dissocier. Certains auteurs considèrent à cet effet qu'elle s'achève concrètement au Stage 2 avec la définition du concept de produit [89,90].

Il en ressort, relativement à la définition concrète de la stratégie d'innovation, une approche systématique en six étapes [91], tel qu'illustré par la Figure 2.8.

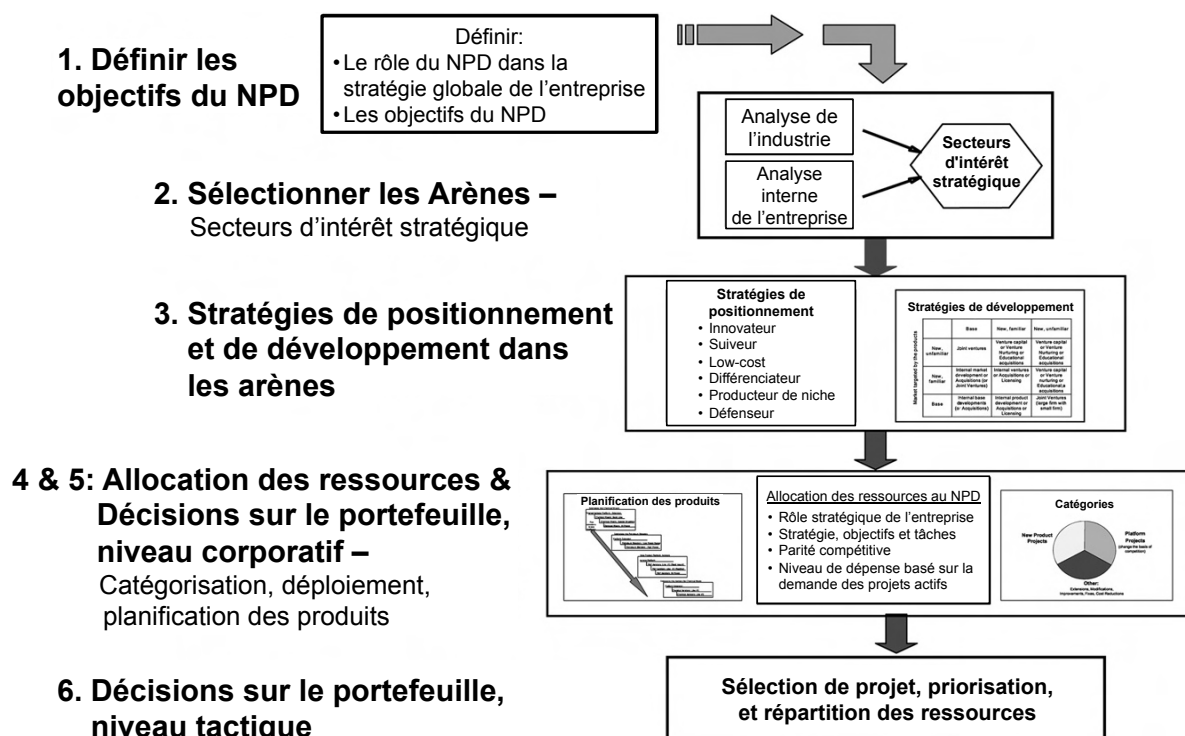


Figure 2.8 Approche de définition de la stratégie d'innovation (adapté de [91])

⁸ Traduction libre.

2.1.3.2.1 *Objectifs et rôle du NPD*

Le NPD trouve ses racines dans la stratégie globale établie par la haute direction de l'entreprise. Une fois la vision et les objectifs globaux fixés, les attentes de la compagnie relativement aux nouveaux produits peuvent à leur tour être déterminées. Cette activité peut paraître routinière pour toute entité active, par contre la distinction entre les meilleures entreprises et les autres se retrouve dans la formulation desdits objectifs [55]. Selon Cooper, il est essentiel que les objectifs formulés soient clairs et mesurables, et établissent la place que les nouveaux produits doivent avoir dans l'entreprise, vis-à-vis du portefeuille de produits existant. Les objectifs sont ainsi de deux types :

- Les objectifs relatifs au rôle des nouveaux produits. Les exemples incluent (1) le pourcentage d'accroissement des ventes ou des profits sur une période donnée, (2) le nombre de nouveaux produits introduits sur le marché, ou encore (3) le ratio des revenus générés par les nouveaux produits par rapport aux revenus totaux du portefeuille.
- Les objectifs relatifs à la performance du NPD. On peut citer entre autres (1) le taux de succès des projets d'introduction de nouveaux produits sur le marché, (2) le ratio du nombre de produits entrant en phase de développement sur le nombre de concepts définis, ou (3) le retour financier du NPD complet incluant les frais de développement du produit.

Des objectifs adéquatement formulés facilitent la définition de références de comparaison et de critères de prise de décision à utiliser subséquemment aux *gates*.

2.1.3.2.2 *Secteurs d'intérêt stratégique*

Cette étape permet de définir les frontières de la recherche dans le but d'orienter les efforts de NPD qui seront entrepris, mais surtout d'éviter que ceux-ci s'éparpillent dans des secteurs non pertinents. Il s'agit donc d'identifier les *arènes*, soit les secteurs d'activité prometteurs en lien avec la stratégie globale de l'entreprise, et où celle-ci pourra le mieux exprimer ses compétences [92].

Trois activités sont généralement réalisées dans l'optique d'identifier les arènes, à savoir :

- Les analyses stratégiques : elles servent à obtenir une compréhension suffisante des industries et secteurs d'activités dans lesquels la compagnie pourrait exercer, ainsi que de la capacité de la compagnie à concrètement s'y positionner. Les analyses SWOT⁹ [93] et des Cinq forces de Porter [66,94], sont des méthodes répandues permettant d'obtenir de telles informations.
- L'identification des opportunités : sur la base des informations recueillies, une liste des opportunités envisageables est établie. Elles sont généralement condensées sous forme matricielle, les axes représentant des caractéristiques pertinentes à la stratégie de l'entreprise. Les types de produit, les types de technologies employées, les groupes de consommateurs, et les régions géographiques sont les caractérisations d'axes le plus typiquement rencontrées [95,96]. Des représentations à plus de trois dimensions sont également possibles [97].
- L'évaluation et la sélection des opportunités : la restriction du nombre d'opportunités possibles à celles qui siéent le mieux à l'entreprise se fait généralement sur la base des risques et des avantages associées à chacune d'elles. Les représentations matricielle et graphique sont là aussi bien répandues. On peut notamment citer les matrices du Boston Consulting Group (BCG) et de McKinsey [98,99], ou encore les diagrammes à bulles qui en sont des versions avancées [100].

La sélection des arènes est indéniablement un jalon crucial dans le processus d'innovation, car la compagnie peut indirectement amenuiser, ou alors sublimer ses chances de réussite en sélectionnant les secteurs sur lesquels concentrer ses efforts de NPD. À cet effet, Cooper suggère que les axes de la matrice de sélection représentent deux critères, soit (1) l'attractivité de l'arène qui combine les avantages technologiques et de marché, et (2) le potentiel de la compagnie, représenté par ses compétences technologiques, marketing, et son habileté à créer un produit ou un attribut de produit unique [91]. La sélection se fait ensuite selon que la compagnie est encline à prendre plus ou moins de risques.

⁹ SWOT : Forces, faiblesses, opportunités, menaces.

2.1.3.2.3 *Stratégies de positionnement et de développement*

À ce stade la compagnie a choisi ses combats, il convient à présent de déterminer comment elle entend les mener. Ceci revient à définir quel type de compétiteur elle doit être, et les mécanismes qu'elle devra mettre en place pour supporter le développement des nouveaux produits. Une stratégie unique peut être définie à l'échelle de l'entreprise, tout comme celle-ci peut être adaptée et appliquée contextuellement d'une arène à une autre.

Une typologie bien établie dans la littérature relativement aux stratégies de positionnement identifie les compagnies selon leur réactivité vis-à-vis des changements des conditions du marché [101]. La compagnie peut donc choisir d'être (1) un *innovateur*, (2) un *suiveur*, (3) un *défenseur*, ou (4) un *réactif*¹⁰. Les innovateurs sont généralement avant-gardistes, et réagissent rapidement aux signaux de nouvelles opportunités et changements dans leur industrie. Leur stratégie est d'être les premiers à amener un nouveau produit ou une nouvelle technologie sur le marché. Les suiveurs par contre ne prendront que rarement le risque d'être premiers sur le marché, et seront plus dans l'imitation que dans l'innovation. Ils se donnent cependant les moyens d'adopter et améliorer rapidement les technologies apportées par les innovateurs, dans le but de proposer des produits supérieurs (moins dispendieux, ou ayant quelques attributs additionnels). Les défenseurs donnent beaucoup moins d'importance à l'innovation dans l'ensemble, mais plutôt à la sécurisation de leur place sur le marché. Ils se positionnent généralement sur des secteurs de marché plutôt stables, et retiennent leur clientèle soit par des produits ou un service de qualité supérieure, ou à l'opposé par des prix beaucoup plus abordables que la compétition. Les réactifs enfin ont une stratégie moins consistante, et ne réagissent qu'à des changements majeurs de leurs industries [102]. D'autres typologies sont présentes dans la littérature, combinant notamment des caractéristiques des acteurs sus cités – l'exemple peut être pris des producteurs de niche, des différenciateurs ou des producteurs *low-cost* [103] – mais l'un des rôles aura généralement tendance à prédominer dans l'ensemble.

¹⁰ Traductions libres des termes *innovators*, *fast followers*, *defenders* et *reactors*.

Pour ce qui est des stratégies de développement, il est recommandé d'en effectuer la sélection en fonction du niveau de familiarité de la compagnie avec la technologie intégrée dans les nouveaux produits d'une part, et avec les segments de marchés sur lesquels elle compte les promouvoir, d'autre part (voir Figure 2.9). Le développement à l'interne est privilégié lorsque le marché ou la technologie sont familiers, alors que les partenariats sont primordiaux dans le cas contraire [104].

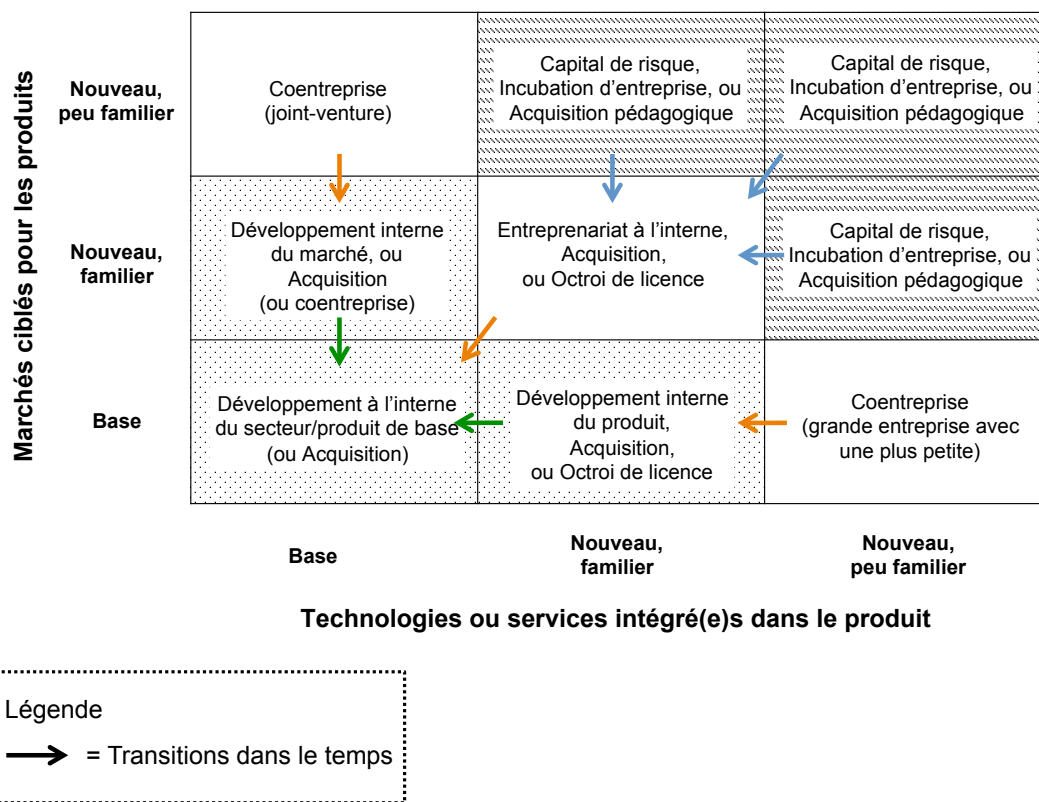


Figure 2.9 Sélection et évolution temporelle des stratégies de développement (adapté de [105])

2.1.3.2.4 Allocation des ressources et décisions stratégiques

L'allocation des ressources est la concrétisation de la stratégie établie par l'entreprise. Avant que de l'argent ne soit réellement dépensé, la stratégie ne reste qu'un alignement de mots sur un bout de papier [106]. Étant donné qu'elle concerne à la fois le capital financier et humain de l'entreprise, l'allocation des ressources ne peut être initiée qu'au niveau corporatif, et doit tenir compte de l'ensemble des projets de la compagnie. Deux objectifs apparaissent à cette étape, soit la détermination dans un premier temps du niveau d'investissement requis pour mener à bout les projets envisagés, puis la répartition adéquate desdits investissements. Pour ce faire, il convient de réaliser de manière complémentaire (1) la catégorisation des investissements, (2) la planification stratégique des produits, et (3) le déploiement des ressources par catégories. La planification des produits joue un rôle important sur la vision à long-terme de la compagnie, notamment pour la priorisation des catégories [107]. Celles-ci sont identifiées de manière consistante avec les objectifs de l'entreprise, les arènes stratégiques, les types de projet ou les lignes de produit étant des dimensions communément définies.

2.1.3.2.5 Décisions au niveau tactique

Les décisions tactiques renvoient à la sélection individuelle des projets et à la priorisation des ressources entre eux. Elles découlent directement des décisions stratégiques effectuées entre les catégories d'investissements au sein de l'entreprise, et sont contraintes par les enveloppes octroyées à celles-ci. Les décisions stratégiques et tactiques mises ensemble constituent l'essence de la gestion du portefeuille de projets de la compagnie, et font le lien entre l'orientation stratégique au niveau corporatif, et l'identification des idées de nouveaux produits au *stage* de Découverte du processus stage-and-gate.

La charte d'innovation de produit (PIC Product Innovation Charter) est un outil que plusieurs auteurs recommandent pour condenser et communiquer les informations relatives à la stratégie d'innovation [20,95,108]. Elle contient généralement la vision et les objectifs de NPD, le champ d'action (les arènes), et parfois des recommandations spécifiques à la compagnie telles que le degré d'innovation ou la stratégie de positionnement. Elle sert globalement de feuille de route à l'équipe de projet, de même qu'au groupe de décideurs qui l'évalueront aux *gates*. La PIC est établie pour l'ensemble des initiatives de NPD de la compagnie, mais l'effort peut être étendu aux projets individuellement. Elle prend alors le nom de *charte de projet* ou *charte de conception*¹¹, et contient en plus des éléments sus cités un aperçu de l'échéancier et des livrables attendus [20]. Les études démontrent que l'instauration d'une PIC qui fournit de manière détaillée la vision corporative et les objectifs ciblés accroît considérablement les performances en NPD, la satisfaction générale vis-à-vis du processus d'innovation, et joue un rôle positif de médiation et de coordination entre la direction et les membres de l'entreprise [109].

2.1.4 Analyse critique

Il convient à ce point de se poser la question de savoir ce que valent les différentes approches de conception et de développement de produit revues ci-dessus, vis-à-vis de la problématique de l'implantation du bioraffinage dans et par les compagnies forestières. Les approches de conception de produit telles que définies en ingénierie chimique s'appliquent bien aux produits issus des procédés de bioraffinage, mais ne représentent cependant que le volet technique du NPD. Elles ne résolvent pas le besoin de remodelage de la vision stratégique des compagnies forestières, et sont de ce fait incomplètes. Une approche de type stage-and-gate serait plus appropriée car elle considérerait la progression en parallèle d'activités multidisciplinaires, et permettrait la gestion et l'atténuation de risques de sources diverses. Ce type d'approche nécessite cependant que l'orientation stratégique du NPD soit établie, d'où le lien avec le processus en six étapes de définition de la stratégie d'innovation dans la FFE.

¹¹ Traductions libres des termes *project charter* et *design charter*.

Une réalité critique au bioraffinage est le fait que les procédés employés donnent généralement lieu à des portefeuilles incluant plusieurs produits, dû à la nature tripartite de la biomasse végétale (cellulose, hémicelluloses et lignine). Cet aspect n'est cependant pas particulièrement considéré dans le processus Stage-Gate[®], où l'accent est mis sur la définition d'un unique produit. De ce fait, les activités, livrables et critères de prise de décision ont été conçus pour le développement d'un produit à la fois, causant les limites des processus stage-and-gate de deuxième génération vis-à-vis du développement de transformations stratégiques majeures, notamment de plateformes de produits.

De même que des modifications au processus stage-and-gate de deuxième génération ont été effectuées pour des projets de développement technologique [78,110] et de recherche en science pure [111], il est nécessaire dans le contexte du bioraffinage d'en définir une adaptation qui convienne au développement de portefeuilles multi-produits.

Étant donné que les activités dans un *stage* donné sont prédéfinies au *gate* précédant en fonction des livrables requis pour le passage du *gate* suivant, l'on peut anticiper que les modifications à apporter au processus stage-and-gate porteront principalement sur le processus de sélection et de prise de décision aux *gates*.

2.2 Définition du portefeuille de produits de bioraffinage

Le domaine du bioraffinage a attiré l'attention de bon nombre de chercheurs au cours des deux dernières décennies, cependant force est de constater que l'accent a fortement été mis sur le développement de nouvelles technologies et nouveaux procédés, et sur le volet technique du développement de produits. L'article de Fernando et al. [112], le rapport « *Status of 2nd Generation Biofuels Demonstration Facilities in June 2010* » [113] ou encore les revues de Maity [114,115] sont entre autres publications [116-118] qui font rapport des efforts entrepris pour le développement ou l'adaptation de technologies de bioraffinage, avec un penchant notable pour la production de biocarburants. On peut également citer l'étude « *State of Play in the Biorefining Industry* » [119] qui classe les technologies selon leur niveau de maturité. D'autres auteurs se sont quant à eux penchés sur la conception et l'optimisation de procédés de bioraffinage [120-122], ou encore de la chaîne logistique [123]. Il a donc plus été question de savoir *qu'est-ce que l'on peut produire* et comment, plutôt que *qu'est-ce que l'on devrait produire* [124] pour la transformation du modèle d'affaires.

En ce qui est de la sélection proprement dite de nouveaux produits de bioraffinage, deux orientations opposées mais complémentaires, sont retrouvées dans la littérature : l'une est axée autour de critères technico-économiques, alors que la seconde met en avant les potentiels stratégique et d'affaires associés aux produits. Les termes *technology-driven* et *market-driven* sont ceux utilisés dans la littérature anglo-saxonne pour refléter ces deux orientations.

2.2.1 Approches d'orientation technico-économique

Ce premier ensemble regroupe les approches qui préconisent de principalement se baser sur des éléments reliés aux propriétés, aux performances, ou au potentiel chimique des produits en combinaison avec les indicateurs économiques, afin d'identifier les produits de bioraffinage à inclure dans le portefeuille de produits. Les critères techniques occupent une place prépondérante dans ces approches, les indicateurs économiques se résumant le plus souvent aux coûts de production estimés et aux prix potentiels des produits.

L'approche développée par Werpy et Petersen pour l'identification des dix produits chimiques les plus prometteurs obtenus à partir des sucres et des gaz de synthèse [125] illustre bien cette orientation. Les options de produit identifiées sont d'abord classées sous la forme d'un organigramme reliant les éléments selon leur structure chimique et les réactions de conversion connues, puis comparées de manière itérative jusqu'à ce que les options retenues ne soient plus différenciables. Partant d'un total de plus de 300 produits, une première itération a permis d'en identifier 30 qui se démarquaient par (1) le fait de présenter plusieurs fonctionnalités chimiques offrant des possibilités de conversion en divers dérivés, (2) la possibilité d'être obtenus à la fois à partir de matière lignocellulosique et d'amidon, (3) leur structure monomérique de 1 à 6 atomes de carbone, et (4) le fait de ne pas être des « super commodités », soient des produits chimiques dont la production nécessite des investissements colossaux et pour lesquels les marges vis-à-vis des coûts de production sont minimales (méthanol et acétone par exemple). Une seconde itération a ensuite réduit ce nombre à 12, utilisant comme critères (1) l'alignement stratégique avec l'utilisation de biomasse lignocellulosique et d'amidon, (2) la valeur du produit et de ses dérivés, (3) la complexité technique des voies de transformation vers le produit et ses dérivés, et (4) la variété des dérivés et familles de dérivés potentiellement obtenables à partir du produit.

L'approche de Werpy et Petersen a été reprise plus tard par Holladay et al. pour les dérivés de lignine [126]. Sur la base de la structure et des fonctionnalités chimiques, et de leur utilisation usuelle, les dérivés de lignine ont été classés en trois catégories (énergie et carburants, macromolécules, et aromatiques), puis la maturité du développement technologique de la lignine vers lesdits dérivés a ensuite permis de les classer en opportunités à court, moyen, ou long terme.

Une autre approche, à l'instar de certaines utilisées en conception de produit, formule la problématique de la sélection de produits de bioraffinage sous la forme d'un problème d'optimisation. Sammons et al. [120] par exemple a créé une superstructure qui incorpore plusieurs modèles d'optimisation de diverses voies technologiques et combine différents outils (simulation de procédé, conception interactive du procédé, analyse environnementale) dans le but de maximiser le profit, et ainsi d'identifier l'allocation optimale des produits. La superstructure a notamment été utilisée dans le contexte de la conversion de fèces de volaille par gazéification.

2.2.2 Approches d'orientation stratégique

Par orientation stratégique, l'on fait allusion à l'ensemble des approches qui pour la sélection des produits à inclure dans le portefeuille de bioraffinage mettent prioritairement l'emphasis sur les facteurs des marchés et leur évolution potentielle, le positionnement sur les marchés, l'amélioration de la compétitivité, le potentiel de création de partenariats associé aux produits, et l'impact que leur addition au portefeuille de produits représenterait pour les compagnies concernées.

Farmer [127] mettait ainsi en relief la nécessité de se focaliser premièrement sur les réalités et les influences du marché pour définir les produits et la capacité des bioraffineries. Wising et Stuart [128] lui emboîtèrent le pas en suggérant que les alternatives prometteuses de bioraffinage varient de manière contextuelle sous l'influence des conditions de marché propres à chaque usine, et que leur processus de sélection devrait débiter par une analyse détaillée de celles-ci. Chambost et Stuart dans un premier temps [124], puis accompagnés de Eamer [129], ont tenté de définir les contours d'une approche systématique permettant d'identifier les produits individuels les plus prometteurs. Celle-ci considère deux niveaux d'évaluation : (1) les options de produits sont d'abord analysées à l'échelle du secteur forestier par des analyses SWOT et de compétitivité, le but étant de retenir un ensemble générique de produits; puis (2) les options retenues sont analysées à l'échelle de la compagnie ou de l'usine directement concernée par la transformation stratégique, par le biais d'outils permettant d'évaluer l'impact de chacune des options d'un point de vue marketing et stratégique. Les matrices du BCG et de Ansoff sont les outils recommandés par les auteurs à ces fins.

Janssen et al. [130] ont approfondi cette approche en déterminant qu'afin de mieux gérer les risques liés à l'implantation du bioraffinage, un développement par phases devrait être envisagé (Figure 2.10). La Phase I aurait pour but de faciliter la familiarisation avec le procédé et la pénétration de nouveaux marchés, typiquement par des produits chimiques de base ou des commodités pour lesquelles les risques sont moindres. La Phase II permettrait l'émergence de produits à valeur ajoutée, puis la Phase III viserait l'amélioration des marges, notamment par l'optimisation de la chaîne logistique. Selon cette approche la sélection du portefeuille de produits se fait premièrement pour la Phase II avec l'identification des produits à valeur ajoutée qui serviraient le mieux la stratégie à long-terme de la compagnie, puis s'étend à l'identification des produits intermédiaires qui permettraient en Phase I, dans le court terme, de mitiger les risques liés à la transformation de l'entreprise [13]. Cette approche d'implantation est revisitée de manière intéressante par Machani et al. [131] qui suggèrent de faire évoluer l'offre de produits des compagnies papetières selon des stratégies de réduction des coûts et d'optimisation opérationnelle, puis de diversification intra- et extra-industrie forestière. Ils ne donnent cependant pas d'indication quant à la sélection proprement dite des produits à développer à chacune de ces phases d'implantation.

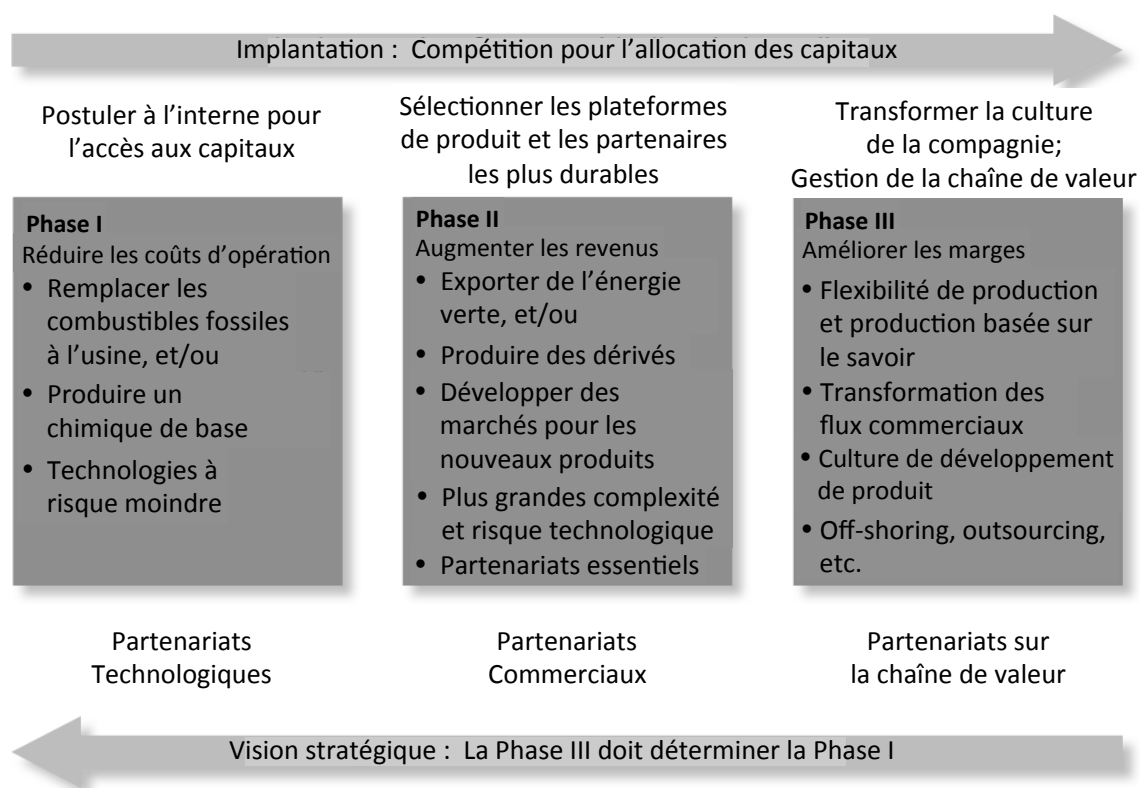


Figure 2.10 Phases typiques de l'implantation séquentielle du bioraffinage (adapté de [130])

Batsy et al. [132] ont récemment proposé une approche de triage en forme d'entonnoir permettant l'identification de produits individuels puis de familles de produits selon une perspective de marché, suivie par une évaluation multidisciplinaire combinant des critères marketing, économiques et environnementaux supportés par la superstructure définie par Sammons et al. [120], et incluant enfin une étape d'évaluation des partenariats potentiels (Figure 2.11). Ainsi, ils combinent quelque peu les orientations stratégique et technico-économique, mais cette dernière sert principalement à fournir les données utiles pour l'évaluation des phases d'implantation des options de bioraffinage, et à la prise de décision stratégique.

Clerc et al. [133] ont ensuite segmenté cet entonnoir, dédiant le premier segment à la génération systématique des opportunités de bioraffinage. Suivant l'approche d'implantation par phases de Janssen et al., ils ont établi quelques heuristiques pour la définition de combinaisons procédé-portefeuille de produits pour chaque phase d'implantation d'une bioraffinerie, et y combinent les deux orientations ci-dessus décrites. Les principales heuristiques sont notamment reliées à la magnitude de l'investissement requis, à la constitution d'un portefeuille de produits à valeur ajoutée, et au potentiel d'aligner la part de marché potentielle avec la capacité pour laquelle les technologies envisagées sont considérées matures.

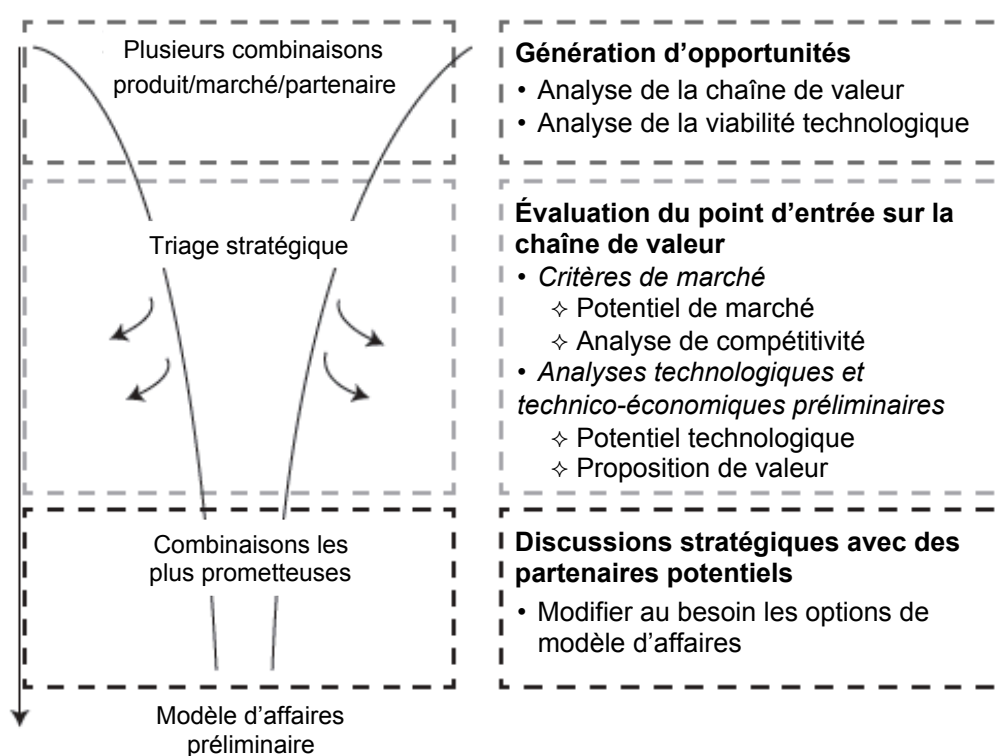


Figure 2.11 Approche *entonnoir*, de sélection du portefeuille de bioraffinage (adapté de [132])

2.2.3 Analyse critique

Étant donnée la complexité des choix à effectuer de par la multitude d'alternatives possibles et la diversité des sources de risques et incertitudes reliés au développement du bioraffinage, l'on aurait tort de suivre une approche strictement orientée par des facteurs technico-économiques ou par des facteurs stratégiques. Les approches sans être erronées en soit sont incomplètes l'une sans l'autre, les outils qu'elles emploient pouvant être combinés afin d'appréhender de manière adéquate toutes les perspectives de risque reliées au bioraffinage. Comme il a toutefois été soulevé [129], la perspective stratégique devrait orienter l'identification et la sélection des additions au portefeuille de produits, car le plan d'implantation technologique est dépendant du plan d'affaires, et doit être défini de manière à en servir la vision.

À cet effet, il apparaît primordial de considérer une implantation séquentielle du portefeuille de produits de bioraffinage. En préconisant une approche d'implantation par phases tel qu'introduite par Janssen et al. où des perspectives spécifiques de risque sont ciblées d'une phase à une autre, l'on intégrerait implicitement des méthodes d'atténuation de risque à la définition des stratégies de bioraffinage considérées. Cela n'éliminerait sûrement pas tout risque, mais permettrait d'identifier les sources majeures de risque résiduel associées aux produits individuels et aux portefeuilles qu'ils constituent de manière effective, d'une phase à une autre dans la mise en place de la stratégie. Dans l'optique d'adapter le processus stage-and-gate de deuxième génération au développement d'alternatives de bioraffinage, considérer des approches d'implantation par phases lors de la définition des alternatives serait une amélioration à la compatibilité du processus stage-and-gate pour l'évaluation des alternatives impliquant des portefeuilles multi-produits.

Un bémol mérite cependant d'être mis en ce qui concerne l'identification des opportunités de produits de bioraffinage. Celle-ci se résume en effet à l'exploration de l'éventail d'alternatives envisageables, puis à la création de liens entre elles soit par l'identification d'une plateforme technologique de conversion de la biomasse commune, soit par l'existence de réactions chimiques entre elles. Les possibilités sont fort nombreuses, et les compagnies qui entreprendraient de développer des opportunités de bioraffinage se retrouveraient d'entrée de jeu avec un très grand nombre d'options à étudier. À ce qui correspondrait au premier *gate* dans une approche de type stage-and-gate, le besoin subsiste donc d'établir une méthode permettant de trier de manière rationnelle et pratique les options qui apparaîtraient comme étant non viables dans le contexte de la compagnie concernée et d'ainsi réduire les possibilités à un nombre gérable, sachant que des plans d'implantation séquentielle devraient être définis pour les alternatives retenues.

2.3 Évaluation et prise de décision relatives aux nouveaux produits

Le NPD est jalonné de points de prise de décision où sont évaluées et comparées différentes options dans le but d'en éliminer les moins prometteuses, et de graduellement restreindre le choix à celles qui atteindront ultimement l'étape de commercialisation. La sélection des produits à développer ou des projets sur lesquels investir ne saurait être vue comme une activité isolée. Elle s'inscrit en effet dans la gestion du portefeuille de produits/projets de la compagnie, qui est elle une activité plus globale. Les activités d'évaluation et de sélection ont fait l'objet de nombreuses études dans la littérature; il existe à cet effet plus d'une centaine de techniques utilisables à des fins d'évaluation stratégique du portefeuille, d'évaluation individuelle des produits/projets, ou de gestion du portefeuille [134]. À chaque *gate*, les méthodes et outils employés répondent à une logique spécifique, selon que l'objectif est (1) de maximiser la valeur du portefeuille, (2) d'obtenir un portefeuille équilibré, ou (3) d'aligner le portefeuille sur la stratégie de l'entreprise [100].

2.3.1 Revue des méthodes et outils dans la littérature

Diverses classifications des méthodes et outils de sélection sont présentées dans la littérature. On peut notamment se référer à Thamhain qui les distingue selon le type de données qu'ils traitent et le procédé par lequel ces données sont traitées; il parle ainsi (1) de méthodes quantitatives et rationnelles, (2) de méthodes qualitatives et intuitives, et (3) de méthodes mixtes [135]. Henriksen et Traynor quant à elles les distinguent selon la base théorique de l'analyse effectuée lors du processus d'évaluation [136], les catégories qu'elles ont définies étant plus tard résumées par Verbano et Nosella [137] en méthodes (1) mathématiques, (2) économiques, (3) interactives, (4) stratégiques, (5) de notation¹², et (4) d'analyse décisionnelle. Bon nombre d'autres publications effectuant la comparaison ou la classification des méthodes et outils d'évaluation et de sélection peuvent être trouvées via les références [138-143]. La classification plus générale de Archer et Ghasemzadeh [134] qui distinguent les techniques et outils selon qu'ils servent à l'évaluation individuelle des projets ou à la gestion du portefeuille, est suivie dans le Tableau 2.1 ci-dessous, qui recense les divers techniques et outils identifiés dans la littérature.

¹² Traduction de l'anglais *scoring*

Tableau 2.1: Techniques et outils d'évaluation et sélection de projets

Catégories	Techniques/outils
Évaluation individuelle de projet	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles, indicateurs économiques • Techniques d'estimation du ratio Bénéfice/Coût • Approches, indicateurs reliés aux recherches sur le marché • Modèles d'évaluation du risque • Outil d'analyse par les options réelles (<i>real options analysis</i>)
Considérations stratégiques, Évaluation et sélection du portefeuille	<ul style="list-style-type: none"> • Approches ad hoc <ul style="list-style-type: none"> Profilage Check-lists Sélection interactive • Approches comparatives <ul style="list-style-type: none"> Méthodes Q-sort de tri qualitatif Comparaisons par paires Comparaisons successives Comparaisons sur Un dollar (<i>dollar metric</i>) Méthode du pari standard (<i>standard gamble</i>) Méthodes/modèles de notation Méthode de hiérarchie multicritère (AHP) Autres méthodes de prise de décision à critères multiples (MCDM) Méthodes d'analyse décisionnelle multicritères (MCDA) • Techniques, modèles d'optimisation • Caractérisation graphique du portefeuille <ul style="list-style-type: none"> Matrices de type BCG et McKinsey Approches de cartographie du portefeuille Diagrammes à bulles

Les outils d'évaluation individuelle ont essentiellement vocation à générer des caractéristiques des projets qui les rendraient équitablement comparables au moment de la détermination de la constitution du portefeuille. Ils permettent alors d'appréhender la contribution que pourrait voir un projet à un ou plusieurs des objectifs établis dans la stratégie globale de la compagnie (retour sur investissement, mitigation du risque, etc.). Les indicateurs économiques tels que la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rentabilité interne (TRI) ou le délai de recouvrement sont assez largement utilisés dans l'industrie, mais sont globalement limités par la fiabilité des données et des hypothèses sur lesquelles leurs modèles d'estimation sont basés. Il en va de même pour les techniques d'estimation du ratio bénéfice sur coût.

Le risque est généralement représenté par deux facteurs, soit la probabilité d'occurrence d'un scénario, et l'impact dudit scénario. Divers modèles ont été développés pour l'estimation du risque relié à un projet de manière qualitative ou quantitative, utilisant des informations provenant de données empiriques, de projections, ou d'opinions d'experts. En décomposant le projet en un ensemble d'activités, le risque global peut être estimé par la combinaison des impacts et des probabilités reliées aux événements spécifiques pouvant affecter les différentes activités. Ceci est effectué par le biais de méthodes statistiques, de mathématiques floues¹³ ou d'intelligence artificielle, qui sont communément utilisées pour l'analyse de l'incertitude [144]. Les méthodes statistiques, parmi lesquelles les simulations Monte Carlo, sont particulièrement recommandées pour leur simplicité. PricewaterhouseCoopers présente un guide pratique pour la réalisation d'une analyse de risque, incluant la détermination de seuils de tolérance au risque, et la cartographie de risque illustrant sa répartition à travers les projets candidats à la constitution du portefeuille [145].

L'outil d'analyse par les options réelles met en commun les indicateurs économiques et les techniques d'évaluation du risque. Chaque projet est traité tel une action en bourse, dont la valeur pourrait augmenter ou diminuer avec le temps. Cet outil évalue alors les avantages que pourrait avoir la décision de reporter l'investissement selon les retours économiques estimés et la volatilité annuelle de ceux-ci [142]. Luehrman suggère à ces fins l'utilisation du modèle de Black-Scholes pour l'estimation de la valeur du projet [146], et introduit une matrice en six zones représentant chacune une décision relative au timing de l'investissement dans le projet (jamais, probablement jamais, possiblement plus tard, probablement plus tard, peut-être maintenant, maintenant) [147].

¹³ Traduction de l'anglais *fuzzy mathematics*

Pour ce qui est des méthodes d'évaluation du portefeuille, un premier sous-groupe constitué des techniques de type ad hoc et comparatives et des techniques d'optimisation suit une approche de mesure du mérite pour la sélection des éléments du portefeuille. L'emploi de ces techniques vise à l'établissement d'un classement des projets sur la base de leur contribution éventuelle au portefeuille selon un ou plusieurs critères, puis à en éliminer un certain nombre en raison de contraintes préétablies (par exemple, le budget ou la main-d'œuvre disponible). Steele soutient que le principe de ces approches analytiques est la maximisation de la valeur associée au portefeuille, laquelle est exprimée comme une fonction du bénéfice qu'il génèrerait, de la probabilité d'occurrence de celui-ci, et des coûts engendrés pour sa réalisation [141]. Cependant, différents auteurs ont fait ressortir le fait qu'aucun modèle analytique, aussi sophistiqué soit-il, ne saurait l'être assez pour représenter la complexité et la dynamique entre tous les facteurs qui affectent la réussite ou l'échec d'un projet [148-150].

Malgré la prépondérance des méthodes analytiques, un autre sous-groupe incluant notamment les techniques de caractérisation graphique du portefeuille émerge, et est plutôt basé sur une vision d'ensemble de celui-ci. Ce sous-groupe s'appuie sur la logique selon laquelle la sélection des meilleurs projets individuels ne constitue pas nécessairement la meilleure composition de portefeuille [151]. Outre les différentes variantes de matrices risques-avantages, les techniques d'optimisation sont aussi largement utilisées aux fins d'évaluation synthétique du portefeuille. Chien [141] relève que dans le développement de ces méthodes, l'on a progressivement mis en avant l'utilisation de :

- La programmation linéaire, qui assume l'additivité des projets mais considère mal leur interrelation ;
- L'algorithme glouton¹⁴ qui combiné à une analyse coût-efficacité permet d'allouer graduellement les ressources disponibles aux projets qui en bénéficieraient le plus ;
- La théorie d'utilité multi-attributs (MAUT Multi-Attribute Utility Theory), qui permet de définir des fonctions reliant divers attributs vis-à-vis desquels les projets en lice sont évalués, et les performances relatives des projets ;
- Le modèle d'équilibre de Farquhar et Rao [152] qui permet de considérer les préférences des décideurs vis-à-vis d'attributs identifiés comme étant *non-essentiels*, *équi-balancants*, *contrebalançants*¹⁵, *désirables*, ou *indésirables* ; et de
- La théorie moderne du portefeuille de Markowitz [153].

Il est à noter que les outils de ce second sous-groupe sont le plus souvent utilisés pour l'évaluation du portefeuille que pour la sélection proprement dite. De ce fait, ils sont généralement utilisés en conjonction avec d'autres outils, notamment ceux d'approches comparatives, afin d'obtenir une décision finale quant à la constitution du portefeuille.

Les outils décisionnels multicritères de type MCDM et MCDA méritent une attention particulière, étant donné la nécessité dans la problématique du présent projet de considérer différentes perspectives de risque pour le développement du bioraffinage. Bien qu'elles permettent toutes deux le traitement de critères ou attributs de différents domaines, la distinction faite entre les catégories MCDM et MCDA met en lumière deux écoles de pensées en ce qui est des procédures d'agrégation des préférences des décideurs. La première, d'influence américaine, regroupe les préférences relatives aux attributs sous un critère unique, dit de synthèse. Cela revient généralement à attribuer des poids aux attributs évalués, les techniques de définition de fonctions d'utilité étant largement utilisées à cet effet. Les principales méthodes connues sous cette approche sont MAUT [154,155], AHP [156], celle des utilités additives [157], et celle du goal-programming [158].

¹⁴ Traduction de l'anglais *greedy algorithm*

¹⁵ Traductions libres des termes *equibalancing* et *counterbalancing*

La deuxième approche d'agrégation est d'influence européenne, et consiste à effectuer des comparaisons binaires entre les actions, puis à synthétiser le résultat de ces comparaisons afin de formuler une recommandation à la décision. Les comparaisons effectuées permettent ainsi d'établir entre les actions des relations dites de surclassement, qui peuvent être d'indifférence, de préférence stricte, de préférence faible ou d'incomparabilité [159]. Cette seconde approche se différencie principalement de la première par le fait qu'elle n'aboutit pas nécessairement à un choix définitif quant au problème décisionnel. Elle s'attèle plutôt à accompagner l'organe décisionnel vers la solution la plus adéquate, argumentant que le concept de solution idéale ne peut être considéré valide si aucune option n'est meilleure que toutes les autres tous critères confondus [160,161]. Prométhée [162] et surtout Electre [163], sont les principales méthodes utilisées sous cette approche.

Enfin, il existe une troisième approche d'agrégation, dite du jugement local interactif. Elle est le plus souvent utilisée lorsque l'ensemble des actions potentielles est très grand, ou considéré infini, dans le cas où les actions varient en continu. L'approche consiste donc à déterminer une solution de départ aussi bonne que possible, puis à explorer de manière répétitive par essais-erreurs autour de cette solution, afin d'en trouver de meilleures [164]. Les méthodes employées sont plutôt complexes, parmi lesquelles se démarquent les méthodes PLM (Programmation linéaire multicritère) et STEM (Step method) [159].

Martino [142] présente la forme générique d'un modèle d'agrégation de critères multiples en un critère unique, reprise ci-dessous par l'équation 2.1

$$Score = \frac{A (bB + cC + dD) (1 + eE)}{fF (1+gG)} \text{ (Eq. 2.1)}$$

où A, B, C, D, E, F, et G sont les valeurs obtenues de l'évaluation des critères, et b, c, d, e, f, et g sont les poids respectifs aux critères.

Cette formulation permet d'identifier trois catégories de critères :

- Les critères primordiaux tels que le critère A, qui revêtent une importance pour les décideurs telle qu'une option ayant une piètre évaluation pour ces critères verrait son score en être grandement affecté, et vice-versa. Un score nul pour ce type de critère rendrait automatiquement nul le score global de l'option ;
- Les critères négociables tels que les critères B, C, D et F, pour lesquels les décideurs sont enclins à accepter des compromis. Le choix entre deux options peut toutefois s'avérer complexe si suite à des contributions différentes de critères négociables, elles obtiennent des scores globaux similaires ; et
- Les critères optionnels tels que les critères E et G, qui sont pertinents à l'évaluation seulement de certaines options sur l'ensemble d'options considérées. La formulation est alors telle que l'évaluation de ces critères n'affecterait le score que des options pour lesquelles ils s'appliquent.

Plutôt que sur la formulation du modèle d'agrégation, un plus grand effort est porté à la définition des critères de prise de décision. Un modèle sophistiqué peut en effet procurer une illusion de précision dans l'évaluation des critères, laquelle serait toutefois inutile si la décision est basée sur l'évaluation d'attributs inadaptés. Le défi est alors de définir les critères adéquatement, mais aussi de déterminer un nombre raisonnable de critères qui permettent de couvrir l'ensemble des problématiques majeures à la prise de décision. Comme l'ont fait remarquer Verbano et Nosella [137], la complexité des outils multicritères augmente rapidement avec le nombre d'alternatives et de critères à évaluer, ce qui implique par conséquent un plus grand investissement temporel de la part des décideurs.

Se penchant sur la définition des critères ou de l'ensemble de critères à considérer, l'on constate que peu nombreuses sont les publications qui en ont fait leur focus. On peut citer parmi les plus marquantes celle de Bouyssou [165] sur la formulation des critères, pour qui le critère doit (1) couvrir une problématique importante selon le point de vue des décideurs, (2) être associé à un indicateur représentatif de la problématique et qui soit (3) compris des décideurs, et être discriminatoire tout en tenant compte de la qualité des données utilisées pour le calcul de l'indicateur. À cet effet, Roy [166] suggère d'élaborer les critères en les construisant à partir de l'ensemble des conséquences possibles suite à la mise en œuvre des alternatives à comparer. Ceci nécessite donc d'identifier de manière exhaustive ledit ensemble de conséquences, ce qui est à l'opposé de l'approche suggérée par Keeney et Raiffa [154] pour qui l'élaboration des critères découle de la décomposition hiérarchique de l'objectif principal du problème de décision à plusieurs niveaux jusqu'à l'atteinte d'attributs mesurables.

Quoiqu'il en soit, les critères à évaluer forment un ensemble qui selon Roy et Bouyssou [167] devrait former une famille consistante. Elle aurait comme caractéristiques d'être (1) exhaustive mais (2) non redondante quant aux problématiques qu'elle couvre, (3) monotone dans le sens où les préférences partielles sont consistantes avec les préférences globales (si une option a est supérieure à une option b tous critères considérés, alors une option c jugée au moins équivalente à l'option a tous critères considérés devrait être supérieure à l'option b), (4) lisible de par un nombre manœuvrable de critères, et (5) opérationnelle, suite à l'approbation de l'ensemble de décideurs de la considérer comme une base fiable pour la prise de décision. Concernant notamment la lisibilité de l'ensemble de critères, ceux-ci ne devraient pas dépasser la dizaine considérant les limitations cognitives de l'esprit humain, qui est amené à effectuer le traitement de l'information et à réaliser des comparaisons afin d'établir des préférences entre les critères [165].

2.3.2 Choix des méthodes et bonnes pratiques de gestion du portefeuille

Le choix des méthodes et outils employés est largement tributaire de l'objectif sur lequel la compagnie met l'emphasis en ce qui est relatif à la gestion du portefeuille. Ces objectifs pouvant être antagonistes – la maximisation de la valeur du portefeuille n'assurant pas toujours son équilibre –, une hiérarchie entre les méthodes devrait naturellement s'établir selon l'objectif prioritaire. Cooper émet à cet effet des recommandations quant aux méthodes à adopter selon l'objectif [100] :

- Lorsque l'objectif est de maximiser la valeur du portefeuille, il est commun de se référer aux indicateurs économiques, en combinaison avec les méthodes d'évaluation du risque afin de tenir compte de l'incertitude associée aux modèles de calcul. L'utilisation des modèles de notation et des méthodes de prise ou d'aide à la décision multicritères est toutefois recommandée, afin de tenir compte des aspects autres qu'économiques qui peuvent accroître la valeur des projets dans le portefeuille.
- Lorsque l'objectif est d'obtenir un portefeuille équilibré, ledit équilibre est généralement défini par un paramètre, soit la portée des projets dans le temps, le profil de risque, ou encore le type d'innovation. L'appréciation de l'équilibre résultant du jugement d'un ou plusieurs décideurs, les outils de caractérisation graphique sont recommandés afin de faciliter ce jugement. Les axes utilisés sont alors représentatifs des paramètres d'équilibre établis, et peuvent également résulter de la combinaison des critères utilisés dans un modèle de notation.
- Lorsque l'objectif est d'aligner le portefeuille sur la stratégie de l'entreprise, l'utilisation de modèles de notation est recommandée afin d'assurer que les projets considérés sont en phase avec les objectifs établis. De plus, l'utilisation d'outils de caractérisation graphique permet d'établir une répartition optimale des ressources, afin d'assurer une cohérence avec les priorités stratégiques.

Deux enseignements majeurs peuvent être tirés des études portant sur les pratiques d'innovation des grandes firmes nord-américaines. D'abord, bien que les modèles économiques soient les outils de sélection les plus répandus (77% des firmes les utilisent et ils constituent l'outil dominant pour 40% d'entre elles), ce sont ceux qui mènent le moins bien à l'atteinte des objectifs de gestion du portefeuille [168]. Ceci est notamment dû au manque de données précises et fiables pour le calcul des indicateurs, surtout dans la FFE, au moment où sont prises les décisions stratégiques majeures. Ces outils sont bien souvent unilatéraux, et ne permettent pas de couvrir plusieurs perspectives de risques associés aux projets.

Il ressort également que les firmes qui performant le mieux en matière de NPD (1) ont tendance à employer les méthodes stratégiques et multicritères comme outils dominants de sélection dans la FFE, et (2) basent leurs décisions sur l'emploi d'en moyenne deux méthodes, près de la moitié d'entre elles en employant plus de trois. Diverses combinaisons de méthodes sont proposées à cet effet dans la littérature [169].

Dans tous les cas, le choix de la méthode et des outils est sensible à l'atteinte d'un compromis qu'il est nécessaire de trouver entre sophistication (requis afin que le modèle soit le plus représentatif des perspectives à considérer), et simplicité (requis pour assurer la compréhension et la collaboration sincère des acteurs).

2.3.3 Méthodes, outils, et critères de sélection dans les approches de NPD

Plutôt que d'essayer directement d'identifier le meilleur produit, les approches de conception procèdent généralement par élimination des options les moins prometteuses, jusqu'à isolation de celle qui apparaît au-dessus du lot. Pour ce faire, les approches de NPD revues à la section 2.1 ci-dessus mettent à contribution les méthodes et outils d'évaluation et de sélection de projets/produits de différentes manières; il en est de même pour les approches de définition du portefeuille de produits de bioraffinage à la section 2.2. L'utilisation des méthodes et outils dans le processus de sélection est revue ci-dessous, avec une emphase particulière sur les critères d'évaluation. On peut s'accorder avec Vincke [160] sur le fait que des trois éléments qui forment tout problème de prise de décision (l'ensemble des actions potentielles, l'ensemble des critères d'évaluation et l'ensemble des évaluations de performances des actions), l'ensemble des critères est le plus délicat à formuler. Il est clair qu'utiliser des critères inadéquats réduit considérablement les chances d'obtenir une solution qui se rapproche de l'idéal, même partant d'un ensemble prometteur d'options. On a également pu constater la place majeure qu'ont les critères d'évaluation aux *gates* sur l'ensemble du processus de NPD.

2.3.3.1 Évaluation et sélection dans les approches de NPD

Dans l'approche générale de conception de produit chimique proposée par Cussler et Moggridge [14], une fois que l'ensemble des idées de produit a été établi, le processus de tri pour l'identification des options les plus prometteuses s'effectue en deux grandes étapes. La première est essentiellement basée sur la pertinence des options au regard des objectifs de conception identifiés, et sur l'élimination des options redondantes ou pour lesquelles il est trivial qu'elles ne fonctionneront pas. Les besoins des consommateurs étant convertis en attributs du produit à concevoir, la considération des limitations physiques, chimiques, et thermodynamiques des idées proposées facilite le tri initial. Partant d'une centaine d'idées, cette première étape permettrait généralement de réduire ce nombre à environ une vingtaine. À la deuxième étape, une matrice d'indices de performance est utilisée afin de comparer les options retenues. Les indices représentent en général les divers attributs techniques, économiques, environnementaux, voire esthétiques, établis pour le produit. Ils peuvent être objectifs tels (1) l'efficacité d'un transfert de chaleur, (2) la pureté d'un effluent traité, ou (3) le coût estimé de production, comme subjectifs tels (1) la maturité scientifique, (2) le confort, ou (3) l'aisance d'utilisation. En somme, la première étape du tri peut être assimilée à l'utilisation d'une check-list, tandis que la seconde est analogue à l'utilisation d'un modèle de notation.

À l'opposé de cette approche, d'autres auteurs regroupent plutôt les attributs sous un critère unique par différentes fonctions les reliant, et appliquent des techniques d'optimisation pour la recherche des conditions favorisant l'atteint d'une solution idéale. Telle approche sert conjointement à la conception et à la sélection du produit [42-44].

Dans les approches de type stage-and-gate, Crawford et Di Benedetto [56] recommandent de principalement baser la décision sur les considérations d'alignement stratégique dans la FFE, puis d'évaluer les concepts de produit développés par une approche multicritères dans les étapes subséquentes. Pour ce faire, l'utilisation des matrices de caractérisation graphique est suggérée dans la FFE, utilisant comme dimensions des indices représentant les objectifs stratégiques, le type de produit, le profil de risque, ou encore la familiarité avec les technologies employées. Une matrice dite morphologique peut ensuite être utilisée pour la définition des compromis entre les attributs désirés du produit lors de sa conception, puis une matrice de perception qui en est une des représentations graphiques résultantes, facilite l'évaluation du produit.

Dans la configuration qu'il définit pour les *gates* dans les processus stage-and-gate de deuxième génération, Cooper recommande un protocole d'évaluation en quatre étapes [100]. La première se résume à un contrôle de la qualité des activités réalisées dans le *stage* précédent, dans le but de vérifier la présence de tous les livrables et l'exécution adéquate des tâches et activités qui y sont rattachées. À la deuxième étape, un ensemble de critères rigides sous forme de check-list est employé afin d'assurer que chaque projet atteint des standards minimum préalablement établis. Un manquement à l'un des critères de la liste pourrait entraîner le rejet du projet, le but étant à ce point d'éliminer les options qui de manière évidente apparaissent comme non-viables. La troisième étape voit l'emploi d'un ensemble de critères souples vis-à-vis desquels les projets sont évalués, dans le but d'établir un classement préférentiel entre eux. Le format utilisé pour l'évaluation est celui d'un modèle d'annotation, les poids des critères étant définis par le panel de décideurs au *gate*. La dernière étape permet enfin la priorisation entre les projets. Le classement établi est confronté à la disponibilité des ressources, lesquelles sont réparties entre les projets selon l'objectif de gestion du portefeuille. Le processus suivi aux deuxième et troisième étapes est analogue à celui suggéré par Cussler et Moggridge [14], appliqué au niveau plus détaillé des *gates* individuels.

Les tableaux 2.2 et 2.3 ci-dessous représentent respectivement un échantillon de critères rigides recommandés pour les Gates 1, 2 et 3 du processus stage-and-gate de deuxième génération [100], et les six critères le plus souvent utilisés à ces mêmes Gates dans l'industrie, tels que recensés par Schmidt [170].

Tableau 2.2: Critères rigides recommandés pour les Gates 1, 2 et 3

Critère
Alignement stratégique
Existence d'une opportunité de marché (volume minimal)
Faisabilité technique
Avantages du produit pour le consommateur
Respect des normes environnementales
Retour sur investissement positif relativement au risque
Existence d'éléments critiques de terminaison du projet (<i>showstoppers</i>)

Tableau 2.3: Top six des critères employés aux Gates 1, 2 et 3 dans l'industrie

Gate 1	Gate 2	Gate 3
Potentiel du marché	Faisabilité technique	Performances du produit
Alignement stratégique	Objectifs de vente	Objectifs de vente
Faisabilité technique	Performances du produit	Objectifs en terme de qualité
Objectifs de vente	Avantages du produit	Potentiel de profit
Avantages du produit	Alignement stratégique	Adoption par les consommateurs
Potentiel de profit	Retour sur investissement	Avantages du produit

Une adaptation du processus stage-and-gate de deuxième génération est assez pertinente à la problématique du présent projet; il s'agit de celle réalisée par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) dans le cadre de son programme de recherche et développement sur le biocarburants aux États-Unis [171]. On y retrouve une voie commerciale et une voie de recherche selon l'issue attendue des projets, lesquels sont évalués à chaque *gate* par un ensemble de 7 critères aux poids qui semblent être préétablis. L'ensemble de critères d'évaluation est résumé dans le tableau 2.4 ; toutefois, bien que l'on puisse en louer le caractère multidisciplinaire, l'on peut également déplorer l'absence d'indicateurs compréhensibles qui guideraient le lecteur dans les calculs ou les échelles d'évaluation des différents projets. De plus, si l'attribution de poids prédéfinis peut être adaptée à l'évaluation faite dans le cadre d'un programme gouvernemental, elle ne l'est pas nécessairement dans le cadre de compagnies forestières, où les décideurs attribueraient leur importance aux critères selon le contexte propre à la compagnie.

Tableau 2.4: Critères d'évaluation des projets de R&D sur les biocarburants, par le NREL

Critère	Éléments d'évaluation
Alignement stratégique	Résultats projetés du projet
Marché/Consommateur	Éventuels obstacles majeurs à la commercialisation
Faisabilité et risques techniques	Éléments probants de la faisabilité technique
Avantages compétitifs	Éléments de comparaison avec les alternatives existantes
Conformité légale et réglementaire	Lois et règlements en vigueur vis-à-vis de la technologie ou du produit
Facteurs critiques de succès	Liste des facteurs identifiés
Plan de travail et livrables	Plan préliminaire du projet, plan détaillé du <i>stage</i> suivant

2.3.3.2 Évaluation et sélection dans le domaine du bioraffinage

Tout comme c'est le cas pour les approches de NPD observées jusqu'à présent, trois méthodes semblent être le plus souvent employées pour la sélection de projets/produits et la prise de décision dans le contexte du bioraffinage : les méthodes mathématiques d'optimisation, les modèles de notation, et les méthodes multicritères MCDM/MCDA.

Les approches d'orientation technico-économique semblent plébisciter les deux premières méthodes. Bien que cela ne soit explicitement mentionné, la description de la procédure de sélection porte à penser que dans l'approche de Werpy et Petersen [125], un modèle de notation a été utilisé pour l'identification des dix dérivés de sucres et de gaz de synthèse les plus prometteurs. Le triage a été effectué en deux itérations dont les critères sont résumés dans le tableau 2.5 ci-dessous. Les méthodes d'optimisation sont employées dans les approches similaires à celle de Sammons et al. [120], qui a défini un modèle général d'optimisation du profit des bioraffineries. Il a ainsi défini un modèle linéaire, ayant pour variables les débits de production de produits donnés à partir d'une ressource spécifique, et les rendements des voies de conversion considérées.

Tableau 2.5: Critères employés pour le triage des dérivés de sucres et de gaz de synthèse

Itération 1 (de 300 à 30 options)	Itération 2 (de 30 à 12 options)
<ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de conversion en divers dérivés • Flexibilité de la biomasse menant au produit • Structure monomérique de C1 à C6 • L'état de « super commodité » 	<ul style="list-style-type: none"> • Alignement stratégique • Valeur du produit et des dérivés • Complexité technique des voies de conversion • Variété des dérivés et familles de dérivés

Les approches d'orientation stratégique recommandent quant à elles l'emploi de méthodes multicritères, qu'elles se limitent au classement des options en présence, ou qu'elles s'étendent à la représentation graphique des résultats de leur évaluation. Chambost et al. [129], Batsy et al. [132] et Clerc et al. [133] ont tous suggéré l'emploi d'outils de type MCDM pour la prise de décision relative aux options de bioraffinage, et diverses autres études dans le domaine en ont fait l'utilisation pour le triage d'options de bioraffinage. On peut notamment citer Papalexandrou et al. qui ont utilisé la méthode AHP pour l'évaluation d'un ensemble de 22 combinaisons procédé-produits associées aux biocarburants [172], ou plus récemment Niekamp et al. qui ont utilisé une méthode MAUT pour déterminer l'alternative de bioraffinage qui constitue le meilleur compromis entre des critères techniques, économiques, sociaux et environnementaux conflictuels, pour une décision durable [173]. Le tableau 2.6 ci-dessous donne un aperçu des critères employés dans diverses études pour l'évaluation des alternatives de bioraffinage, utilisant les outils MCDM [172-183].

Tableau 2.6: Critères MCDM utilisés pour l'évaluation des options de bioraffinage

Catégories	Critères
Technique, Technologique	<ul style="list-style-type: none"> • Matière première <ul style="list-style-type: none"> ▪ Compatibilité de la biomasse ▪ Flexibilité/variété de la biomasse menant au produit ▪ Potentiel d'obtention de divers produits • Procédé/technologie <ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque technologique ▪ Énergie consommée pour obtenir une unité de produit ▪ Intégration d'énergie ▪ Efficacité d'énergie ▪ Efficacité d'exergie ▪ Ratio d'énergie primaire utilisée ▪ Conformité aux règlements de santé et sécurité ▪ Fiabilité ▪ Maturité ▪ Opérabilité • Potentiel de substitution des produits existants
Économique	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement • Coûts d'opération et de maintenance • Ratio du coût de la matière première sur les coûts totaux de production • Ratio du coût de la matière première sur la valeur des produits • Coût additionnel de substitution des produits existants • Marge brute • Valeur actuelle des flux de trésorerie • Valeur actuelle des coûts totaux sur le cycle de vie • Valeur actuelle nette • Retour sur investissement, taux de rentabilité interne • Retour sur investissement, taux de rentabilité interne ajusté • Temps de recouvrement • Durée de vie utile
Compétitivité, Marché	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité de la biomasse • Diversification des produits/revenus • Intégration à un marché local • Volume du marché • Compatibilité du produit avec les infrastructures existantes
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Impact environnemental potentiel • Émissions de <ul style="list-style-type: none"> ▪ gaz à effet de serre (GES) ▪ CO₂ ▪ CO ▪ NO_x ▪ SO₂ ▪ particules fines ▪ composés organiques volatils non méthaniques

Tableau 2.6: Critères MCDM utilisés pour l'évaluation des options de bioraffinage (suite)

Catégories	Critères
Environnement (suite)	<ul style="list-style-type: none"> • Eutrophisation • Persistance d'une substance donnée (demi-vie) dans l'eau • Indice de valeur chronique d'une substance donnée • Réduction de la consommation d'eau douce • Ratio de consommation sur régénération de la matière renouvelable • Utilisation des ressources fossiles • Utilisation de l'eau • Utilisation des terres • Potentiel de réchauffement climatique • Effets sur la santé humaine • Quantité de déchets solides • Potentiel de réduction des déchets • Bruit
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Acceptabilité sociale • Création d'emplois • Nombre d'employés par volume des ventes nettes • Effets sur le prix des aliments • Bénéfices sociaux • Localisation des émissions polluantes • Fréquence des incidents/accidents déclarés (ou à déclarer) • Taux des accidents de travail mortels • Investissement dans des projets philanthropiques et de développement communautaire • Indice de développement humain

2.3.4 Analyse critique

Il semble que l'industrie ne tire pas pleinement profit de la large palette de techniques et outils que le domaine de la gestion du portefeuille de produits/projets a développé au fil des années. Les modèles économiques sont les outils les plus utilisés en général, et comme outil principal pour un grand nombre de compagnies dans l'industrie. Ils doivent notamment leur popularité à la facilité que les décideurs ont à les interpréter, malgré leur faible efficacité relativement aux objectifs de gestion de portefeuille, car ne permettent pas d'avoir une appréciation multidisciplinaire des risques associés aux produits/projets évalués. D'ailleurs, les compagnies qui performent le moins bien en NPD ont tendance à se fier presque exclusivement aux modèles économiques, tandis que les meilleurs élèves se fient en moyenne à plus de deux méthodes, avec une préférence pour les méthodes stratégiques et multicritères [169].

Ce type de méthodes se prête adéquatement au cadre de la prise de décision relative aux alternatives de bioraffinage dans la FFE. Sachant qu'un nombre considérable d'alternatives pourrait être généré selon le contexte, il serait judicieux de s'inspirer de l'approche de triage en deux étapes de Cussler et Moggridge [14] qui s'avère être efficace et pratique, afin d'adapter la prise de décision dans le processus stage-and-gate. Une évaluation multidisciplinaire est requise aux *gates* successifs du NPD, laquelle repose sur l'usage de critères adéquats pour l'appréciation des alternatives de bioraffinage.

Concernant plus spécifiquement la nature des critères employés pour l'évaluation des alternatives de bioraffinage, l'on peut noter que bien qu'elle est souvent mentionnée comme un facteur majeur de succès, la compétitivité n'est pas subséquentement représentée ou alors elle ne l'est qu'implicitement. De même, les critères relatifs au marché se limitent bien souvent aux informations de base telles que l'existence d'une opportunité ou la valeur marchande des produits, mais des critères avancés représentant par exemple le potentiel de pénétration ou de maintien sur les marchés font défaut.

Enfin, outre dans le cas de publications faisant rapport de l'emploi des outils MCDM, il est rare que les auteurs divulguent les indicateurs qui sont utilisés aux fins d'évaluation des critères de prise de décision définis. Qu'ils se rapportent à une équation arithmétique ou à une échelle d'évaluation d'attributs qualitatifs, les indicateurs sont gardés secrets, au détriment de la clarté du processus de prise de décision dont auraient pu s'inspirer les acteurs de l'industrie forestière.

2.4 Synthèse de la revue de la littérature

La problématique principale de la présente thèse est celle de l'implantation du bioraffinage dans et par les compagnies forestières, papetières en particulier, dans le but d'accomplir une transformation stratégique de leur modèle d'affaires. Il est attendu que cette transformation passe par la diversification de l'offre de produits proposée par ces compagnies, laquelle diversification s'accompagne de plusieurs défis.

- La viabilité économique des technologies de bioraffinage reste à prouver. Peu sont celles qui ont le niveau de maturité souhaité pour assurer une production à l'échelle commerciale, et les investissements projetés pour atteindre une économie d'échelle s'annoncent substantiels.
- Le choix des produits par lesquels concrétiser la diversification est complexe, la biomasse forestière offrant une très grande variété de dérivés chimiques. De plus, ce choix ne se résume pas qu'à celui du produit, plutôt des combinaisons procédé-produits qui offriraient les meilleures perspectives de réussite.
- La conversion de la biomasse résulte généralement en un portefeuille de produits plutôt qu'en un produit unique, lesquels doivent tous être considérés lors de la définition des stratégies de bioraffinage.
- L'intégration d'une dimension de gestion de risque est primordiale à la définition des stratégies de bioraffinage. Plusieurs perspectives d'incertitude (technique, économique, stratégique, et environnementale entre autres) doivent être considérées, autant pour réduire le risque d'échec que pour éventuellement accroître les chances de succès de la transformation.
- L'implantation du bioraffinage doit permettre d'améliorer la compétitivité des compagnies forestières, et ce même si elles pénètrent des marchés auxquels elles sont peu familières. L'identification autant que la sélection des stratégies de bioraffinage devraient tenir compte de cette inévitable réalité.

À cet effet, la revue de la littérature effectuée dans les sections qui précèdent a couvert trois champs d'intérêt, à savoir: les approches de conception et de développement de nouveaux produits, la définition d'un portefeuille de produits de bioraffinage, et les méthodes et outils qui supportent la prise de décision dans ces approches.

2.4.1 Lacunes dans le corps des connaissances

L'analyse critique des références revues a permis de faire ressortir trois éléments majeurs en lien avec la problématique du présent projet de recherche.

Toute compagnie forestière qui envisagerait d'implanter le bioraffinage aurait une multitude d'options à considérer, les méthodes permettant d'identifier les combinaisons biomasse-procédé-produit(s) étant principalement exploratoires. Il ressort par conséquent le besoin de développer une approche permettant de réduire de manière systématique le nombre d'alternatives à l'étude à celles qui seraient les plus pertinentes au contexte de la compagnie forestière concernée.

Concernant le processus de NPD, les approches de type stage-and-gate apparaissent comme étant les plus appropriées de par l'atténuation du risque qui leur est intrinsèque, et la perspective multidisciplinaire des activités réalisées dans les *stages*. Le processus classique de deuxième génération tel que défini par Cooper apparaît toutefois limité en ce qui a trait au développement de plateformes de produits, et n'est donc pas typiquement appliqué pour la mise en place de transformations stratégiques profondes qui généreraient des portefeuilles multi-produits. Ainsi, il est nécessaire pour le contexte de l'implantation du bioraffinage d'en définir une adaptation qui convienne à l'identification, la sélection, et le développement d'alternatives impliquant des portefeuilles multi-produits.

Il est anticipé que l'attention se porte principalement sur la FFE, soit en amont du Stage 3, Développement. En effet, la différence majeure entre le développement d'un produit unique et celui d'un portefeuille multi-produits est attendue dans la formulation de la stratégie et du modèle d'affaires soutenant ce développement. De ce fait, les étapes en aval du Stage 3 devraient être quasiment similaires à celles associées au développement d'un produit unique, faisant ainsi de la FFE le centre d'attention principal de l'adaptation à effectuer.

En ce qui concerne enfin la prise de décision aux *gates* du processus stage-and-gate, l'utilisation de modèles économiques est encore prédominante dans l'industrie comme méthode principale de sélection, bien que ceux-ci ne permettent pas d'obtenir l'appréciation multi-perspectives du risque qui est primordiale à l'évaluation des alternatives de bioraffinage. L'approche de prise de décision à considérer pour l'identification des alternatives préférentielles de bioraffinage doit pouvoir corriger cette anomalie. En outre, le besoin persiste de développer des critères représentatifs des perspectives de marché et de compétitivité, qui s'avèrent être sous-représentées vis-à-vis des perspectives économique, technologique et environnementale, dans les précédentes études ayant porté sur l'évaluation d'alternatives de bioraffinage.

2.4.2 Hypothèses

En lien avec la problématique de la diversification de produit dans le cadre de l'implantation du bioraffinage, l'hypothèse principale émise pour le présent projet de recherche se résume comme suit :

La considération d'approches d'implantation par phases des alternatives de bioraffinage et l'emploi de critères représentant la proposition de valeur et le potentiel d'atténuation des risques qui y sont associés dans des méthodes de prise de décision à critères multiples (MCDM) permettraient d'adapter les processus de type stage-and-gate pour l'identification et le triage des alternatives préférentielles de bioraffinage dans les étapes initiatrices du processus de conception.

Les sous-hypothèses supportant cette hypothèse principale sont les suivantes :

1. L'emploi de critères de type showstopper reflétant les motivations et les barrières propres à la compagnie qui envisage l'implantation du bioraffinage au premier *gate* d'un processus de type stage-and-gate permettrait de réduire le grand nombre d'alternatives possibles à un nombre plus gérable.
2. Les sources majeures de risque associées aux portefeuilles de produits de bioraffinage peuvent être identifiées lorsque ceux-ci sont implantés de manière séquentielle. Des stratégies d'implantation par phases peuvent ainsi être considérées dans le processus stage-and-gate pour une évaluation plus adéquate des alternatives de bioraffinage impliquant des portefeuilles multi-produits.
3. Il peut être démontré que des préférences entre les alternatives de bioraffinage sont établies de manière effective au second *gate* d'un processus de type stage-and-gate par l'évaluation de la proposition de valeur et des risques potentiels (incluant nécessairement des perspectives de marché et de compétitivité) associés à chaque alternative. Des critères représentant la valeur et le risque peuvent ainsi être définis et interprétés à l'aide d'une méthode MCDM pour l'identification des alternatives préférentielles.

CHAPITRE 3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Afin de répondre à la problématique principale du présent projet de recherche, une méthodologie en quatre sections a été définie en lien avec les objectifs associés aux hypothèses de recherche sus émises. Leur validation repose sur la réalisation d'études de cas portant sur le développement du bioraffinage, la première en contexte forestier dans laquelle l'approche est intégralement exécutée, et l'autre en contexte agricole dont le rôle est principalement d'éprouver les résultats obtenus et de valider les améliorations apportées au processus stage-and-gate en vue du développement d'alternatives de bioraffinage. Les sections qui suivent présentent le détail des étapes de la méthodologie du projet, ainsi qu'une brève description des études de cas.

3.1 Méthodologie du projet de recherche

L'analyse critique des approches de NPD de type stage-and-gate a permis de faire ressortir l'importance majeure des *gates* dans la formulation du processus de NPD. Les activités et tâches dans un *stage* donné étant prédéfinies en fonction des livrables requis au *gate* suivant, une attention particulière a été portée à l'élaboration de la prise de décision à effectuer aux *gates* de la FFE avant d'en définir la configuration stage-and-gate complète. Celle-ci se reflète dans les étapes de la méthodologie, dont le détail en terme d'activités a épousé les contours d'un processus de triage à deux *gates* des alternatives de bioraffinage, lesquels sont séparés par les études menant à la définition des critères qui y sont employés. La Figure 3.1 ci-dessous présente une perspective d'ensemble de la méthodologie du projet de recherche, ainsi que les publications qui ont découlé de la réalisation des activités relatives aux études de cas. La Figure 3.2 présente ensuite une version plus détaillée de la méthodologie, et explicite le lien avec les hypothèses de recherche.

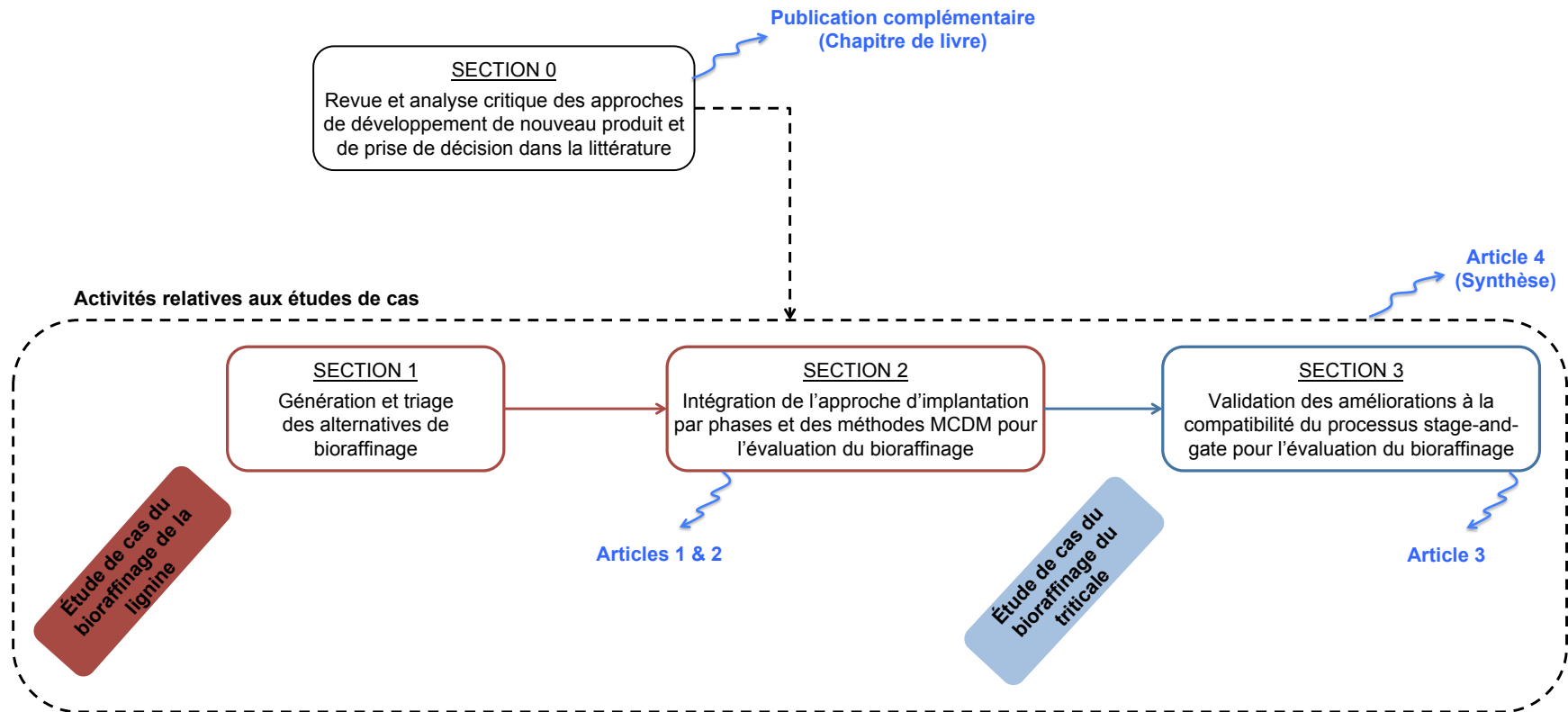


Figure 3.1 Vue d'ensemble de la méthodologie du projet de recherche

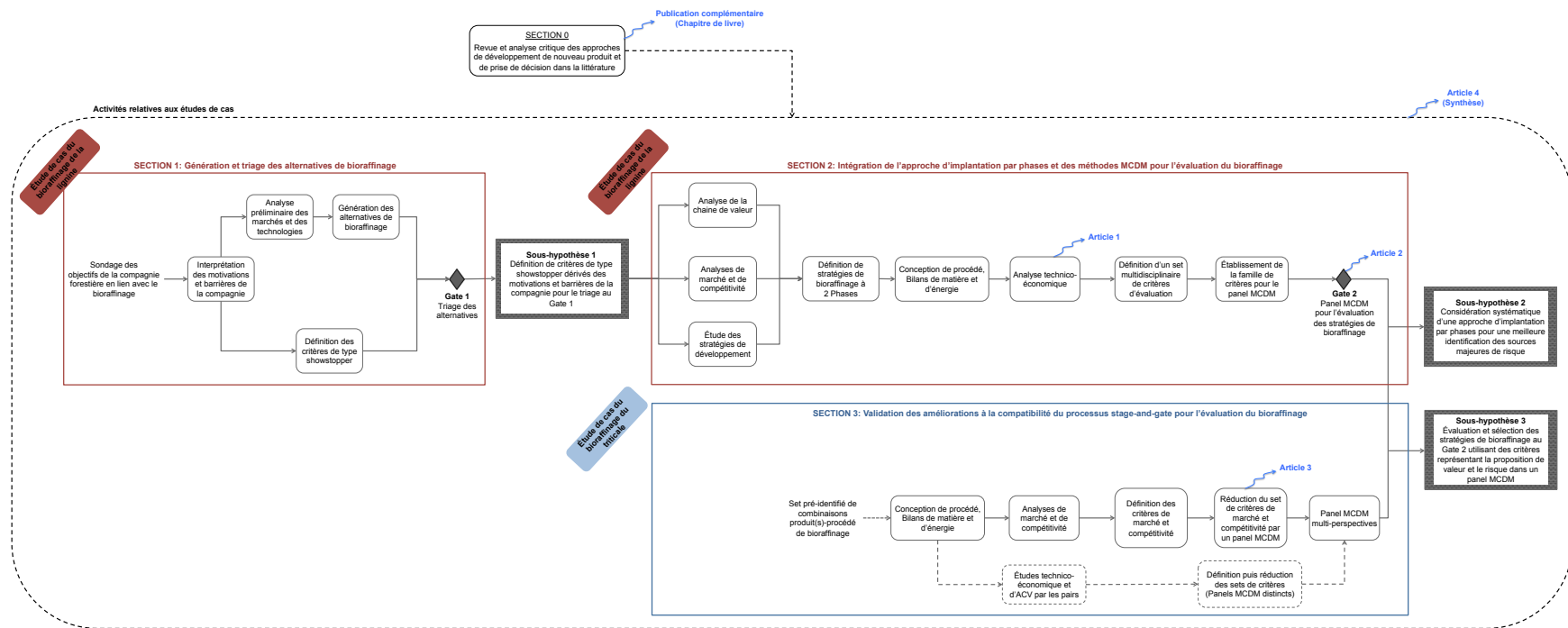


Figure 3.2 Vue détaillée de la méthodologie du projet de recherche

3.1.1 Génération et triage des alternatives de bioraffinage

Cette section de la méthodologie est définie en alignement avec le premier sous-objectif du projet de recherche, portant sur la réduction de l'ensemble initial d'opportunités de bioraffinage envisagées par la compagnie forestière, tenant compte des spécificités de son contexte de transformation. Tel qu'illustré par la Figure 3.3, elle s'articule principalement autour de :

- La réalisation d'un sondage aux fins de clarification des objectifs de la compagnie en matière de bioraffinage, notamment de la place que celui-ci doit jouer dans son plan stratégique à long terme ;
- Les analyses interne (de la compagnie) et externe (des marchés et des technologies) menant à la génération des alternatives de bioraffinage ; et
- La définition des critères de triage à employer au Gate 1 sous la forme de showstoppers.

Les personnes ciblées par le sondage sont les dirigeants du département chargé de mener l'implantation du bioraffinage dans la compagnie. On a compté parmi les répondants deux membres de la direction du département, le directeur de l'usine impliquée dans l'étude, ainsi que le surintendant chargé du contrôle des opérations et de l'installation des nouvelles technologies. Le but de sondage est de permettre la compréhension de l'orientation stratégique de la compagnie dans la transformation qu'elle envisage, en particulier l'importance que devrait prendre le bioraffinage dans la vision globale à long-terme, vis-à-vis du secteur d'activité courant d'activités de la compagnie. Les questions portaient entre autres sur les objectifs, la vision à court et à plus long terme, les motivations, les contraintes, et les progrès entrepris jusque là.

Tandis que l'analyse interne a principalement couvert les atouts technologiques, stratégiques et d'accès à la biomasse du site sélectionné par la compagnie pour abriter la bioraffinerie, l'analyse externe s'est résumée en une vaste revue de la littérature sur les dérivés de la lignine et leurs applications d'une part, et sur les procédés d'extraction et de conversion d'autre part. Cette revue a notamment couvert les procédés d'extraction à partir de bois, mais aussi de liqueur noire, qui s'est avérée être une source prometteuse présente dans le procédé en place. De cette revue a résulté l'identification de facteurs permettant de distinguer les opportunités identifiées selon l'horizon dans lequel il serait plus réaliste d'estimer qu'elles seraient accessibles.

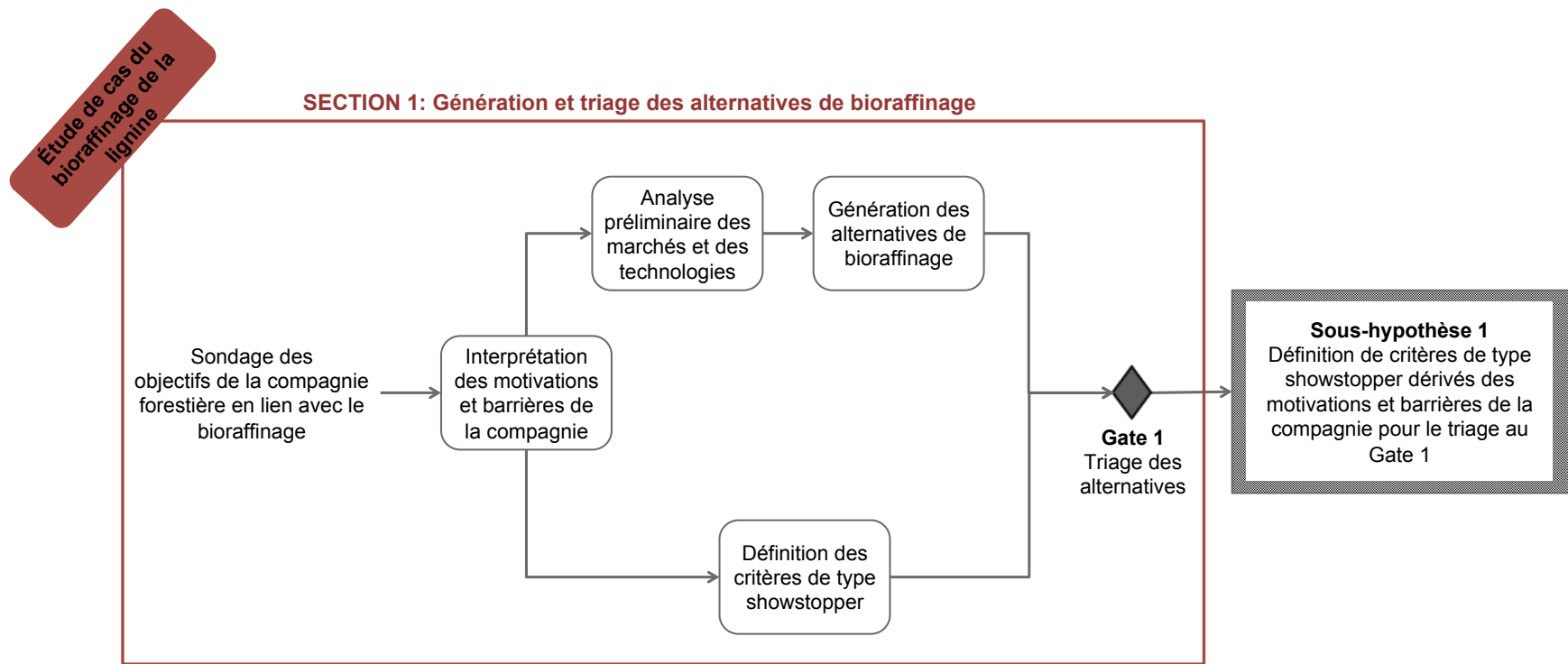


Figure 3.3 Section 1 de la méthodologie du projet de recherche

L'approche définie pour le développement des critères pour le Gate 1 se veut inspirée du triage en deux étapes tel que défini par Cussler et Moggridge [14] et appliqué à la sélection de concepts de produit chimique. Si en se basant sur la redondance et la pertinence des idées émises la première étape de tri permet effectivement d'éliminer deux tiers des idées listées, alors l'on peut espérer obtenir pareille efficacité en adaptant l'approche au contexte d'implantation dans une compagnie forestière.

Dans cette optique, la définition des critères pour cette première phase de triage prend sa source dans le sondage réalisé auprès des personnes sélectionnées dans la compagnie. Ceci passe par l'interprétation des objectifs à court-, moyen- et long-terme exprimés par la compagnie en vue de sa transformation, mais également des implications de certains besoins ou contraintes que la compagnie s'impose, ou qui s'imposent à elle de par sa situation. Qu'elles soient exprimées de manière explicite ou non, le but est de comprendre les axes majeurs de pertinence au contexte propre à la compagnie ainsi que les critères qui s'en dégagent, et de déterminer par la même occasion les seuils de satisfaction desdits critères.

Le triage initial est alors exécuté par l'emploi des critères de manière stricte, le non-respect du seuil de passage de l'un d'entre eux entraînant le rejet de l'alternative concernée, qui serait jugée non-viable vis-à-vis des objectifs en matière de transformation que la compagnie forestière aura formulé. L'évaluation des alternatives de bioraffinage est basée sur les informations recueillies des analyses préliminaires des produits, des marchés, et des technologies dans la littérature. L'élimination des alternatives non-viables est réalisée par le même panel de personnes ressources qui aura été constitué pour le sondage.

Au sortir de ce premier jalon de prise de décision, il convient de vérifier la validité de la sous-hypothèse de recherche #1. Pour ce faire, l'on évalue dans un premier temps l'efficacité de l'emploi des critères définis à la réduction du nombre d'alternatives identifiées ; puis l'on analyse dans l'ensemble retenu la présence d'alternatives qui pour des raisons évidentes seraient jugées non-viables, mais n'auraient pas été éliminées suite à l'emploi des critères définis.

3.1.2 Intégration et validation des modifications au processus stage-and-gate

L'adaptation du processus stage-and-gate à l'évaluation des alternatives de bioraffinage concerne les sections 2 et 3 de la méthodologie, qui répondent conjointement aux trois derniers sous-objectifs du projet de recherche ; le second sous-objectif qui porte sur la considération d'une approche d'implantation par phases des portefeuilles de produits de bioraffinage étant relié à la seconde sous-hypothèse de recherche, et les sous-objectifs 3 et 4 relatifs à l'amélioration de la prise de décision étant reliés à la dernière sous-hypothèse. La Figure 3.4 clarifie ces liens, et les activités associées.

3.1.2.1 Définition et analyse des stratégies de bioraffinage

Dans le but d'évaluer l'impact de la considération d'une approche d'implantation séquentielle des alternatives de bioraffinage dans un processus stage-and-gate, des plans d'implantation par phases sont définis de manière systématique pour les combinaisons produit(s)-procédé retenues au sortir du Gate 1 dans le cadre de l'étude de cas de la lignine, alors que les combinaisons formées pour la seconde étude de cas sont considérées tel quel, sans implantation séquentielle. Le terme « stratégie » plutôt qu'« alternative » de bioraffinage est alors employé pour caractériser les combinaisons produit(s)-procédé-plan d'implantation faisant la particularité des options de bioraffinage de la première étude de cas.

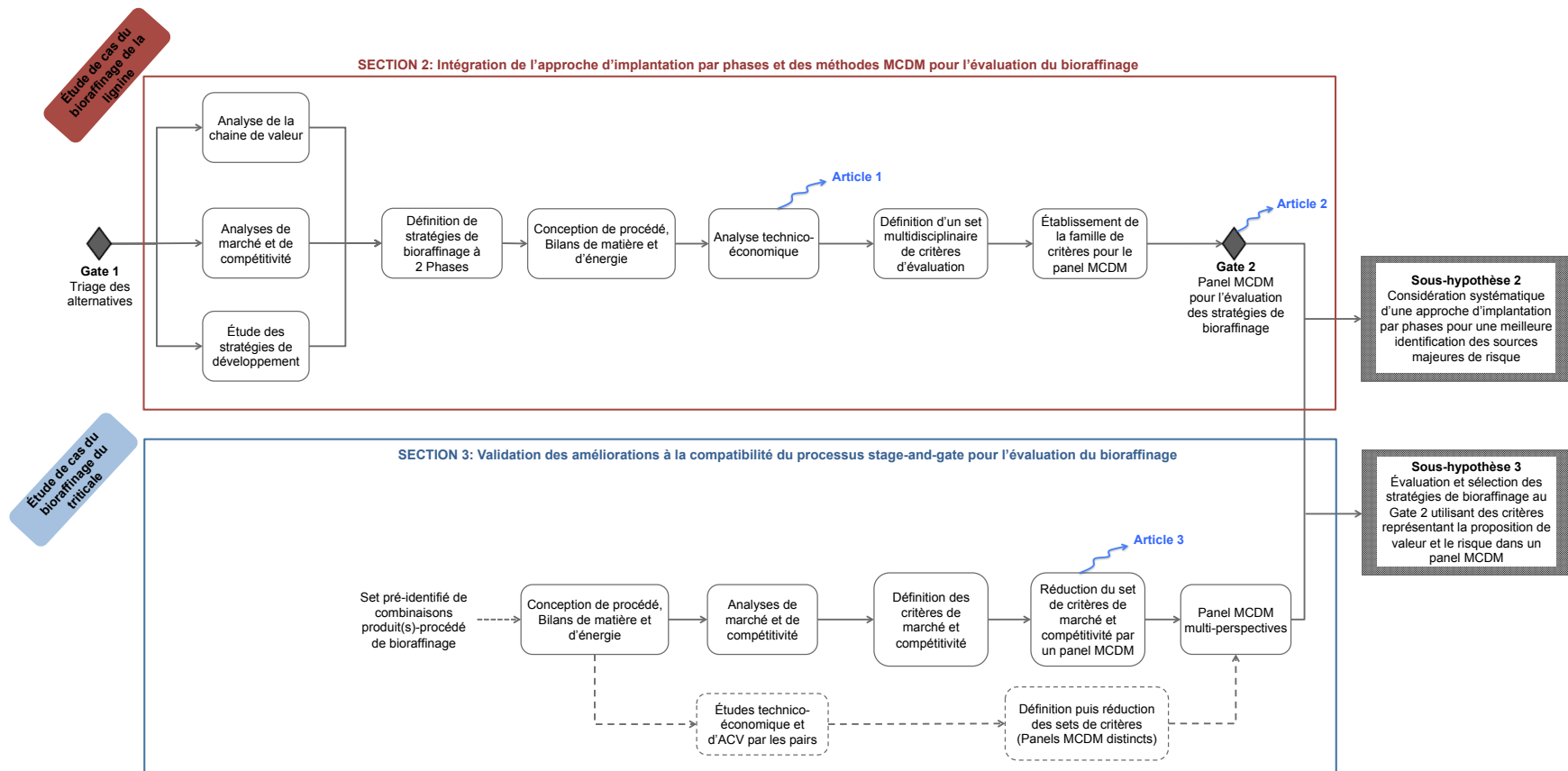


Figure 3.4 Sections 2 et 3 de la méthodologie du projet de recherche

Un processus itératif a été suivi en collaboration avec les dirigeants de la compagnie forestière, afin de valider que les stratégies définies étaient des expressions fidèles de la vision stratégique envisagée par la compagnie. La définition des plans d'implantation a ainsi reposé sur trois éléments majeurs à savoir : la position occupée par la compagnie forestière sur la chaîne de valeur du produit ciblé à chaque phase de la stratégie, le potentiel de part de marché associé à ladite position, et le mode de développement stratégique adopté par la compagnie afin de passer d'une phase à une autre (voir Figure 2.9). La mise en place de ces éléments pouvant grandement varier selon l'envergure de la transformation envisagée par la compagnie forestière, deux visions stratégiques ont été considérées pour l'étude de cas. La première est orientée-usine et a pour objectif l'amélioration de la compétitivité de l'usine hôte de la bioraffinerie, alors que la seconde est orientée-entreprise et recherche un impact plus significatif en termes de diversification des revenus à l'échelle de la compagnie. Tandis que la première s'accentuerait autour de voies de réduction de coûts et de création opportuniste de nouveaux flux de revenus, la deuxième viserait plutôt la plus grande capacité de production possible et une pénétration agressive des segments de marché où le plus de valeur pourrait être générée. Pour ce qui est des modes de développement entre les phases, ceux-ci se résument au choix entre les approches d'intégration horizontale et verticale selon que la compagnie veuille diversifier son portefeuille de produits en gardant la même position sur la chaîne de valeur, ou alors qu'elle désire avoir un meilleur contrôle sur les coûts [184].

Ont ensuite suivi les analyses permettant d'établir les potentiels d'atténuation de risque et de création de valeur associés aux stratégies définies. Alors qu'elles se sont limitées aux analyses de marché et technico-économique pour le bioraffinage de la lignine, elles ont été complétées par une analyse de cycle de vie (ACV) pour l'aspect environnement dans le cas du bioraffinage du triticales. Dans ce deuxième cas, les travaux du présent projet se sont limités aux analyses de marché et de compétitivité, alors que les analyses technico-économique et d'ACV ont été réalisées par des pairs.

L'analyse de marché a consisté en une large revue d'informations pour chaque produit constituant les portefeuilles des alternatives de bioraffinage définies. Ces informations incluaient notamment :

- Les projections des volumes de production, de consommation, et de demande sur les marchés mondial en général, et nord-américain en particulier;
- Les concurrents existants, les capacités de leurs unités de production, et les projections en terme de futures constructions;
- Les variations historiques de prix sur les marchés;

Les variations historiques des prix des matières premières ont également été recensées pour les estimations des coûts de production de chacune des stratégies. Il a été primordial, notamment dans le cas de la lignine, d'atteindre une bonne compréhension des éléments relatifs à la compétitivité des produits de bioraffinage à introduire sur les marchés ciblés.

Dans le cadre de l'étude de cas sur le bioraffinage du triticales, l'analyse de marché a été complétée par un sondage auprès de différents experts de l'industrie dans le but d'obtenir des informations relatives aux avantages compétitifs et à la définition d'une proposition de valeur pour les stratégies de bioraffinage, telles que :

- Les caractéristiques standard ou celles attendues par les clients pour les produits visés sur le marché;
- Les dynamiques sur la chaîne de valeur;
- Le potentiel de partenariat; ou encore
- Le potentiel d'obtenir un premium avec un produit vert.

L'analyse technico-économique dans le cadre de l'étude de cas du bioraffinage de la lignine a été réalisée par :

- L'emploi de la méthode d'analyse des unités majeures¹⁶ [185] pour la réalisation des bilans de matière et d'énergie ;
- L'estimation des coûts d'investissement sur la base des coûts estimés des équipements majeurs ;
- L'estimation des coûts d'opération suivant des heuristiques usuels de conception ; et
- La validation des résultats économiques obtenus avec les partenaires industriels impliqués dans l'étude.

Dans le but de faciliter la communication du concept aux membres du panel de décision, les plans d'implantations n'ont été constitués que de deux phases. La première cible l'atténuation des risques technologiques, et la seconde permet la mise en place du portefeuille de produits visé pour le long-terme, concentrant ainsi les risques de marché. Des analyses effectuées, les sources majeures de risque résiduel sont identifiées, selon les différentes perspectives considérées. En découle l'élaboration d'une liste exhaustive d'indicateurs représentant le potentiel d'atténuation de risque associé aux stratégies de bioraffinage, à chacune des phases d'implantation. Sont également développés des indicateurs représentant le potentiel de création de valeur, via l'identification des facteurs critiques de succès en lien avec la compétitivité et le marché.

3.1.2.2 Établissement de l'ensemble de critères de décision pour le Gate 2

La définition de la famille de critères pour la première étude de cas résulte de l'évaluation des critères pris individuellement, puis de l'ensemble obtenu à la suite d'un premier raffinement. Cette évaluation s'est appuyée sur les propriétés recommandées dans la littérature pour définir adéquatement les critères de décision, et pour obtenir des familles consistantes de critères [165,167].

¹⁶ Traduction libre de *large-block analysis*.

Dans un premier temps, une banque de critères a été constituée en regroupant différents indicateurs issus de recherches dans la littérature, et ceux développés à la suite des analyses réalisées au cours de l'étude de cas. Elle a ensuite été complétée par des critères suggérés par la compagnie forestière, correspondant à ceux qui sont généralement évalués par la direction de la compagnie pour l'approbation de projets d'une envergure comparable à celle des stratégies de bioraffinage définies.

Le triage des critères s'effectue globalement en deux phases, la première se résumant à la réduction du nombre de critères, tandis que la seconde s'attèle à l'amélioration de la famille composée des critères retenus. Le but au terme des deux phases est d'obtenir un ensemble qui tout en étant minimal, serve convenablement les objectifs de la prise de décision. L'évaluation des critères individuels puis de la famille de critères est effectuée par le panel de décideurs en amont de l'atelier de prise de décision. Le processus est séquentiel et itératif, tel qu'illustré par la Figure 3.5.

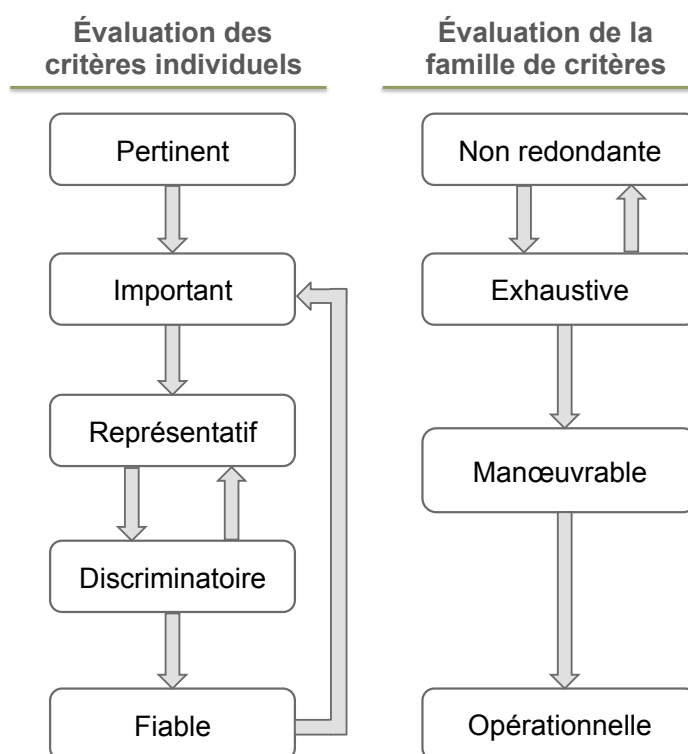


Figure 3.5 Méthodologie pour l'établissement de l'ensemble de critères pour le panel MCDM

L'évaluation des critères débute par la caractéristique de pertinence, qui consiste à déterminer si la problématique soulevée par le critère est d'intérêt dans le contexte de la prise de décision à effectuer. À titre d'exemple, cette première caractéristique entraînerait l'élimination de critères servant à la sélection de la meilleure localisation du site pour une nouvelle bioraffinerie, lesquels seraient pertinents dans un contexte d'implantation neuve (de type greenfield), mais pas en retrofit.

Vient ensuite la caractéristique d'importance, pour lesquels un jugement est posé quant au besoin de considérer la problématique soulevée par le critère à cette étape du processus de développement des stratégies de bioraffinage. On ne parlerait alors pas d'élimination des critères à ce point (ce qui insinuerait que la problématique n'est pas importante), mais plutôt de report de son évaluation à une étape plus avancée du processus stage-and-gate. Ceci serait le cas par exemple de critères servant à l'évaluation des partenaires potentiels ou des stratégies de gestion de la chaîne logistique qu'il n'est pas adapté de considérer si tôt dans le processus de NPD, le portefeuille de produits de bioraffinage n'étant pas encore établi.

Les aspects représentatif et discriminatoire des critères individuels sont évalués conjointement, car tous deux reliés à la définition pratique et au métrique du critère. La définition pratique d'abord, est comparée à la définition idéale afin d'évaluer si telle que formulée elle est suffisamment représentative de la problématique associée par le critère. Le jugement bien que subjectif de cette facette pourrait toutefois entraîner une modification de la définition pratique, notamment en ce qui concerne les hypothèses posées et les scénarios considérés pour le calcul du métrique. Évaluer le caractère discriminatoire revient ensuite à anticiper si les valeurs attendues du métrique seraient assez distinctes pour que s'établissent des relations de préférence entre les stratégies de bioraffinage définies. Cette évaluation s'appuie sur l'observation de la formulation du métrique et des données impliquées dans son calcul, sans que ce dernier ne soit effectivement effectué. Différentes itérations peuvent alors survenir, au cas où la définition pratique ou la formulation du métrique aurait besoin d'être améliorée.

Enfin, la caractéristique de fiabilité du critère porte sur l'évaluation par le panel de décision des informations, données et hypothèses employées pour le calcul du métrique. La non-satisfaction de la caractéristique amènerait à questionner de nouveau l'importance de considérer le critère à cette étape du processus de développement, voire d'en modifier les hypothèses ou la base de calcul. Cette dernière étape d'évaluation des critères individuels permet dans une certaine mesure au panel de décideurs de vérifier la crédibilité des travaux exécutés dans le *stage* précédant.

Les critères restants à ce point forment par défaut la famille qui est évaluée lors de la seconde phase de triage. L'évaluation ayant été réalisée jusqu'ici sans égard aux possibles interactions et complémentarités entre les critères, la première caractéristique d'évaluation de la famille vise logiquement à éliminer les redondances entre eux. Ceci revient à identifier les chevauchements entre les problématiques soulevées par les critères, et à juger le cas échéant des effets de l'élimination d'un des critères concernés sur la prise de décision à effectuer. On peut anticiper qu'un certain nombre de critères pourraient être écartés à cette étape, notamment ceux qui sont des extensions ou des déclinaisons d'un critère fondamental. L'exemple peut être pris de la VAN et du TRI. Cette première caractéristique est intimement liée à la seconde, l'exhaustivité de la famille, car après avoir éliminé certains critères, il convient d'assurer que la famille résultante continue de couvrir les problématiques d'importance pour la prise de décision de manière adéquate.

La caractéristique suivante qui porte sur le côté manœuvrable de la famille s'attarde quant à elle sur le nombre de critères la constituant. Un effectif de l'ordre de 6 à 8 critères est jugé préférable, ce qui pourrait amener à devoir astucieusement combiner plusieurs critères couvrant des problématiques proches les unes des autres sous un critère unique. Le cas échéant, le panel serait alors amené à déterminer la façon la plus appropriée de combiner les sous-critères afin que le critère résultant respecte les caractéristiques évaluées lors de la première phase de triage. Le caractère discriminatoire est particulièrement sensible à cette combinaison, selon que les sous-critères sont reliés par addition, multiplication, ou par l'attribution d'une pondération spécifique. Il n'y a théoriquement aucune limite à la formulation mathématique du nouveau métrique, cependant sa complexité n'assure pas toujours qu'il soit représentatif de la problématique ciblée.

La dernière caractéristique d'évaluation consiste à établir que la famille de critères est opérationnelle, c'est-à-dire que l'ensemble des membres du panel de décision s'accorde sur le fait qu'elle représente une base convenable pour la prise de décision à cette étape du processus stage-and-gate. Il est question d'assurer un consensus et un accord définitif du panel quant à la constitution de l'ensemble de critères ; en d'autres termes, les définitions et métriques des critères ne pourront plus être modifiés par le panel, et seront évalués tels quels. Il est attendu que l'évaluation de cette caractéristique fasse office de formalité si tous les membres du panel ont activement participé à toutes les étapes de triage précédentes.

À l'opposé de cette méthodologie, le triage des critères dans le cadre de l'étude de cas sur le bioraffinage du triticales a été réalisé via une série d'ateliers MCDM séparés, un pour chacune des perspectives d'analyse des stratégies définies. Au cours de ces ateliers intermédiaires, les objectifs étaient d'identifier (1) les critères les plus importants, jugés comme nécessaires à la prise de décision selon la perspective concernée, et (2) un ensemble minimal mais suffisant pour représenter les problématiques clés de la perspective, dans le contexte de l'étude. En ont donc résulté trois ensembles de critères pour les perspectives économique, environnementale, et de compétitivité (pour des besoins de fluidité, uniquement le terme compétitivité a été conservé dans l'étude pour faire référence à la catégorie marché et compétitivité). L'atelier MCDM final a employé les ensembles réduits de critères de chaque perspective.

3.1.2.3 Panels MCDM pour l'évaluation des stratégies définies

L'intégration de panels MCDM pour l'évaluation réalisée au Gate 2 s'aligne avec le troisième sous-objectif du présent projet de recherche, qui vise l'amélioration de la prise de décision dans le processus stage-and-gate. Les ateliers réunissant des critères de différentes perspectives, leur exécution et l'analyse de l'importance des critères relatifs aux problématiques de marché et de compétitivité vis-à-vis des critères d'autres catégories, ont contribué à l'atteinte du dernier sous-objectif.

Dans le cadre de l'étude de cas du bioraffinage de la lignine, alors que le triage préliminaire des alternatives de bioraffinage a été effectué uniquement par des dirigeants de la compagnie forestière, l'atelier MCDM tenu pour la différenciation des stratégies définies a rassemblé des représentants de toutes les partenaires industriels impliqués à ce point d'avancement de l'étude de cas. Il a ainsi impliqué un total de six participants, soit deux managers du département chargé du développement des produits de bioraffinage et un comptable de la compagnie forestière, un représentant de l'entreprise de développement de technologies partenaire dans le projet, et deux consultants experts dans le domaine du bioraffinage, sur invitation de la compagnie forestière.

Dans le cadre de l'étude de cas du bioraffinage du triticales, un panel de décideurs identique a été reconduit pour la conduite de toute la série d'ateliers, dans le but d'uniformiser la compréhension des alternatives de bioraffinage et des critères, et de conserver la même tendance d'appréciation de l'importance des différentes problématiques par le panel. Il a été composé de cinq participants provenant des milieux industriel et universitaire, et ayant des affiliations aux domaines du bioraffinage, de la conception de procédé, de la gestion de l'environnement, et du développement et du management des affaires.

Pour tous les ateliers de prise de décision réalisés, le format suivi est le suivant :

- Un pré-atelier de deux heures est premièrement tenu, au cours duquel les résultats des analyses des différentes perspectives sont présentés au panel de décision, puis sont introduits les critères suggérés pour la prise de décision. Le but du pré-atelier est de familiariser les membres du panel avec les stratégies de bioraffinage à l'étude, d'assurer une bonne compréhension des analyses réalisées, et d'obtenir leur approbation quant à la constitution de l'ensemble de critères ; puis
- L'atelier de prise de décision proprement dit est organisé sur une journée entière. Les activités phares y sont l'interprétation des résultats de l'évaluation des critères, et la session d'échange-et-compromis¹⁷ pour l'obtention des poids des critères.

¹⁷ Traduction libre du terme *trade-off*.

Au cours de ces diverses activités, le candidat endosse essentiellement le rôle de modérateur de séance. À ce titre, il est chargé lors du pré-atelier de l'introduction des alternatives/stratégies à l'étude, de la présentation des résultats des études effectuées lors de la réalisation de l'étude de cas concernée, et de l'introduction de l'ensemble de critères suggéré pour la prise de décision. Il guide ensuite le panel pour l'exécution du processus de sélection de l'ensemble de critères à employer lors de l'atelier final, en alignement avec les étapes présentées à la Figure 3.5. La sélection des critères est réalisée par le panel de décision, le candidat s'assurant que les caractéristiques d'évaluation individuelle des critères puis de la famille de critères sont bien comprises d'une étape à l'autre.

Lors de l'atelier de prise de décision qui suit, le candidat est chargé de la présentation du protocole d'exécution pour la prise de décision, de la présentation des résultats obtenus de l'évaluation des critères, ainsi que d'animer les discussions du panel dans le but d'assurer une compréhension uniforme des résultats et de faciliter l'atteinte d'un consensus entre les membres du panel. Ceci l'amène notamment à demander aux membres du panel de justifier leur interprétation des critères, leurs prises de position et changements d'opinion, de même qu'à entretenir un débat sain et équilibré. Tel rôle requiert un certain savoir-faire. Le candidat n'a concrètement aucune influence directe sur la pondération des critères ou sur la décision finale du panel, mais est garant du bon déroulement du processus.

L'agrégation des préférences des membres du panel vis-à-vis des critères a été réalisée par l'emploi d'une méthode MAUT, puis le score de chaque stratégie a été calculé par une somme pondérée des valeurs des fonctions d'utilité obtenues à partir de ses performances lors de l'évaluation des critères de décision. Le calcul est détaillé par l'équation suivante :

$$\text{Score}_{\text{stratégie } i} = \sum_{j=1}^N w_j \times u_j(x_i) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

où N est le nombre de critères, w_j est le poids obtenu par un critère j donné suite aux discussions du panel, u_j est la fonction d'utilité associée au critère j , et x_i est la valeur obtenue de l'évaluation du critère j pour une stratégie i donnée.

Dans cette méthode, les poids à attribuer aux critères ont été déterminés par l'entremise d'une activité d'échange-et-compromis entre les membres du panel de décision. Elle consiste premièrement à la détermination du critère le plus important dans le contexte de la prise de décision, ainsi qu'une valeur cible représentant selon la perspective du panel la performance désirable pour tout projet de bioraffinage vis-à-vis de ce critère, indépendamment du contexte. Un consensus sur le critère le plus important et sur la valeur cible associée est nécessaire à cette étape. Il est ensuite demandé aux membres du panel de comparer chaque critère individuellement avec le critère le plus important, en établissant de combien chacun d'eux accepterait de perdre en performance sur le critère le plus important afin d'améliorer la performance sur le critère avec lequel il est comparé. Les valeurs ainsi recueillies sont assemblées afin de déterminer, par un calcul matriciel, le poids d'importance de chaque critère.

À la lecture des scores globaux des stratégies et du classement obtenus, les membres du panel de décision sont amenés à analyser les forces et les faiblesses des stratégies, les facteurs déterminant leur potentiel global d'atténuation de risque et de création de valeur, et ainsi à identifier de manière consensuelle les stratégies qu'elles rejetteraient, celles qu'elles admettraient au *stage* suivant du processus de NPD, et le cas échéant, celles qu'elles garderaient en observation sur liste d'attente, au cas où les circonstances deviendraient favorables à ce qu'elles soient reconsidérées. La réalisation de ces activités de prise de décision dans les deux contextes d'études de cas considérés permet de vérifier la validité à la fois des sous-hypothèses #2 et #3.

En ce qui concerne la seconde sous-hypothèse, la définition des alternatives et stratégies de bioraffinage avec et sans la considération d'une approche d'implantation par phases donne lieu à des critères de prise de décision qui fournissent une certaine appréciation des risques associés aux stratégies. L'hypothèse voulant que les risques soient mieux cernés lorsqu'une approche d'implantation séquentielle est considérée, la représentativité du risque dans l'un et l'autre cas est laissée à l'appréciation des membres du panel de décision, qui l'exprimerait alors à travers l'interprétation contextuelle des critères de prise de décision. Il a été jugé plus approprié dans le cadre du présent projet de recherche de soumettre l'appréciation du risque au panel décisionnel plutôt qu'au candidat, car aussi rationnelle que puisse être son évaluation du risque, l'établissement des préférences entre les alternatives/stratégies à l'étude découle ultimement de la perspective que les membres du panel décisionnel se font du risque.

Pour ce qui est enfin de la sous-hypothèse #3, sa validité est testée en deux étapes. Il convient premièrement d'établir l'identification effective de stratégies préférentielles suite à l'emploi de l'ensemble multidisciplinaire de critères dans un outil MCDM, avant de vérifier la perpétuelle nécessité de considérer les perspectives de marché et de compétitivité lors de la prise de décision relative aux stratégies de bioraffinage. Ce dernier volet revient concrètement à examiner (1) le classement des critères individuels de la catégorie, (2) le positionnement global de la catégorie parmi les critères les mieux classés, de même que la contribution à la prise de décision à travers (3) les poids des critères individuels et celui de la catégorie vis-à-vis des autres perspectives, et le cas échéant, (4) le rôle des critères de la catégorie relativement à l'établissement d'une distinction entre des alternatives aux scores globaux semblables. Ces éléments de test de la validité de la sous-hypothèse #3 sont envisageables indépendamment de la considération d'approches d'implantation séquentielle des alternatives de bioraffinage, car dans les deux contextes d'étude de cas des ensembles multidisciplinaires de critères sont employés pour la prise de décision au second *gate* de la FFE.

3.2 Introduction des études de cas

3.2.1 Développement du bioraffinage dans une compagnie forestière

La première étude de cas s'inscrit dans le contexte d'une compagnie nord-américaine offrant une variété de produits forestiers incluant du bois de construction, du bois d'œuvre, des panneaux contreplaqués, ainsi que de la pâte et du papier. La compagnie s'est engagée dans un processus de diversification de son portefeuille de produits par le bioraffinage, utilisant l'une de ses usines de production de pâte située en Alberta comme site de lancement avant éventuellement d'étendre la stratégie à d'autres usines.

L'usine choisie pour l'étude de cas a une capacité de production d'environ 1500 tonnes sèches de pâte de résineux par jour, et emploie un procédé kraft pour la conversion des copeaux de bois. D'autres éléments caractérisent également la situation de l'usine :

- La compagnie possède une scierie sur le site, aux abords de l'usine de pâte. La scierie en est la principale source de copeaux, lesquels sont alimentés par un convoyeur ;
- La compagnie possède également une vaste zone d'aménagement forestier sur une distance de transport aller-retour de 6 heures en camion, dont toute la production de résineux est dédiée aux opérations de la scierie et de l'usine de pâte. Les coupes actuelles de feuillus sont incidentes, et ne sont pas utilisées par la compagnie. Selon les estimations, la capacité maximale d'un éventuel procédé de bioraffinage pourrait atteindre 3000 tonnes vertes par jour (~ 50% d'humidité) ;
- Le lessiveur produit environ 2500 gallons par minute de liqueur noire à 79°C, avec une teneur en solides de 19%, parmi lesquels 71% sont des solides organiques ;
- L'usine est auto-suffisante du point de vue de sa consommation d'énergie. On y dénombre :
 - Deux chaudières de récupération et une chaudière à biomasse en opération normale, de même qu'une chaudière à gaz utilisée en cas de maintenance ;
 - Une turbine à contre-pression (dite *back-pressure turbine*) et une autre à extraction double (dite *dual-extraction turbine*) ;
- Les installations de traitement d'eaux usées en places sont utilisées à plus de 85% de leur capacité.

En plus de la compagnie forestière, l'étude de cas a été menée en collaboration avec deux fournisseurs canadiens de technologie de bioraffinage. Leur rôle a principalement été d'apporter leur expertise à la validation des calculs de conception de procédé effectués, notamment les bilans de matière et d'énergie, ainsi qu'à l'estimation des coûts des équipements et des coûts d'opération des procédés sélectionnés pour l'étude.

L'objectif de l'étude de cas relativement au projet de recherche était d'éprouver les hypothèses émises dans l'optique de déduire à travers ces activités tests, une méthodologie de conception pour l'identification des stratégies préférentielles dans la FFE des initiatives de bioraffinage. Du point de vue de la compagnie forestière partenaire, les objectifs dans l'étude se résumaient à : (1) identifier les opportunités de bioraffinage les plus pertinentes et les plus susceptibles de réussir considérant son contexte, (2) identifier les facteurs critiques de compétitivité et les intégrer à la définition des stratégies de bioraffinage, et (3) déterminer un ensemble de critères permettant de distinguer les stratégies entre elles, qui puissent éventuellement être utilisés pour le suivi du développement des stratégies préférentielles retenues dans les étapes subséquentes du NPD.

3.2.2 Étude des possibilités de bioraffinage du triticales

Cette deuxième étude de cas s'inscrit quant à elle dans un contexte d'exploration de matières premières viables pour le développement industriel de procédés de bioraffinage en Alberta. Elle a été réalisée à une période de plein essor du bioraffinage de première génération dans la région concernée, où l'utilisation populaire du blé pour la production de biocarburants était de plus en plus décriée. Le triticales (*X Triticosecale Wittmack*) qui est un hybride de blé et de seigle, apparaît comme une alternative prometteuse car il n'est pas destiné à la consommation par l'humain (donc n'entre pas en conflit avec l'industrie alimentaire). Il a de plus le potentiel de croître sur des terres marginales¹⁸ tout en ayant un meilleur rendement que le blé, ce qui accroît son attractivité pour une éventuelle production à l'échelle industrielle.

¹⁸ Les terres marginales sont des terres à faible rendement, qui ne sont généralement pas utiles pour l'agriculture.

L'étude de cas a fait partie d'une initiative plus large couvrant différentes perspectives du développement du bioraffinage basé sur le triticales, sous la houlette du réseau Canadian Triticale Biorefinery Initiative (CTBI). Son objectif principal était de développer l'utilisation à grande échelle du triticales comme matière première de choix dans une optique (1) de production durable d'énergie et d'une variété de produits, et (2) de diversification des activités économiques des communautés rurales en Alberta, puis au Canada en général. En tant que ramification du réseau, les objectifs de l'étude de cas étaient d'identifier un ensemble de critères de prise de décision qui expriment de manière adéquate les problématiques reliées à la compétitivité des stratégies de bioraffinage du triticales. Les études complémentaires des aspects économiques et environnementaux ont également été réalisées dans le réseau CTBI.

Trois plateformes de produits ont été établies pour l'étude de cas selon les principaux types de dérivés possibles du triticales. Il s'agit de (1) la plateforme des biocarburants avec l'éthanol comme produit principal, (2) la plateforme des biochimiques avec l'acide polylactique (PLA) comme produit principal, et (3) la plateforme des biomatériaux avec un mélange d'amidon thermoplastique (TPS) et de PLA comme produit principal. L'étude considère l'implantation d'une bioraffinerie de type greenfield dans la région de Red Deer, qui convertirait à la fois les graines et la paille de triticales, pour une utilisation optimale de la ressource.

CHAPITRE 4 SYNTHÈSE DES TRAVAUX

4.1 Présentation des publications

Les travaux réalisés dans le cadre du présent projet de recherche ont résulté en la rédaction de quatre articles, lesquels ont été soumis dans des journaux scientifiques. Ces derniers sont présentés dans les annexes A à D dans l'ordre suivant :

- Article 1: C. Dikko Téguia, R. Albers, et P. Stuart, Analysis of Economically-viable Lignin-based Biorefinery Strategies Implemented within a Kraft Pulp Mill, Soumis à *TAPPI Journal* ;
- Article 2: C. Dikko Téguia, S. D'Amours, R. Albers, et P. Stuart, Decision-Making Process for the Identification of Preferred Lignin-Based Biorefinery Strategies, Soumis à *TAPPI Journal* ;
- Article 3: C. Dikko Téguia, V. Chambost, et P. Stuart, Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Market competitive analysis for business model development, Soumis à *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* ; et
- Article 4: C. Dikko Téguia, S. D'Amours, et P. Stuart, Adapting Stage-and-Gate Methodology for Retrofit Implementation of the Forest Biorefinery, Soumis à *European Journal of Innovation Management*.

Outre les articles, une publication complémentaire est également incluse dans l'annexe E. Il s'agit d'un chapitre de livre publié sous la référence

- Chapitre de livre: C. Dikko Téguia, V. Chambost, S. Sanaei, S. D'Amours, et P. Stuart, Strategic Transformation of the Forest Industry Value Chain, in S. D'Amours, M. Ouhimmou, J. Audy, et Y. Feng (2016) *Forest Value Chain Optimization and Sustainability*, CRC Press/Taylor & Francis.

La Figure 4.1 ci-dessous présente les liens entre les publications, de même que les hypothèses de recherche qui sont associées au contenu de chacun des articles.

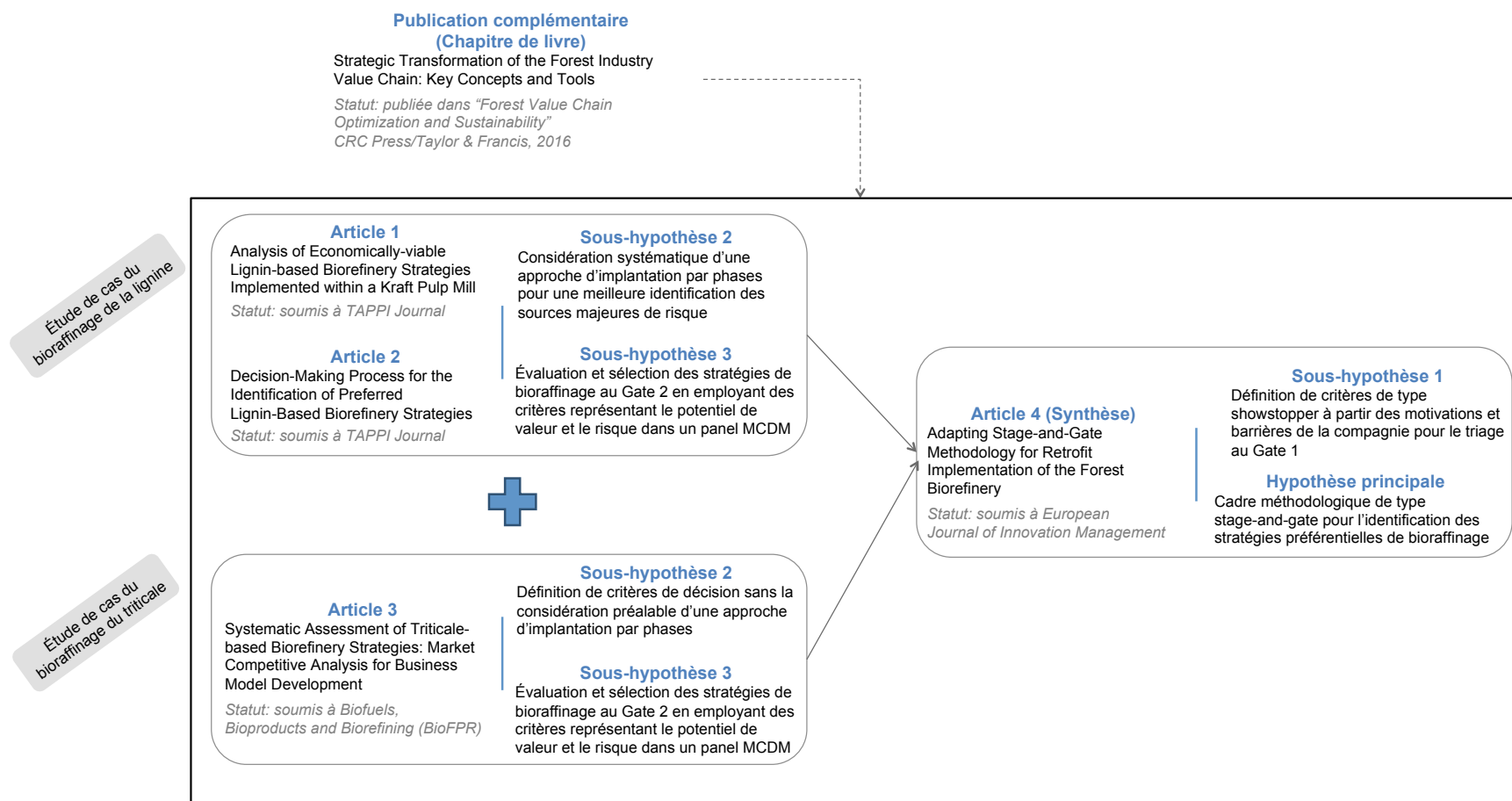


Figure 4.1 Liens entre les publications, et avec les hypothèses de recherche

Le chapitre de livre présente les différents concepts issus de la revue de la littérature relativement à la transformation stratégique que l'implantation du bioraffinage dans les compagnies forestières implique. Il couvre notamment l'approche d'implantation par phases du portefeuille de produits de bioraffinage, les interactions entre les plans technologique et d'affaires, les analyses de marché et de compétitivité relatives à la définition d'une proposition de valeur, et l'application des méthodes multicritères pour l'évaluation des alternatives de bioraffinage. Dans la seconde partie du chapitre, un premier développement relatif à l'approche méthodologique pour l'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage est effectué, posant ainsi les fondations des réflexions qui ont mené à l'analyse des problématiques couvertes dans les différents articles. Les concepts et les outils introduits dans le chapitre sont ainsi revus dans les articles, et employés dans les études de cas qu'ils présentent.

L'article 1 fait rapport des résultats de l'analyse technico-économique réalisée dans le cadre de l'étude de cas du bioraffinage basé sur la lignine. Il met notamment en lumière les enjeux de l'implantation d'une unité de bioraffinage en retrofit dans une usine de production de pâte kraft existante. L'article 2 est une extension de l'analyse introduite dans l'article 1, avec une base d'hypothèses quelque peu différente pour la situation de l'usine. Il présente principalement l'évaluation et la sélection des stratégies, avec une plus grande emphase sur l'établissement de l'ensemble de critères et les résultats des activités de prise de décision.

L'article 3 présente quant à lui les travaux relatifs aux analyses de marché et compétitivité réalisées dans le contexte du bioraffinage basé sur le triticales, en mettant l'accent sur la définition et l'évaluation de l'ensemble de critères de décision associé à cette perspective. Les résultats qui y sont présentés contribuent à l'appréciation de l'importance de cette catégorie de critères vis-à-vis de critères économiques et environnementaux.

La synthèse du processus de conception dans la FFE est enfin réalisée dans l'article 4. Il présente une vue complète du processus de prise de décision ayant supporté l'identification des stratégies préférentielles dans le cadre du bioraffinage basé sur la lignine, donnant forme à l'approche méthodologique développée dans le présent projet.

La synthèse présentée dans les sections qui suivent suit la séquence des activités réalisées pour la validation des hypothèses de recherche, en alignement avec la méthodologie présentée dans le chapitre précédent. L'emphasis est premièrement mise sur les étapes menant à la génération puis à la réduction des alternatives considérées pour une éventuelle implantation dans la compagnie forestière de la première étude de cas, dans la section 4.2. La conversion des alternatives retenues en stratégies par la définition de plans d'implantation séquentielle est résumée dans la section 4.3, qui couvre également l'analyse technico-économique des stratégies définies, et la génération des critères d'évaluation de celles-ci. L'issue du panel MCDM qui a vu l'utilisation des critères est ensuite présentée dans la section 4.4. Enfin, la section 4.5 résume les travaux menés dans le cadre du développement d'une bioraffinerie de type greenfield basée sur le triticales. L'emphasis y est notamment mise sur les perspectives de marché et de compétitivité, avant que ne soient présentés les résultats du panel d'évaluation multidisciplinaire.

4.2 Génération et triage des alternatives pour une implantation en retrofit

4.2.1 Interprétation et implications des motivations et barrières

La première étude de cas a été réalisée dans le contexte de l'implantation du bioraffinage dans une compagnie forestière nord-américaine. À cet effet, l'étape de démarrage du processus de conception consistait à clarifier les objectifs de transformation de la compagnie, notamment en ce qui était du rôle du bioraffinage vis-à-vis du secteur principal d'activité, et de sa place dans la vision stratégique à long-terme. Ceci a été effectué par le biais d'entrevues de personnes ressources dans la compagnie, au cours desquelles les éléments suivants ont été exprimés :

- L'intérêt premier de la compagnie est d'accroître et de diversifier les revenus de ses usines de production de pâte à papier. Aucune cible n'a cependant été explicitement établie par la direction à cet effet.
- La qualité et la quantité de pâte produite par l'usine doivent absolument être préservées afin de respecter les contrats de livraison en vigueur.
- La compagnie ne voit présentement aucun intérêt à augmenter sa production de pâte, et souhaite se focaliser sur la valorisation de la lignine. Elle désire ainsi mettre à profit la présence de liqueur noire dans son procédé kraft de mise en pâte, qui en est une bonne source potentielle.
- La compagnie est favorable à l'établissement de synergies avantageuses entre la future bioraffinerie et ses autres actifs dans le secteur de la valorisation du bois.
- La compagnie aimerait pouvoir implanter la bioraffinerie dans un délai de 2 à 3 ans.
- Bien qu'ambitieuse, la compagnie reste peu encline à accroître son endettement, ni à consentir à des investissements considérables sans apport extérieur de capitaux.

L'implantation du bioraffinage à l'usine de production de pâte revêt donc un rôle principalement économique pour la compagnie. On ne saurait toutefois ignorer le volet stratégique incarné par le souci de perpétuer sa culture d'intégration verticale et de contrôle des coûts, la compagnie possédant à la fois des espaces de forêt, des scieries et des usines de production de panneaux, soit une présence d'un bout à l'autre de la chaîne de valeur. L'absence de cible quant aux performances des nouveaux produits laisse le champ libre à l'exploration de diverses alternatives de bioraffinage, mais ne permet cependant pas d'établir un critère concret de triage de celles-ci.

À l'opposé, un certain nombre de contraintes se dégagent des éléments exprimés par la compagnie. La première, majeure, est reliée à la préservation intacte de la ligne de production de pâte. Ceci implique notamment que (1) le courant de liqueur noire est la seule véritable source de nouveaux produits de bioraffinage du procédé existant, tout autre courant pouvant affecter la qualité de la pâte, et (2) l'exploitation éventuelle des feuillus présents dans la zone d'aménagement forestier de la compagnie doit se faire dans une ligne parallèle à la ligne de production de pâte afin d'éviter d'affecter la qualité de la pâte, qui est uniquement faite de résineux.

De plus, la compagnie ayant fait de la lignine sa plateforme centrale pour le développement de la stratégie bioraffinage, les produits issus d'autres plateformes à l'instar de celle de dérivés de sucres (extractibles du bois additionnel en forêt) sont considérés comme des compléments au produit principal dérivé de lignine. En même temps que cela simplifie le processus de sélection en restreignant l'exploration d'alternatives aux dérivés de lignine, le revers de la médaille est la mise à l'écart a priori d'opportunités de produits qui auraient pu être prometteuses.

La réticence de la compagnie à l'investissement ne constitue pas un véritable frein, mais est plutôt symptomatique de la frilosité actuelle du secteur papetier vis-à-vis du risque. Cela donne toutefois comme indication que les stratégies développées devraient inclure des voies d'atténuation de risque, notamment à travers la création de partenariats et la sollicitation de subventions gouvernementales pour l'implantation des procédés de bioraffinage.

Enfin, le délai établi par la compagnie pour l'implantation de la nouvelle unité impose deux contraintes. D'une part, les technologies d'extraction de la lignine envisagées devraient avoir été prouvées à une échelle comparable à celle qui définie pour l'unité à intégrer à l'usine. D'autre part, l'usage de la lignine ou de ses dérivés devrait avoir été validé pour les applications envisagées, afin de faciliter l'entrée sur le marché des nouveaux produits une fois l'unité de bioraffinage en opération.

L'analyse des points ci-dessus a ainsi permis d'établir deux critères de triage des alternatives de bioraffinage, à savoir :

- La maturité de l'usage de la lignine pour une application donnée, soit à la fois celle des technologies employées et le niveau de performances atteint par la lignine ou ses dérivés en vue de la substitution des produits existants.
- Le potentiel de créer un avantage compétitif distinctif à partir de la lignine de type kraft, en comparaison avec les autres types de lignine déjà présentes dans l'industrie.

Ces critères étant utilisés comme showstoppers pour les fins du triage initial, la non satisfaction de l'un d'entre eux entraîne le rejet de l'alternative concernée.

4.2.2 Génération des alternatives de bioraffinage

La génération d'alternatives de bioraffinage pertinentes au contexte de la compagnie papetière a reposé sur la recherche dans la littérature de deux dimensions entrevues pour la définition des stratégies, soit (1) les marchés et les applications de la lignine ainsi que de ses dérivés, et (2) les technologies existantes et en développement permettant l'extraction de la lignine et sa conversion dans le but de satisfaire une application donnée. Par anticipation de la définition à venir de plans d'implantation par phases de la stratégie de bioraffinage, les facteurs permettant de catégoriser l'usage de la lignine ou de ses dérivés pour une application donnée en opportunité immédiatement accessible ou alors à envisager à plus long terme, ont été analysés. Il s'agit notamment (1) du potentiel de marché associé à l'application, (2) de l'état d'avancement de la technologie de conversion de la lignine, (3) du potentiel de substitution des produits actuels par la lignine ou ses dérivés (exprimé sur une base massique vis-à-vis du produit remplacé), et (4) des performances obtenues avec les produits utilisant la lignine en substitution partielle ou totale d'un des composants vis-à-vis des attentes fixées par les performances des produits actuels.

Holladay et al. [126] présente une revue étendue des applications pour lesquelles la lignine est utilisée dans l'industrie, tandis que Smolarski [186] et Gosselink [187] fournissent une revue plus récente, avec une emphase sur le niveau substitution et le potentiel de marché des dérivés de lignine. De ces revues, il ressort que les sources potentielles de lignine sont variées, mais trois principaux types sont présents dans l'industrie à savoir, les lignines kraft et Organosolv issues des procédés du même nom, et la lignine lignosulfonate extraite de procédé de mise en pâte au bisulfite. Ce dernier type est le plus répandu, MeadWestvaco en étant le principal producteur.

L'usage le plus commun de la lignine dans l'industrie est fait à l'intérieur même des procédés de mise en pâte, où elle est brûlée dans la liqueur noire pour la production de vapeur et d'électricité. En outre, les lignosulfonates sont le plus souvent employés comme agents plastifiants dans la production de béton et comme additifs de ciment et de bitume, où ils permettent une réduction de la quantité d'eau requise ainsi qu'une plus grande dureté. Les autres applications où l'on retrouve l'emploi de lignosulfonates incluent la production de vanilline, de diméthyl-sulfide (DMS) et de diméthylsulfoxyde (DMSO), le craquage de carbone, et l'usage en tant que dispersant agricole et agent liant dans la nourriture animale. Le marché pour ces différentes applications est toutefois assez faible, et les lignines kraft et Organosolv y ont un potentiel réduit, étant donné la place déjà acquise par la lignine lignosulfonate.

Les recherches dans les dernières années concernant l'usage des lignines kraft et Organosolv se sont plutôt focalisées sur l'isolation de phénol et de ses dérivés (notamment le bisphénol A, le caprolactame et les BTX), la production d'adhésifs tels les résines phénoliques, d'isolants tels les mousses polyuréthanes, de charbon activé et de fibres de carbone, et comme ingrédient pharmaceutique. De ces applications le remplacement de phénol dans les résines et de polyols dans les mousses polyuréthanes sont les plus avancés. La littérature fait part de propriétés physiques et adhésives comparables entre les résines commerciales et celles utilisant de la lignine jusqu'à 25% de remplacement de phénol sans modification de la lignine [188]. Des performances comparables ont également été validées à un taux de substitution de phénol de 30% voire 40% lorsqu'un prétraitement tel que la phénolation est appliqué à la lignine [189,190], d'autres auteurs ayant atteint des taux de substitution supérieurs à 50% en laboratoire [126,191]. Dans la production de mousses polyuréthanes, la lignine est utilisée comme substitut de polyols, les taux de substitution atteignant 20% avec de la lignine non-modifiée. Des configurations impliquant jusqu'à 30% de lignine ont été testées, mais l'augmentation de la viscosité due à la présence de lignine demeure un obstacle à la fabrication [187].

Les taux de substitution les plus élevés peuvent être atteints dans le cas du remplacement de polyacrylonitrile (PAN) comme précurseur dans la production de fibres de carbone. Le choix du précurseur s'avère être grandement dépendant du mode de filage utilisé, l'opération étant sensible aux propriétés thermoplastiques du matériau, notamment les températures de décomposition et de transition vitreuse. Ainsi, le taux de substitution a été validé à 50% lorsque le filage humide ou à sec est employé, et une substitution totale peut être atteinte lorsque c'est le filage par fusion qui est employé [192]. Pour ce dernier cas, la lignine kraft a besoin d'être prétraitée en raison de la présence d'impuretés provenant du procédé kraft, alors que la lignine Organosolv peut être employée sans modification [193]. Quoiqu'il en soit, les performances des fibres de carbone obtenues à partir de lignine ne sont pas encore satisfaisantes pour les applications priorisant les performances mécaniques (le remplacement de composantes métalliques dans l'industrie automobile par exemple) [194]. Cette application en particulier fait l'objet d'un intérêt marqué de la communauté scientifique, en raison de l'énorme potentiel de réduction de coûts si le PAN (qui contribue environ à la moitié des coûts de production actuels de fibre de carbone) pouvait être remplacé par la lignine qui est beaucoup plus abordable [195].

La compatibilité d'un type de lignine pour une application donnée ne dépend pas seulement de sa biomasse d'origine, mais aussi (et surtout) du procédé par lequel la lignine passe afin d'être isolée. Étant données les transformations physiques et/ou chimiques qu'elle subit, il est quasiment impossible d'obtenir la lignine telle qu'elle est à l'état naturel dans la biomasse. Du point de vue industriel, l'on peut séparer les techniques et technologies d'extraction de la lignine en deux grands groupes selon que l'on tente de l'isoler directement de la biomasse, ou alors d'un courant dans un procédé industriel existant (la liqueur noire par exemple). Une revue étendue de la littérature relative aux procédés d'extraction de la lignine est présentée dans l'annexe A. Pour les besoins de la synthèse dans cette section, il convient de mentionner que pour le contexte de l'étude de cas, les procédés de fractionnement à base de solvant tel que le procédé Organosolv [196] ont été retenus pour l'extraction de la lignine à partir du bois, et que les techniques de précipitation par acidification telles qu'utilisées dans les procédés Lignoboost™ [197] et LignoForce™ [198] ont été retenues pour l'extraction de la lignine à partir de la liqueur noire.

Mettant en commun les informations recueillies dans la littérature sur le niveau actuel d'adoption de la lignine pour ses applications potentielles et sur les technologies d'extraction et de conversion de la lignine, il a convenu de classer dans la catégorie d'alternatives envisageables à court et moyen terme les applications reliées à l'utilisation de la lignine dans la production d'énergie, dans la fabrication de résines phénoliques et de mousses polyuréthanes, ainsi que les applications pour lesquelles la lignine lignosulfonate est déjà commercialisée. On retrouve donc essentiellement dans cette catégorie toutes les applications pour lesquelles l'emploi de la lignine a été prouvé. La catégorie d'alternatives envisageables à plus long terme inclut quant à elle les applications pour lesquelles la lignine servirait à la production de charbon activé et de fibres de carbone, à l'isolation de phénol et de ses dérivés, ainsi que celles où la lignine serait utilisée comme ingrédient pharmaceutique. Au total, près d'une cinquantaine d'alternatives ont été recensées.

4.2.3 Triage de l'ensemble initial d'alternatives

L'évaluation des deux critères de triage définis – la maturité de l'usage de la lignine et le potentiel de création d'un avantage compétitif spécifique à la lignine kraft – a été effectuée séparément pour les alternatives considérées dans un horizon à court ou moyen terme, et celles considérées à plus long terme.

Le critère portant sur la maturité a essentiellement concerné la deuxième catégorie d'alternatives, l'usage de la lignine pour les applications de la première catégorie étant validé. Il s'agissait alors de juger l'état de l'avancement attendu de la technologie de conversion de la lignine et des performances des dérivés de lignine vis-à-vis des produits actuellement sur le marché, dans un horizon de cinq ans suivant l'implantation de l'unité de bioraffinage. Ce délai correspondant au timing de la transition entre les Phases I et II de l'implantation de la stratégie de bioraffinage, défini en accord avec le partenaire industriel.

Le potentiel de création d'avantages compétitifs évalué à travers le second critère couvrait trois niveaux, soit (1) la réduction substantielle des coûts de production, (2) l'obtention de produits aux propriétés uniques, et (3) l'obtention de produits aux performances nettement meilleures que ce qui est obtenu avec la matière première conventionnellement utilisée dans l'industrie. Bien que le jugement dudit potentiel soit quelque peu subjectif, les informations extraites de la littérature ont permis de manière fiable d'écarter certaines alternatives.

L'emploi du critère de maturité a permis d'éliminer les alternatives envisageant l'isolation de phénol, la production de bisphénol A, caprolactame et BTX, et l'utilisation de lignine comme ingrédient pharmaceutique. Les progrès actuels des technologies permettant de transformer la lignine afin de servir ces applications portent à croire qu'un délai de cinq ans serait trop court pour voir l'une d'entre elles atteindre l'étape de commercialisation. La littérature estime un délai de dix ans comme étant plus réaliste [126]. Ensuite, l'emploi du critère de création d'avantages compétitifs a permis d'éliminer les applications pour lesquelles la lignine lignosulfonate est déjà établie dans la catégorie des alternatives envisagées à court terme, de même que la production de charbon activé dans la catégorie des alternatives envisagées à plus long terme. L'utilisation de lignine kraft ne satisfait pour ces applications aucun des trois niveaux de distinction compétitive établis pour le critère, vis-à-vis des lignosulfonates d'une part, et de la variété de matières premières utilisées pour la production de charbon activé d'autre part.

Ainsi, les alternatives de bioraffinage qui ont été retenues sont (1) celles reliées au remplacement de phénol dans les résines phénoliques et de polyols dans les mousses polyuréthanes pour l'immédiat, et (2) celle reliée au remplacement de PAN comme précurseur dans la production de fibres de carbone à plus long terme. Alors que l'emploi de lignine pour les deux premières applications a été validé, c'est en s'appuyant sur l'avancée actuelle de la recherche et sur les moyens mis en œuvre à ces fins par plusieurs secteurs de l'industrie (les secteurs automobile et aérospatial notamment), qu'il a été envisagé que dans un délai de cinq ans il serait possible d'obtenir des fibres de carbone à partir de lignine, qui soient fonctionnellement acceptables pour certaines applications moyennant des modifications de procédé à moindres coûts.

4.3 Définition des stratégies de bioraffinage et des critères d'évaluation

Pour des raisons stratégiques et en accord avec les partenaires industriels impliqués dans l'étude de cas, il a été convenu que l'analyse technico-économique présentée dans l'article 1 se limite à l'évaluation de résines phénoliques et de fibres de carbone comme dérivés potentiels de lignine, selon des scénarios particuliers. Les stratégies et les résultats diffèrent quelque peu du contenu de l'article 2 ; ils ont toutefois la même base d'informations utilisée pour les analyses réalisées. Une des différences majeures est la considération des coûts reliés à l'installation d'une unité de précipitation de lignine à l'usine. Alors que l'article 1 présente des résultats pré-implantation, l'article 2 présente des résultats post-implantation auxquels ne sont pas inclus les coûts d'installation de l'unité de précipitation. Par souci de fluidité avec les résultats des activités de prise de décision (section 4.4), ce sont les résultats de l'analyse technico-économique présentée dans l'article 2 qui sont résumés ci-dessous. Les deux articles se retrouvent en intégralité dans les annexes A et B.

4.3.1 Approche par phases et plans d'implantation séquentielle

Partant des alternatives de bioraffinage réparties en opportunités à court et moyen terme et à plus long terme, la définition des stratégies de bioraffinage revient à clarifier les combinaisons procédé-produits ainsi que les plans d'implantation par phases les reliant. Les combinaisons procédé-produits résultant principalement de la revue de la littérature précédemment effectuée, l'accent est plutôt mis ici sur la définition des phases d'implantation.

La définition du plan d'implantation a porté sur trois éléments majeurs à savoir, (1) la position occupée par la compagnie forestière sur la chaîne de valeur du produit ciblé à chaque phase de la stratégie, (2) le potentiel de part de marché associé à ladite position, et (3) le mode de développement stratégique adopté par la compagnie afin de passer d'une phase à une autre (voir Figure 2.9). La mise en place de ces éléments pouvant grandement varier selon l'envergure de la transformation envisagée par la compagnie forestière, deux visions stratégiques ont été considérées pour l'étude de cas. La première est orientée-usine et a pour objectif l'amélioration de la compétitivité de l'usine hôte de la bioraffinerie, alors que la seconde est orientée-entreprise et recherche un impact plus marqué, à l'échelle de la compagnie. Tandis que la première s'accentuerait autour de voies de réduction de coûts et de création opportunistique de nouveaux flux de revenus, la deuxième viserait plutôt la plus grande capacité de production possible et une pénétration agressive des segments de marché où le plus de valeur pourrait être générée.

Pour ce qui est du positionnement sur la chaîne de valeur des dérivés de lignine retenus, deux choix de point d'entrée s'offrent à la compagnie forestière. Elle pourrait soit vendre la lignine comme un produit intermédiaire, c'est-à-dire comme substitut de phénol, de polyols ou de PAN selon le cas, ou alors extraire la lignine et fabriquer elle-même le produit dérivé pour l'application ciblée, et ainsi se positionner comme producteur de résine phénolique, de mousse polyuréthane ou de fibre de carbone afin se rapprocher du client final. Dans l'un ou l'autre des cas, la maturité technologique et la familiarité de la compagnie avec les technologies impliquées sont les facteurs déterminants du choix. Ainsi, la seule application pour laquelle la compagnie peut envisager de fabriquer le produit final à un niveau de risque raisonnable est celle reliée à la production de résine phénolique. Ce choix serait justifié par le fait qu'elle possède des usines de panneaux où la résine phénolique est employée dans le processus de fabrication, et qu'elle en connaît assez bien les exigences en termes de performances et de spécifications.

La part de marché potentielle à une position donnée sur la chaîne de valeur varie selon que la lignine est employée en substitution partielle ou totale pour l'application visée. La substitution est partielle dans les cas de remplacement de phénol (25% sans modification de lignine) ou de polyols (20% sans modification de lignine), ce qui réduit l'opportunité de marché. Le remplacement du PAN est le plus prometteur du point de vue du volume de marché atteignable, si l'on considère que le procédé de production de la fibre de carbone utilisera un filage par fusion.

Concernant enfin les modes de développement entre les phases, ceux-ci se résument au choix entre les approches d'intégration horizontale et verticale selon que la compagnie veuille diversifier son portefeuille de produits en gardant la même position sur la chaîne de valeur, ou alors qu'elle désire avoir un meilleur contrôle sur les coûts [184]. La concrétisation d'une intégration horizontale dans le présent contexte passe par l'augmentation de la capacité de production de lignine ou par la commercialisation de la lignine sur plusieurs applications, donc sur différents segments de marché. La production d'une résine lignine-phénol-formaldéhyde demeure quant à elle la seule option retenue pour une intégration verticale.

Le choix du mode de développement stratégique a une incidence sur le type de partenariat que la compagnie met en place afin d'atténuer les risques associés à l'implantation de la stratégie. L'existence de preneurs potentiels a été confirmée par une analyse des compagnies existantes dans la région de l'usine hôte, pour les cas où la lignine serait commercialisée comme produit intermédiaire. La création d'une coentreprise a été considérée pour les cas où des technologies gourmandes en capitaux devraient être implantées, tandis que l'acquisition d'une compagnie existante en aval sur la chaîne de valeur a été considérée pour le mode d'intégration verticale.

Sur la base des facteurs décrits ci-dessus, sept stratégies ont été définies pour l'étude. Elles prennent toutes leur base dans ce qui a été établi comme la situation de départ, soit l'usine de production de pâte post-implantation de l'unité de précipitation de lignine (voir Figure 4.2). Celle-ci aurait une capacité de production de 30 tonnes/jour de lignine sèche, et viserait à moyen terme la réutilisation de 6 tonnes/jour dans les usines de production de panneaux de la compagnie, le reste de la production étant vendu sur le marché comme substitut de phénol. Les stratégies seraient alors appliquées à partir de l'année 5 suivant l'implantation de l'unité de précipitation de lignine. Les stratégies ainsi que les modalités de leur implantation sont résumées à la Figure 4.3.

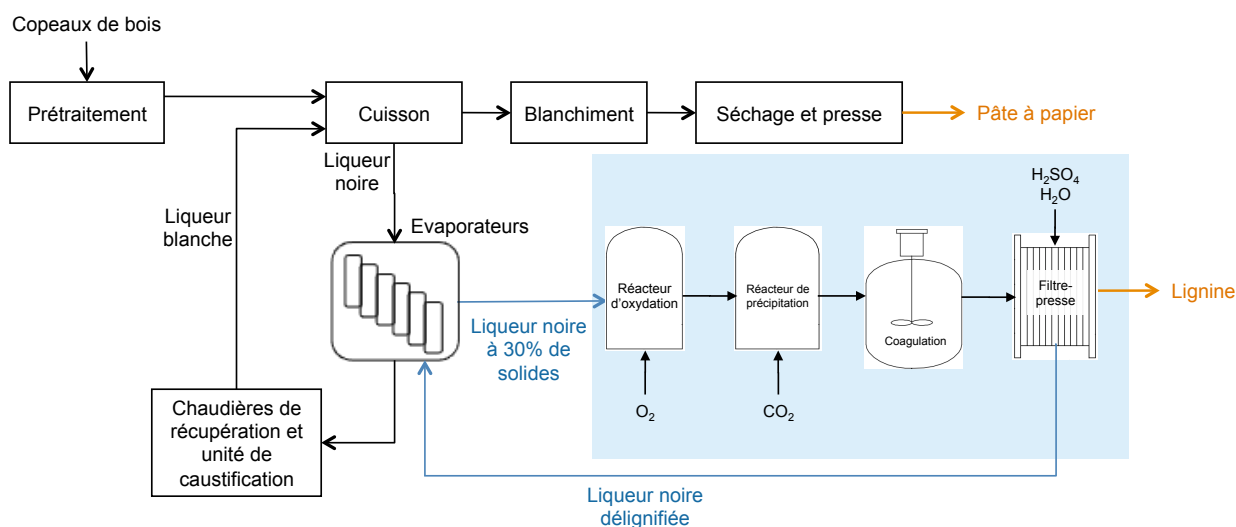


Figure 4.2 Schéma bloc simplifié de la situation de départ considérée pour l'étude de cas

La première stratégie, Ligno 90, PF, consiste en une évolution marginale du modèle d'affaires par l'accroissement du volume de production afin d'améliorer le positionnement de la compagnie sur le marché du remplacement du phénol. La capacité serait triplée à 90 tonnes/jour de lignine, ce qui impliquerait que 15% de la liqueur noire soit acheminé à l'unité de précipitation. Ce taux de recirculation demeure très conservateur, sachant que le pouvoir calorifique supérieur de la liqueur noire ne devrait pas être inférieur à 12,5 MJ/kg [199]. Cette stratégie représente ainsi une variante d'intégration horizontale considérant l'augmentation de la capacité de production de lignine, la compagnie forestière intégrant la chaîne de valeur comme producteur d'un substitut de phénol.

Un premier ensemble qui regroupe les stratégies Ligno 90, PF PU, Ligno 90, PF CFs et Resin 90, s'aligne sur la vision stratégique axée sur l'amélioration de la compétitivité de l'usine concernée. L'idée est alors de tirer le meilleur du portefeuille de produits sans avoir à augmenter de nouveau la capacité de l'unité de précipitation. Ceci a été matérialisé par la recherche de valeur ajoutée à travers le portefeuille, soit en diversifiant les applications pour lesquelles la lignine serait vendue suivant une approche d'intégration horizontale, soit en se rapprochant du consommateur en produisant de la résine plutôt qu'un substitut de phénol directement à l'usine, suivant une approche d'intégration verticale.

Les stratégies Ligno 90, PF PU et Ligno 90, PF CFs représentent des variantes d'intégration horizontale considérant la diversification du portefeuille de produits par la considération respectivement des applications de mousses polyuréthanes et de fibres de carbone, en plus des applications de résines phénoliques. Dans les deux cas la compagnie forestière demeurerait à la même position sur la chaîne de valeur, soit comme fournisseur de lignine.

La stratégie Resin 90 est basée sur une approche d'intégration vertical et considère l'acquisition d'un producteur existant de résine afin de bénéficier d'une expertise établie dans la fabrication de résine, ainsi que d'un réseau de distribution et de vente déjà en place, le tout dans l'optique d'atténuer les risques.

Le deuxième ensemble de stratégies s'aligne quant à lui sur la vision de diversification des revenus à plus grande échelle, et implique la valorisation de biomasse additionnelle disponible dans l'espace forestier de la compagnie. Il regroupe les trois dernières stratégies, pour lesquelles une unité de cuisson à base de solvant serait construite en parallèle au procédé existant pour la conversion des feuillus récoltés. Chacune de ces stratégies considère un déploiement par intégration horizontale (accroissement de la capacité de production couplé à la diversification du portefeuille) incluant la création d'une coentreprise pour l'atténuation des risques associés à l'implantation de l'unité de cuisson. Par défaut, la coentreprise considère une distribution équitable des charges et des revenus.

La première stratégie de l'ensemble représente l'effet de l'implantation de l'unité de cuisson et garde le remplacement de phénol comme débouché de la lignine produite. Les deux autres considèrent la diversification des applications vers le remplacement de polyols ou de PAN, dans le même ordre d'idée que les stratégies définies pour le premier groupe. Le portefeuille de produit de chacune des stratégies est complété par la production d'isobutanol et d'un sirop de sucres extraits des autres composantes du bois.

	Stratégie	Description	Phase 0 Année 0 – Année 4	Phase I Année 5 – Année 9	Phase II Année 10 – Année 30
Vision	Situation de départ	Vente à l'interne et sur le marché comme substitut de phénol dans les résines PF, LignoForce (30 t/j)	<ul style="list-style-type: none"> Année 0: 100% de la lignine brûlée Année 1: 28 t/j brûlées, 2 t/j aux usines de panneaux à l'interne Année 2: 24 t/j brûlées, 6 t/j à l'interne 	<ul style="list-style-type: none"> Année 3: 18 t/j brûlées, 6 t/j à l'interne, 6 t/j vers le marché des résines PF Année 4: 12 t/j brûlées, 6 t/j à l'interne, 12 t/j vers le marché des résines PF Année 5: 6 t/j brûlées, 6 t/j à l'interne, 18 t/j vers le marché des résines PF Année 6+: 6 t/j à l'interne, 24 t/j vers le marché des résines PF 	
Positionnement sur le marché	Ligno 90, PF	Vente à l'interne et sur le marché comme substitut de phénol dans les résines PF, LignoForce (30 t/j, puis 90 t/j)	Similaire à "Situation de départ"	Augmentation de la capacité de l'unité de précipitation à 90 t/j • Année 5: 6 t/j brûlées, 6 t/j à l'interne, 48 t/j vers le marché des résines PF • Année 6: 6 t/j à l'interne, 84 t/j vers le marché des résines PF	
Groupe 1: Meilleure compétitivité de l'usine	Ligno 90, PF PU	Diversification du portefeuille de "Ligno 90, PF": Vente de lignine sur le marché comme substitut de phénol et de polyols , pas de lignine brûlée.		Augmentation de la capacité de l'unité de précipitation à 90 t/j • Année 5: 6 t/j brûlées, 6 t/j à l'interne, 33 t/j vers les résines PF, 15 t/j vers les mousses PU • Année 6: 6 t/j à l'interne, 54 t/j vers les résines PF, 30 t/j vers les mousses PU	
	Ligno 90, PF CFs	Diversification du portefeuille de "Ligno 90, PF": Vente de lignine sur le marché comme substitut de phénol et de PAN , pas de lignine brûlée.		Augmentation de la capacité de l'unité de précipitation à 90 t/j, Membrane d'ultrafiltration installée en amont de l'oxydation de la liqueur noire • Année 5: 6 t/j brûlées, 6 t/j à l'interne, 33 t/j vers les résines PF, 15 t/j vers les fibres de carbone • Année 6: 6 t/j à l'interne, 54 t/j vers les résines PF, 30 t/j vers les fibres de carbone	
	Resin 90	Similaire à "Ligno 90, PF" jusqu'à l'Année 9, puis acquisition d'un fabricant de résine PF resin en Phase II . Procédé de production de résine déplacé sur le site de l'usine de pâte.		Similaire à "Ligno 90, PF"	Acquisition d'un fabricant de résine PF • Année 10: 290 t/j de résine produites • Année 11: 435 t/j de résine produites
Groupe 2: Diversification des revenus à grande échelle	Ligno 90 + SP, PF	Similaire à "Ligno 90, PF" jusqu'à l'Année 9. Usine démo de cuisson à base de solvant (50 t/j) implantée à l'Année 4, puis usine à pleine échelle (1500 t/j) implantée à l'Année 9. Coentreprise à 50-50 JV créée pour l'implantation de l' unité de cuisson à base de solvant .		Similaire à "Ligno 90, PF" + usine démo de cuisson à base de solvant (9 t/j)	Augmentation de la capacité de l'unité de cuisson à 260 t/j, subvention de 50% assumée
	Ligno 90 + SP, PF PU	Diversification du portefeuille de "Ligno 90 + SP, PF": Vente de lignine sur le marché comme substitut de phénol et de polyols , pas de lignine brûlée.		Augmentation graduelle de la capacité, Année 10 à 12: 50%, 70%, 100% de la capacité nominale 6 t/j à l'interne; 214 t/j, 266 t/j, puis 344 t/j vers le marché des résines PF Butanol et sirop de sucre à 70% sec comme coproduits	
	Ligno 90 + SP, PF CFs	Diversification du portefeuille de "Ligno 90 + SP, PF": Vente de lignine sur le marché comme substitut de phénol et de PAN , pas de lignine brûlée.		Procédé similaire à celui de "Ligno 90 + SP, PF" Lignine: 6 t/j à l'interne, 220 t/j vers les résines PF, 124 t/j vers les mousses PU	
				Procédé similaire à celui de "Ligno 90 + SP, PF" Lignine: 6 t/j à l'interne, 220 t/j vers les résines PF, 124 t/j vers les fibres de carbone	

Figure 4.3 Description et phases d'implantation des stratégies de bioraffinage de la lignine

4.3.2 Analyse de l'intégration au procédé en place

Étant donné le contexte d'intégration en retrofit des unités de bioraffinage à l'usine en place, plusieurs points d'intégration ont été localisés afin d'identifier les défis spécifiques d'implantation des nouvelles unités, ainsi que d'établir de possibles synergies avec les opérations existantes dans le but de minimiser les coûts. Les zones d'intégration analysées ont inclus :

- La récolte et l'approvisionnement de biomasse additionnelle ;
- Le système de manutention de la biomasse une fois sur le site ;
- Les unités de procédé, principalement la cascade d'évaporateurs pour la concentration de la liqueur noire ;
- Le réseau énergétique et les équipements associés ;
- L'inventaire d'équipements inutilisés ;
- L'unité de traitement des eaux usées ; et
- Le stockage et la distribution des produits.

L'analyse de l'intégration des procédés a été réalisée en considérant deux groupes de procédé, soit les procédés intégrés en référence à l'unité de précipitation de lignine, et les procédés non-intégrés en référence aux unités de cuisson à base de solvant.

Des zones d'intégration sus identifiées, seules la cascade d'évaporateurs et l'intégration au réseau énergétique ont eu une importance majeure pour les unités intégrées. De plus grands défis ont par contre été identifiés pour le cas des unités non-intégrées. Le premier est relié à l'approvisionnement de la biomasse, pour lequel il a été nécessaire de considérer des coûts d'investissement pour la construction d'un système de manutention totalement en parallèle du système existant afin d'éviter toute pollution du procédé de production de pâte à papier par les feuillus. Aussi, étant donné le volume de biomasse utilisé par la bioraffinerie, il a été anticipé que les charges hydrauliques et de nutriments pour le traitement des eaux usées augmentent substantiellement, nécessitant une augmentation de la capacité de l'unité de traitement existante ainsi que des coûts d'opération additionnels. Ceux-ci ont été évalués de manière nominale sur la base de la charge additionnelle associée à chaque configuration de procédé, prenant comme référence les coûts estimés pour un ajustement similaire de l'unité de traitement d'eaux usées dans le cas de la production d'éthanol [200].

Enfin, le volume de biomasse à traiter a également eu un impact considérable sur l'intégration des procédés non-intégrés au réseau énergétique de l'usine. À cet effet, l'approche d'analyse a été (1) d'estimer la marge d'opération des chaudières disponibles à l'usine quant à la quantité additionnelle de combustible qui peut y être traitée, (2) d'estimer en parallèle les demandes en vapeur et électricité des procédés associés aux stratégies de bioraffinage définies, et (3) d'évaluer le besoin d'acquérir une chaudière additionnelle afin de gérer la demande énergétique globale, circonstance qui impliquerait également l'achat d'une nouvelle turbine. Cette analyse a pris comme base de calcul la configuration hivernale du réseau énergétique, dont la distribution des flux d'énergie est représentée à la Figure 4.4. À l'issue de ces analyses, il est principalement ressorti que les chaudières disponibles étaient suffisantes pour la combustion de lignine précipitée de la liqueur noire, alors qu'une chaudière additionnelle devait être considérée pour satisfaire les besoins en énergie dans le cas où les unités non-intégrées seraient implantées.

Hiver

* Courants de vapeur exprimés en lb/h

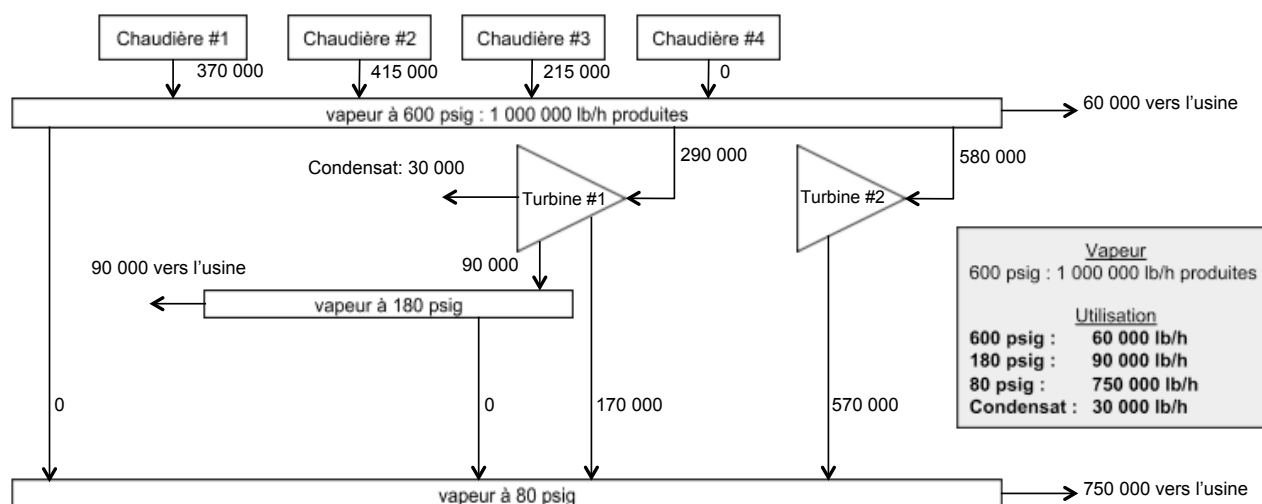


Figure 4.4 Configuration hivernale du réseau énergétique de l'usine

4.3.3 Considérations pour les estimations des coûts et des revenus

L'approche d'estimation des coûts a également été adaptée au type de procédé impliqué dans la stratégie de bioraffinage. Elle a été basée dans les deux cas sur l'extrapolation des coûts des équipements, la différence ayant été faite pour le passage entre ceux-ci et les coûts totaux de capitaux. Les coûts des équipements ont été estimés à partir de publications portant sur des procédés similaires disponibles dans la littérature publique, et ont ensuite été actualisés à l'aide des indices de Marshall et Swift. La publication de référence pour les unités de précipitation est celle de Loutfi et Blackwell [201] portant sur l'étude d'une unité de précipitation de lignine d'une capacité de 57 tonnes par jour, tandis que celle pour les unités de cuisson à base de solvant est une étude réalisée par un organisme gouvernemental américain sur la production d'éthanol par hydrolyse enzymatique de 2 205 tonnes sèches de tiges de maïs par jour [202]. Cette dernière référence a été combinée aux informations fournies par la compagnie Gevo relativement à la conversion d'une unité existante de production d'éthanol en une unité d'isobutanol [203,204].

Dans le cas des procédés intégrés, les coûts directs et indirects de capitaux ont été estimés sur la base de facteurs d'allocations multiplicatifs définis par les heuristiques de conception tel que suggérés par Peters et Timmerhaus [47]. À l'opposé, la méthode de Lang a été employée pour les unités de cuisson à base de solvant. Deux facteurs ont été utilisés selon que l'opération unitaire était ou non reliée au procédé Organosolv, les facteurs variant logiquement avec le niveau de développement des technologies employées. Ainsi, sous recommandation du développeur de technologie, un facteur de 2.8 a été utilisé pour les unités reliées au procédé Organosolv, alors qu'un facteur de 1.97 correspondant à une n-ième unité installée d'une opération unitaire donnée [202], a été utilisé pour les opérations unitaires plus conventionnelles (système de manutention de la biomasse, chaudières, et stockage des produits).

Les deux approches d'estimation des coûts de capitaux ont grandement été justifiées par la disponibilité d'informations fiables dans la littérature publique, laquelle est le plus souvent reliée à la maturité des technologies. Dans le cadre de la présente étude de cas, la validation des estimations réalisées a été supportée par la collaboration développeurs de technologie pour chacun des types de procédé, l'un pour les unités de précipitation, et l'autre pour les unités de cuisson à base de solvant. Les études technico-économiques ont été réalisées lors de stages dans les installations des partenaires industriels, lesquels ont permis de développer une bonne connaissance des procédés et de définir la base pour l'estimation des coûts.

Les coûts d'opération ont de manière classique été répartis en coûts fixes et coûts variables, et estimés sur la base d'heuristiques de conception tenant compte des spécificités du contexte d'implantation à l'usine en place. Typiquement, sur les intervalles de valeurs des facteurs d'allocation suggérés par les heuristiques, les valeurs supérieures des intervalles sont utilisées dans le cas d'unité à petite échelle, alors que les valeurs plus proches des limites inférieures sont utilisées pour les unités de plus grande envergure.

Étant donné que l'implantation de la bioraffinerie est évaluée sur au moins deux décennies, les bases unitaires définies pour l'estimation des coûts de la matière première et des revenus devait tenir compte de valeurs réalistes sur cette période. À cet effet, des corrélations ont été déterminées entre les prix historiques de l'énergie (pétrole brut, gaz naturel et électricité) et ceux des constituants des matières premières et des portefeuilles de produits. Les projections à moyen et long terme des prix de l'énergie publiées par les agences gouvernementale et internationale de référence (l'US Energy Information Administration [205] et Agence internationale de l'énergie [11]) ont ainsi pu être utilisées afin d'extrapoler les valeurs probables de la matière première et des produits associés à chacune des stratégies de bioraffinage. Dans le cas où aucune corrélation n'avait pu être déterminée, l'extrapolation était faite sur la base uniquement des variations historiques de l'élément concerné. Pour les fins des calculs des critères de prise de décision, les coûts unitaires nominaux et maximaux ont été établis pour la matière première (voir Tableau 4.1), tandis que les prix nominaux et minimaux ont été établis pour les produits (voir Tableau 4.2).

Enfin, des remises pour les trois années suivant leur mise en vente ont été considérées pour les produits dérivés de lignine, afin d'en faciliter la commercialisation. Celles-ci, établies sur la base de la maturité de l'usage de la lignine pour l'application donnée, étaient de 10% pour le remplacement direct de résine phénolique, de 20% pour le remplacement de phénol et de polyols, et de 30% pour le remplacement de PAN. Le détail des hypothèses supplémentaires posées pour l'analyse technico-économique est présenté dans les articles aux annexes A et B.

Tableau 4.1: Base des coûts unitaires de la matière première associée aux stratégies de bioraffinage de la lignine

Matière première	Coûts unitaires estimés (US \$/tonne)		Base pour les coûts
	Nominaux	Maximum	
Phénol	1 005	1 905	Corrélation avec le prix du pétrole.
Acide sulfurique	180	240	Prix basé sur des valeurs historiques. Ce prix est plutôt influencé par les industries des fertilisants et du cuivre.
Dioxyde de carbone	300	390	Valeurs suggérées par le partenaire industriel.
Oxygène	50	65	
Soude	430	810	Corrélation avec le prix du pétrole.
Enzymes	2 270	2 500	Valeurs les plus récentes fournies par la littérature. Un maximum de 5% plus cher a été fixé, bien que ces coûts devraient considérablement diminuer avec le progrès des technologies.
Levures	1 875	2 060	
Biomasse	100 (sèche)	127 (sèche)	Il est considéré que le transport contribue à 30% des coûts de la biomasse, et variera avec le prix du pétrole.
Formaldéhyde	210	400	Le formaldéhyde est produit sur le site. Environ 80% de ses coûts de production sont attribués au méthanol, dont le prix est conjointement influencé par ceux du pétrole et du gaz naturel.
Electricité	7.9 ¢/kWh	14.8 ¢/kWh	En moyenne, l'électricité est 7% plus chère et le gaz naturel 5% plus cher que les références choisies. Les valeurs maxima sont basées sur des données historiques.
Gaz naturel	4.35 \$/GJ	7.15 \$/GJ	

Tableau 4.2: Base des prix des produits associés aux stratégies de bioraffinage de la lignine

Produit	Prix de marché estimés (US \$/tonne)		Base pour les prix
	Nominaux	Minimum	
Phénol	1 005	690	Corrélation avec le prix du pétrole.
Polyols	2 970	2 035	Corrélé sur le prix du propylène, qui est conjointement influencé par les prix du pétrole et du gaz naturel.
PAN	2 480	1 700	Basé sur un prix cible de 5-7 \$/lb pour la fibre de carbone. Le prix minimal est corrélé avec les variations du propylène.
Résine PF	2 000	1 485	Le prix nominal est la moyenne des prix de différents producteurs. Le prix minimum est dérivé des variations des prix du phénol et du formaldéhyde.
Sirop de sucres	170	155	Prix moyen et minimum de molasses dans des états américains où l'industrie bovine est concentrée.
Isobutanol	3.08 \$/gal	2.11 \$/gal	Corrélation avec le prix du propylène.

4.3.4 Indicateurs technico-économiques

Les résultats de l'analyse technico-économique des stratégies de bioraffinage définies comme candidates à l'implantation à l'usine de pâte kraft sont résumés dans le Tableau 4.3 ci-dessous. On peut d'emblée noter que la différence d'échelle entre les procédés intégrés et les procédés non-intégrés se reflète à travers un écart d'ordre de magnitude entre leurs indicateurs économiques. La combinaison des coûts et des revenus des procédés intégrés donne lieu à des bénéfices annuels assez faibles comparés à ceux obtenus avec les procédés non-intégrés, ce qui ne les empêchent toutefois pas de générer des taux de rentabilité plus élevés. Ceci est justifié notamment par le fait qu'ils requièrent des investissements nettement plus bas que les procédés de cuisson à base de solvant, et que la précipitation et le séchage de la lignine sont des opérations peu coûteuses.

Parmi les stratégies se basant sur des unités intégrées, la stratégie Resin 90 fait office d'exception par le fait qu'elle considère en Phase II l'acquisition d'un producteur existant de résine et l'installation d'une ligne de fabrication de résine lignine-phénol-formaldéhyde sur le site de l'usine. Ce mode de développement constitue une prise de risque en termes d'investissements dont la compagnie peut espérer des bénéfices fort avantageux, cette stratégie étant celle qui génère les bénéfices annuels en Phase II et la valeur actuelle nette les plus élevés.

Les valeurs des indicateurs obtenues pour les stratégies considérant les unités de cuisson à base de solvant démontrent l'avantage que pourrait avoir la création d'une coentreprise sur l'atténuation des risques. L'effet est marqué en ce qui est du partage de coûts d'investissement, qui diminue considérablement le fardeau de la compagnie papetière. Ceci est un élément qui mérite une mention particulière étant donnée les restrictions que s'imposent les compagnies dans le secteur, mais qui reste suspendu à l'obtention de subventions gouvernementales. D'autre part, les chiffres montrent aussi que l'atténuation des coûts d'investissement ne résoud pas tous les défis économiques auxquels la compagnie fera face. En effet, l'investissement se produit à une année donnée dans le temps, alors que l'opération perdure sur plusieurs années après installation de l'unité, et celle-ci s'avère être plutôt coûteuse dans le cas des unités non-intégrées. Au final, les stratégies qui considèrent ce type d'unités bien que présentant des bénéfices annuels élevés en Phase II, génèrent des valeurs actuelles nettes assez faibles. De meilleurs retours pourraient être obtenus sur le long terme avec une évolution du portefeuille de produits qui incluerait des produits à plus grande valeur que l'isobutanol ou le sirop de sucres, dans l'optique de tirer le maximum de toutes les composantes du bois.

Tableau 4.3: Indicateurs technico-économiques relatifs aux stratégies de bioraffinage de la lignine

Indicateur		Ligno 90, PF	Ligno 90, PF PU	Ligno 90, PF CFs	Resin 90	Ligno 90 + SP, PF	Ligno 90 + SP, PF PU	Ligno 90 + SP, PF CFs
Capacité de production de lignine		90 t/j	90 t/j	90 t/j	90 t/j 435 t/j résine	350 t/j	350 t/j	350 t/j
Coûts des investissements	Coûts totaux du projet	32 M\$	33 M\$	39 M\$	146 M\$	432 M\$	438 M\$	436 M\$
	Contribution compagnie					153 M\$	156 M\$	154 M\$
Coûts annuels d'opération (Phase II)	Coûts totaux d'opération	6 M\$/an	7 M\$/an	7 M\$/an	104 M\$/an	123 M\$/an	127 M\$/an	126 M\$/an
	Contribution compagnie					60 M\$/an	62 M\$/an	61 M\$/an
Revenu annuel (Phase II)	Revenu annuel total	21 M\$/an	41 M\$/an	36 M\$/an	287 M\$/an	222 M\$/an	305 M\$/an	284 M\$/an
	Part de la compagnie					120 M\$/an	162 M\$/an	151 M\$/an
BAIIA annuel (Phase II)		15 M\$/an	34 M\$/an	29 M\$/an	183 M\$/an	60 M\$/an	100 M\$/an	90 M\$/an
VAN (Phases I et II combinées) ^a		17 M\$	70 M\$	49 M\$	164 M\$	6 M\$	50 M\$	37 M\$
TRI (Phases I et II combinées)		31%	57%	43%	46%	21%	28%	26%

a : La VAN est calculée pour un taux d'intérêt de 20%. Les flux de trésorerie sont actualisés à l'année d'implantation de la Phase I (année 5).

4.3.5 Établissement de l'ensemble de critères pour l'atelier MCDM

La base de définition des critères pour l'évaluation des stratégies a été la banque regroupant les indicateurs issus de la littérature, les indicateurs de sources majeures de risque identifiés lors de l'exécution de l'étude de cas, et les critères suggérés par la compagnie forestière. La réduction à un ensemble minimal et nécessaire à la prise de décision a été réalisée par l'application du protocole de triage en deux étapes introduit à la Figure 3.5. L'issue des étapes de triage est résumée ci-dessous.

L'évaluation des critères a débuté l'évaluation de la pertinence de la problématique soulevée par le critère dans le contexte de la prise de décision à effectuer. Répondre à cette question a notamment permis d'éliminer les critères qui portaient sur les questions d'accès à la biomasse (la compagnie possédant ses propres espaces d'exploitation forestière), de propriété intellectuelle, de lois et règlements relatifs aux produits, et de stratégies de sortie du secteur principal d'activités.

La caractéristique d'importance ensuite, relative à la considération immédiate ou au report de l'évaluation du critère à une étape ultérieure du NPD, a amené à mettre de côté les critères environnementaux, ceux reliés à la structure organisationnelle, de même que ceux évaluant la flexibilité du modèle d'affaires et de la chaîne logistique.

En ce qui concernait l'évaluation conjointe des caractéristiques de représentativité et de discrimination, l'élimination des critères n'était pas réellement justifiée. Étant donnée la différence d'ordre de magnitude entre les unités intégrées et non-intégrées, l'on pouvait prédire des valeurs de métriques assez disparates. En conséquence, un seul critère a été filtré, soit celui évaluant la création d'avantages compétitifs vis-à-vis des produits existants sur le marché. Tous les produits constituant les portefeuilles des stratégies définies provenant de la même biomasse, l'on a pu anticiper que ce critère ne discriminerait pas les stratégies entre elles.

Au regard des hypothèses considérées pour le calcul des critères, les membres du panel de décision n'ont pas jugé nécessaire d'éliminer ni de modifier des critères sur la base de la caractéristique de fiabilité.

Dans la seconde phase de triage qui concerne la famille plutôt que les critères individuels, l'évaluation premièrement de la redondance a entraîné la mise à l'écart de bon nombre de critères économiques, plusieurs d'entre eux étant liés dans leur formulation. Ceci n'a toutefois pas eu d'effet déplorable sur l'exhaustivité de l'ensemble de critères, le panel jugeant qu'il continuait de couvrir de manière adéquate les problématiques d'intérêt au contexte de la prise de décision.

Afin d'assurer la manœuvrabilité de la famille de critères, un critère, celui portant sur la diversification des revenus (décrit ci-dessous) a été formé par la combinaison de deux sous-critères. Il s'agit du nombre de nouveaux produits et de la somme des revenus générés par les nouveaux produits, qui ont été trouvés complémentaires dans la représentation de la problématique de diversification. Dans ce cas spécifique, les métriques respectifs aux sous-critères ont été liés par multiplication. Ceci a été décidé afin d'exprimer le fait que d'une part il est peu avantageux d'inclure un grand nombre de nouveaux produits si ceux-ci ont un faible impact en termes de revenus, autant qu'il ne l'est que de dépendre d'un seul nouveau produit comme source de nouveaux revenus, même si ceux-ci sont substantiels.

Au dernier étage d'évaluation la famille de critères a logiquement été jugée opérationnelle, le consensus autour du panel étant justifié par la participation de tous ses membres dans les étapes préalables de triage des critères et de raffinement de la famille. L'ensemble obtenu était composé de six critères, deux représentant des problématiques économiques et quatre représentant des problématiques de marché et de compétitivité. Le Tableau 4.4 en présente les métriques et les interprétations établies par le panel de prise de décision. La nomenclature en langue anglaise a été conservée afin de faciliter la lecture des résultats de l'atelier MCDM à la section suivante.

Tableau 4.4: Description de l'ensemble de critères pour l'évaluation des stratégies de bioraffinage de la lignine

Critères par perspective		Interprétations	Métriques
Économique	<i>Internal Rate of Return (IRR)</i>	L'IRR mesure la rentabilité du projet dans les conditions normales de marché, considérant toutes les Phases de la stratégie de bioraffinage. Le seuil minimal a été fixé à 20% en fonction du niveau de risque attendu à l'année 5.	IRR correspondant à $VAN = \sum_{t=0}^{25} \frac{\text{flux de trésorerie}_t}{(1 + IRR)^t} = 0$
	<i>Cash Flow on Capital Employed (CFCE)</i>	Le CFCE représente l'habileté à générer de la trésorerie à partir des investissements en capitaux sur la durée de vie du projet, et indirectement d'accroître la valeur de la compagnie en réduisant son endettement.	<ul style="list-style-type: none"> • Taux d'actualisation des flux de trésorerie : 20% • Taux d'actualisation des capitaux : 6% $CFCE = \frac{\sum \text{valeur actuelle des flux de trésorerie futurs}}{\sum \text{valeur actuelle des investissements en capital}}$
Marché et compétitivité	<i>Revenue Diversification (RD)</i>	Le RD représente le potentiel d'atteindre les objectifs d'augmentation des revenus à partir des nouveaux bioproduits. Il indique également l'habileté à atténuer les risques de marché en diversifiant les sources de revenus, diminuant ainsi la dépendance vis-à-vis de la pâte.	$RD = \frac{\text{Importance des nouveaux revenus}}{\text{Importance des nouveaux produits}}$
	<i>Competitiveness on Production Costs (CPC)</i>	Le CPC évalue la robustesse de la stratégie à une éventuelle coupe agressive des prix de la part de la compétition.	$CPC = \frac{(\text{Revenu du portefeuille})_{\text{prix minimum}} - \text{Coûts d'opération}}{(\text{Revenu du portefeuille})_{\text{prix minimum}}}$
	<i>Resistance to Energy and Chemicals Market Uncertainty (RECMU)</i>	Le RECMU évalue la vulnérabilité de la stratégie vis-à-vis de la volatilité des coûts de production, laquelle serait due aux variations des coûts de la matière entrante (coûts de logistique exclus).	$RECMU = 1 - \frac{\text{Coûts (énergie + chimiques)}}{\text{Total des coûts variables}}$
	<i>Robustness to Poor Market Conditions (RPMC)</i>	Le RPMC mesure l'habileté à maintenir le procédé en opération sur une période de 6 mois, sous des conditions de marché défavorables, exprimée en pourcentage de l'investissement en capital.	$RPMC = \frac{(\text{BAIIA mensuel})_{\text{conditions défavorables}} \times 6}{\text{Total des investissements en capitaux}}$

Le taux de rentabilité interne, IRR, est le premier critère économique, sa présence faisant office d'évidence tant la profitabilité est une problématique critique au développement de tout projet. Il est prisé des acteurs des activités de prise de décision pour la perspective implicite de risque qui y est rattachée. Le seuil minimal a été fixé par le panel à 20%, ce qui est une valeur typique pour les secteurs émergents, comme c'est le cas du bioraffinage de la lignine. Le second critère, CFCE, est un dérivé du rendement des capitaux engagés (RCE), qui est un indicateur communément utilisé dans le secteur de la finance pour évaluer l'efficacité avec laquelle les entreprises génèrent de la trésorerie à partir de leurs capitaux sur un cycle d'exploitation donné. Plutôt que d'évaluer cette efficacité sur une année de référence, le CFCE couvre plutôt la durée de vie du projet, tenant compte des investissements consentis pour les différentes phases de développement de la stratégie, le tout actualisé à la date de début de la Phase I.

Des critères de marché retenus, le critère de diversification des revenus, RD, est le seul qui n'est pas directement relié à une notion de robustesse. Il combine plutôt deux indicateurs de diversification, soit le nombre de nouveaux produits ajoutés au portefeuille et la magnitude des nouveaux flux de revenus. Pour le sous-critère évaluant l'importance des nouveaux produits, la stratégie dont le portefeuille contient le plus grand nombre de nouveaux produits est prise comme référence, les scores intermédiaires des autres stratégies étant évalués vis-à-vis de celle-ci. Par exemple, la stratégie Resin 90 qui ne donne lieu qu'à un nouveau produit, aura un score de 0.25 pour le sous-critère, car évalué vis-à-vis de la stratégie Ligno 90 + SP, PF PU, qui en générant quatre nouveaux produits, a le portefeuille le plus varié. La version étendue du métrique du critère RD est présentée par l'équation suivante :

$$RD_{\text{stratégie } i} = \frac{(\text{Revenus des nouveaux produits})_{\text{stratégie } i}}{\text{Revenus de (pâte + LignoForce 30) à l'usine}} \times \frac{(\text{Nombre de nouveaux produits})_{\text{stratégie } i}}{(\text{Nombre de nouveaux produits le plus élevé})_{\text{ensemble des stratégies}}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Les critères CPC, RECMU et RPMC représentent la robustesse vis-à-vis respectivement de stratégies adverses de coupure de prix des produits, de la volatilité des coûts de production, et de conditions de marché défavorables pouvant mettre en péril les marges d'opération jusqu'à en causer la fermeture temporaire. Les métriques de ces critères prennent en considération les valeurs minimum et maximum présentées dans les Tableaux 4.1 et 4.2 pour représenter les variations des coûts unitaires de la matière première et des prix des produits selon les scénarios définis. Enfin, le métrique du critère RECMU ne considère que les coûts de l'énergie et des produits chimiques comme éléments de volatilité au numérateur, car la compagnie étant propriétaire de la biomasse additionnelle approvisionnée à la bioraffinerie, a le contrôle sur la majeure partie de ses coûts.

4.4 Identification des stratégies préférentielles de bioraffinage de la lignine

Le panel de décideurs composé pour l'atelier MCDM était constitué de six membres : trois provenant de la compagnie forestière et un de l'entreprise de développement de technologies partenaire, rejoints par deux consultants invités par la compagnie forestière pour leur expertise dans le domaine du bioraffinage. Les représentants de la compagnie forestière incluaient deux managers du département chargé du développement des produits de bioraffinage, et un comptable.

La première activité de l'atelier portant sur l'interprétation des critères et de leurs résultats ainsi que sur la détermination du critère le plus important au contexte de prise de décision a vu les membres du panel s'accorder sur la place prépondérante que devait avoir le taux de rentabilité interne. Cette importance accordée à la profitabilité n'est pas surprenante au regard du besoin pour toute compagnie de justifier ses investissements, d'autant plus lorsque ceux-ci sont effectués dans des secteurs en émergence et que la situation économique n'est pas des plus radieuses.

Plutôt que sur le classement de l'IRR, c'est la limite supérieure d'indifférence (utilisée pour les activités d'échange-et-compromis) entre les stratégies fixée par le panel à 75% qui a été atypique. Les membres du panel l'ont justifiée par le désir de représenter le niveau de risque identifié à la suite de l'analyse des phases d'intégration des stratégies de bioraffinage, et ainsi pouvoir tenir compte de la variabilité des paramètres clés influençant les valeurs du taux de rentabilité. D'un point de vue strictement mathématique, la méthode MAUT ayant été employée pour l'agrégation des préférences des membres du panel, cette valeur a eu pour effet de relativiser les performances des stratégies aux taux de rentabilité les plus élevés lors du calcul des fonctions d'utilité.

Le classement et le poids du critère de compétitivité des coûts de production, CPC, semblent être les véritables enseignements de l'activité d'échange-et-compromis réalisée par le panel vis-à-vis du contexte du bioraffinage de la lignine. Le critère doit son poids à son importance sur le potentiel de pénétration des chaînes de valeur existantes et la conquête de parts sur le marché des dérivés de lignine dans le court terme, de même que sur le potentiel de créer des barrières à l'entrée aux potentiels concurrents tout en maintenant sa position compétitive dans le plus long terme. Le critère a reçu un poids de 24% qui est assez élevé malgré le fait que toutes les stratégies présentaient des performances intéressantes lors du calcul du métrique. Pour le panel, une plus grande concurrence est à prévoir de la part d'autres producteurs potentiels de la lignine, plutôt que des producteurs utilisant des ressources fossiles.

La position occupée par le critère de diversification des revenus, RD, rappelle l'intention première exprimée par la compagnie en rapport avec l'implantation du bioraffinage. Cette position qui peut apparaître anecdotique, démontre juste que la compagnie mesure les défis à surmonter afin de poursuivre au mieux cet objectif, lesquels sont bien représentés par les deux premiers critères. Enfin, le critère de robustesse face à des conditions de marché défavorables a récolté le poids le plus faible car ne permettant pas de distinguer les stratégies. En effet, sous les scénarios définis comme défavorable, toutes les stratégies conservent des marges positives, ce qui est apparu comme un requis minimal satisfaisant aux yeux du panel, qui a préféré avantager les deux autres critères, CFCE et RECMU.

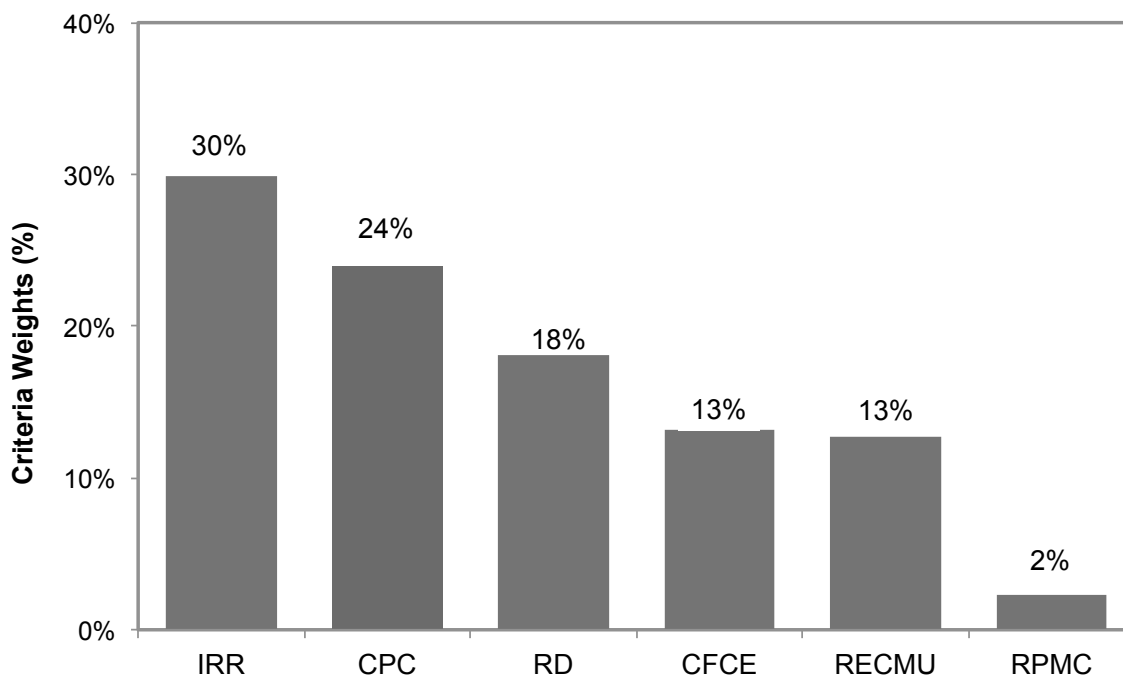


Figure 4.5 Pondération des critères d'évaluation des stratégies de bioraffinage de la lignine

Le premier constat à la lecture du classement des stratégies sur la base de leurs scores, est la dernière place occupée par la stratégie Ligno 90, PF. Vu l'écart avec les autres stratégies, cela démontre que bien que la compagnie aurait raison d'augmenter sa capacité de production, cela ne serait pas suffisant dans le plus long terme pour permettre à la compagnie d'être compétitive, notamment lorsque d'autres producteurs de lignine entreraient sur le marché. À moins de cibler des applications à plus haute valeur ajoutée, la compagnie ne serait ni économiquement, ni compétitivement robuste.

On peut également constater qu'alors que les stratégies basées sur les procédés intégrés sont supportées par des critères économiques, celles incluant les procédés non-intégrés sont plus associées à des justificatifs de compétitivité. En générant des revenus conséquents à partir d'investissements raisonnables, les unités intégrées représentent des options propices pour le développement à court et moyen terme, surtout que la prise de risque y est atténuée par la possibilité d'utiliser une partie de la production dans les usines de fabrication de panneaux. À l'opposé, les unités non-intégrées procureraient des avantages liés d'une part au volume de production et à son implication sur la position sur le marché, et d'autre part à l'atténuation de la volatilité par le biais d'un portefeuille de produits diversifié. Une compagnie ne visant que de meilleurs retours pourrait se limiter à l'implantation d'une stratégie telle que Ligno 90, PF PU, alors qu'une autre qui viserait une assise compétitive sur le long terme opterait pour une stratégie telle que Ligno 90 + SP, PF PU, acceptant ainsi quelques compromis sur la profitabilité.

Le classement de la stratégie Resin 90 rend difficile le choix entre les approches d'intégration horizontale et verticale. En effet, la fabrication de résine phénolique directement sur le site de l'usine génèrerait à la fois un retour économique intéressant et des marges permettant de résister à une éventuelle guerre de prix de la part de la compétition. La dépendance vis-à-vis du phénol et du méthanol qui sont de sources fossiles constitue toutefois son poids faible, la stratégie étant vulnérable face à la volatilité des coûts de la matière entrante. Elle revêt en outre un caractère synergistique dont il est difficile d'exprimer les bénéfices avec les critères employés, par le fait qu'elle s'aligne sur la culture d'intégration verticale qui est chère à la compagnie forestière pour le contrôle de ses coûts. De ce point de vue, l'implantation de cette stratégie aurait des avantages qui se répercuteraient de manière significative aux usines de production de panneaux.

Les stratégies visant la production de lignine comme substitut de polyols apparaissent à chaque fois mieux classées que leurs alter-ego visant la substitution de PAN. Ce constat ne dresse toutefois pas une vérité absolue, l'écart entre les stratégies étant assez faible pour conclure que de meilleures circonstances de marché pourraient aisément inverser cette tendance. Sur la base de ces résultats, le panel a donc identifié les trois premières stratégies, Ligno 90, PF PU, Ligno 90 + SP, PF PU et Resin 90 comme préférentielles pour l'initiative d'implantation de bioraffinage à l'usine. Les deux suivantes, Ligno 90 + SP, PF CFs et Ligno 90, PF CFs, ont été classées en réserve, afin de donner de la flexibilité à la compagnie dans l'exécution de son modèle d'affaires.

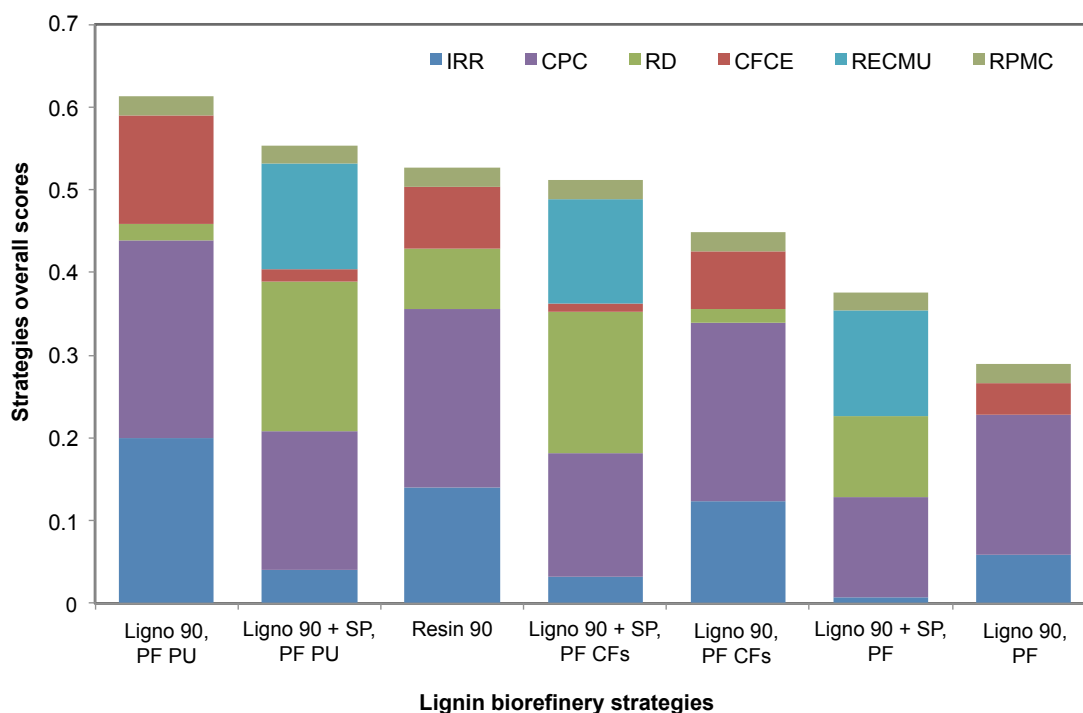


Figure 4.6 Classement des stratégies de bioraffinage de la lignine

4.5 Évaluation d'alternatives de développement d'une bioraffinerie greenfield basée sur le triticale

4.5.1 Combinaisons procédé-produits

Tel qu'introduit précédemment, trois plateformes de produits ont été considérées dans le cadre de l'étude d'une éventuelle bioraffinerie utilisant le triticale comme matière première principale. Il s'agit des plateformes des biocarburants, des biochimiques et des biomatériaux, ayant respectivement pour produit principal l'éthanol, le PLA et les alliages TPS/PLA. Les procédés de conversion ont été définis pour le traitement des graines et de la paille de triticale simultanément, sur deux lignes de production en parallèle. Préalablement à la présente étude de cas, un triage initial des procédés a été effectué sur la base de la maturité des technologies impliquées. Employée comme critère de préférence stricte, elle a permis de départager les options considérées et d'en identifier les moins risquées pour la constitution des cas de base.

Ainsi, les technologies existantes conventionnellement utilisées à l'échelle commerciale pour les produits ciblés ont été sélectionnées pour la ligne de conversion de graine, tandis que pour la ligne de paille ce sont les technologies les plus avancées (testées au moins à l'échelle de démonstration) qui ont été retenues. Sur chaque plateforme ont ensuite définies diverses variantes de procédé selon que la ligne de conversion de graine ou de paille était modifiée, constituant les Alternatives à l'étude. Elles sont résumées dans le Tableau 4.5 ci-dessous, qui présente également les différences entre les cas de base et leurs variantes en termes de procédé et de portefeuille de produits.

Sur la plateforme des biocarburants, l'éthanol est produit sur la ligne de graine par fermentation des sucres, similairement au procédé utilisé par Husky pour la production d'éthanol à partir de blé et de maïs [206]. Un procédé de gazéification est plutôt employé sur la ligne de paille, ce qui résulte en la production d'un mélange d'alcools qui serait vendu comme additif de carburant. Le procédé du cas de base de la plateforme des biochimiques est quant à lui inspiré du procédé mis en place par NatureWorks pour la conversion de maïs en PLA [207]. Le lactate de calcium est obtenu par saccharification et fermentation en série sur la ligne de graine et par saccharification et fermentation simultanées (SFS) sur la ligne de paille, puis converti en PLA par estérification. Enfin, deux lignes parallèles d'extrusion [208] sont définies pour le cas de base de la plateforme des biomatériaux. La première combine perlage¹⁹, broyage à sec et extrusion pour la production d'alliages de TPS/PLA à partir de graines de triticales, alors que la seconde combine pelletisation et extrusion pour la production d'un composite de triticales et polypropylène à partir de paille.

¹⁹ Retrait du son, soit la pellicule extérieure des graines de céréales.

Tableau 4.5: Comparaison des variantes de procédé et des cas de base de l'étude de cas CTBI

	Changements au procédé du cas de base			Portefeuille de produits		
	Biocarburants	Biochimiques	Biomatériaux	Biocarburants	Biochimiques	Biomatériaux
Cas de base	–	–	–	<ul style="list-style-type: none"> • Éthanol • Électricité • Mix d'alcools • DDS 	<ul style="list-style-type: none"> • PLA • Électricité • Acide succinique • DDS 	<ul style="list-style-type: none"> • TPS/PLA • Son • Biocomposite
Alt. 1	Acheminement de toute la paille à l'unité de cogénération			<ul style="list-style-type: none"> • Éthanol • Électricité • DDS 	<ul style="list-style-type: none"> • PLA • Électricité • Acide succinique • DDS 	<ul style="list-style-type: none"> • TPS/PLA • Son • Électricité
Alt. 2	Broyage humide employé sur la ligne de graine			<ul style="list-style-type: none"> • Éthanol • Électricité • Mix d'alcools • Millfeed²⁰ • Protéine 	<ul style="list-style-type: none"> • PLA • Électricité • Acide succinique • Millfeed • Protéine 	<ul style="list-style-type: none"> • TPS/PLA • Son • Biocomposite • Millfeed • Protéine
Alt. 3	Prétraitement de la paille par de l'eau pressurisée à faible polarité	Ultrafiltration puis électrodialyse	Mise en pâte mécanique sur la ligne de paille	<ul style="list-style-type: none"> • Éthanol • Électricité • DDS • Xylitol 	<ul style="list-style-type: none"> • PLA • Électricité • Acide succinique • DDS • Acide acétique 	<ul style="list-style-type: none"> • TPS/PLA • Son • Biocomposite • Électricité
Alt. 4	Emploi d'une membrane de pervaporation et d'un tamis moléculaire pour la séparation sur la ligne de graine	Emploi de SFS sur la ligne de graine	–	<ul style="list-style-type: none"> • Éthanol • Électricité • Mix d'alcools • DDS 	<ul style="list-style-type: none"> • PLA • Électricité • Acide succinique • DDS 	–
Alt. 5	Unité de perlage ajoutée en amont du broyage		–	<ul style="list-style-type: none"> • Éthanol • Électricité • Mix d'alcools • Vinsasse • Son 	<ul style="list-style-type: none"> • PLA • Électricité • Acide succinique • Vinsasse • Son 	–

²⁰ Millfeed est le terme commun dans l'industrie alimentaire pour faire référence aux sous-produits des opérations de meunerie.

Les cas de base sont présentés sous la forme de schéma-blocs à la Figure 4.7. Sur chacune de ces plateformes, les capacités de production ont été définies sur la base du volume de l'opportunité de marché et des capacités des usines de production existantes. C'est ainsi que l'on a comme bases de calcul des capacités de 40 millions de gallons d'éthanol (environ 151 millions de litre), 100 000 tonnes par jour de PLA, 75 000 tonnes par jour d'alliages TPS/PLA.

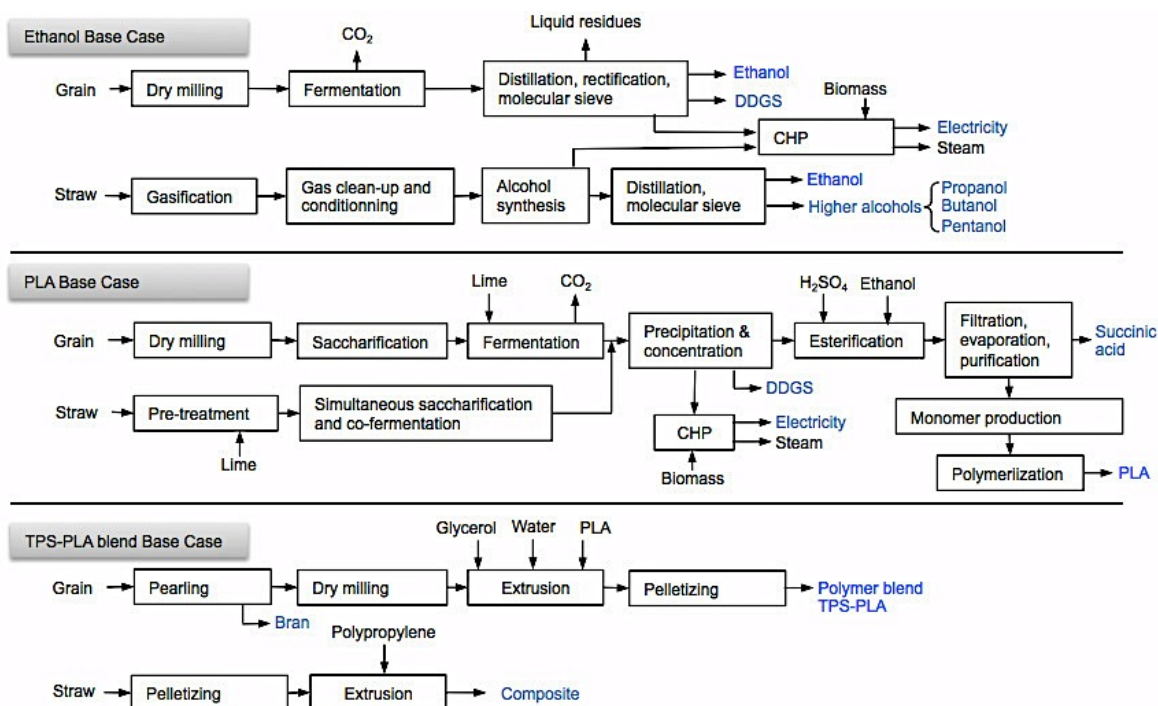


Figure 4.7 Cas de base des trois plateformes de l'étude de cas CTBI

4.5.2 Définition des critères de marché et de compétitivité

L'analyse de marché a été réalisée dans le but de développer une connaissance suffisante des défis et des risques en terme de compétitivité, de même que du potentiel et des facteurs critiques à la pénétration et au maintien sur les marchés ciblés pour les portefeuilles de produits définis. Elle s'est articulée autour de deux activités, soit (1) une collecte exhaustive d'informations par le biais d'une revue de la littérature publique pour chacun des produits constituant les portefeuilles définis, et (2) un sondage auprès d'experts de l'industrie, avec une emphase sur les éléments spécifiques à la définition d'une proposition de valeur sur chacune des plateformes de produits, dans le contexte de l'Alberta.

Les informations jugées d'intérêt lors de la revue de la littérature incluaient principalement la taille des marchés locaux et globaux, l'identification des produits concurrents, des variations historiques de leurs prix, et de la constitution des chaînes de valeur menant à leur mise sur le marché.

L'analyse des informations recueillies a permis d'établir que des points de vue de marché et de compétitivité, les problématiques majeures en lien avec le bioraffinage du triticale concernaient (1) l'accès de manière économique et durable au volume de biomasse requis par le procédé, (2) la capacité d'offrir un prix de produit assez bas pour faciliter la pénétration du marché et faire face à une éventuelle résistance de la part des compétiteurs existants, (3) la création de partenariats pour la distribution des produits, (4) le potentiel de tirer avantage de l'aspect *vert* des produits, (5) l'atteinte d'une position compétitive sur les segments de marché ciblés, (6) la robustesse face aux fluctuations du marché, et (7) la flexibilité du modèle d'affaires à adapter le portefeuille de produits aux changements de l'environnement d'affaires.

Chacune de ces problématiques a des implications à la fois sur le court et le long terme. Tandis que sur le court terme il s'agit généralement de permettre l'implantation du modèle d'affaires et la création d'un avantage compétitif, il s'agit plutôt sur le long terme de déterminer comment faire perdurer cet avantage. L'exemple peut ici être pris de l'accès à la biomasse pour lequel l'implication directe est la définition d'une proposition de valeur permettant de convaincre les fermiers de se mettre à la culture du triticale pour approvisionner la bioraffinerie, et l'implication sur le long terme est l'atteinte d'un modèle d'approvisionnement économiquement rentable et qui permette de créer assez de marges pour faire face à l'émergence éventuelle de bioraffineries concurrentes désirant utiliser la même ressource.

Les critères de prise de décision ont par la suite été définis de manière à évaluer la performance des alternatives de bioraffinage vis-à-vis des problématiques sus identifiées. Pour ce faire, en plus de devoir faire des compromis afin d'ajuster l'évaluation de la définition idéale du critère aux informations disponibles, quelques règles ont été posées afin de faciliter la définition des indicateurs, et d'assurer qu'ils sont adaptés à l'évaluation de portefeuilles multi-produits. Elles peuvent être résumées en :

- L'évaluation du critère doit permettre de caractériser les implications à court et à long terme de la (des) problématique(s) concernée(s). Cela devrait se refléter dans la justification du critère, ainsi que dans l'interprétation de son métrique ;
- Que l'évaluation se fasse sur une base qualitative ou quantitative, les critères doivent être exprimés par des métriques numériques afin d'en faciliter l'agrégation en un score unique de compétitivité ;
- L'importance des produits dans le portefeuille est exprimée par une allocation économique, c'est-à-dire en tenant compte de la contribution de chaque produit aux revenus générés par le portefeuille. Telle approche est consistante avec celle suggérée par Posada et al. [182], dont la formule ci-dessous permet l'emploi :

$$\text{Score du portefeuille} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{nombre de produits}} (\text{revenu}_{\text{produit } i} \times \text{score}_{\text{produit } i})}{\text{Revenu total du portefeuille}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

- Dans le cas où deux problématiques reliées sont combinées en un critère, le sous-critère représentant la problématique jugée la plus critique par les décideurs recevra un poids de 60%. La pondération des sous-critères bien que subjective, est ainsi définie de manière conservative afin de ne pas drastiquement avantager une problématique vis-à-vis d'une autre.

Le Tableau 4.6 ci-dessous résume les caractéristiques des critères ayant résulté de cette étape d'analyse. La prise de décision étant contextuelle à chaque plateforme de produits, les problématiques reliées au potentiel de partenariat et à l'optimisation de la chaîne logistique ont d'office été écartées du processus de prise de décision, car jugées non distinctives entre les alternatives de bioraffinage, la nature des produits constituant les portefeuilles étant similaire d'une alternative à l'autre pour une plateforme donnée.

Tableau 4.6: Description des critères de compétitivité pour l'étude de cas CTBI

Critères ²¹	Justifications	Définitions idéales	Définitions pratiques	Métriques
Accès à la biomasse – <i>Competitive Access to Biomass</i> (CAB)	Court-terme: définition d'une proposition de valeur aux fermiers pour la production de triticales. Long-terme: établissement d'un accès économiquement viable à la ressource.	Calcul des coûts de livraison de la biomasse et des marges sur la base de sa disponibilité (en qualité et en quantité) dans la région de la bioraffinerie et des termes d'éventuels contrats d'approvisionnement.	Calcul des marges sur les coûts de livraison de la biomasse calculés par le modèle de Melendez et al [209]	$CAB = \frac{BAIIA}{\text{tonne de biomasse livrée}}$
Positionnement du portefeuille de produits – <i>Product Portfolio Positioning</i> (PPP)	CT: positionnement sur les marchés existants. LT: capture de parts de marché sur les segments émergents de produits verts.	Estimation de la part de marché relativement au leader sur le segment pour le produit principal, et du potentiel de marché des co-produits sur les segments émergents de produits verts sur les 5-10 prochaines années.	Estimation (1) de la part de marché comme proxy du potentiel de pénétration sur le court-terme, et (2) du potentiel de création de marge sur le long terme via la vente des co-produits verts.	PPP = 60% pénétration de marché + 40% création de marges
Compétitivité des coûts de production – <i>Competitiveness on Production Costs</i> (CPC)	CT: pénétration des marchés et résistance à une concurrence de prix. LT: création de marges pour mitiger la volatilité, et création de barrières à l'entrée de futurs concurrents potentiels.	Comparaison des coûts de production avec ceux de la meilleure technologie sur le marché.	Evaluation de la différence relative entre les coûts de production et ceux d'un compétiteur de référence.	$CPC = \frac{\text{Coûts de production} - \text{Coûts référence}}{\text{Coûts référence}}$

²¹ Les nomenclatures en langue anglaise ont été conservées dans le but de faciliter la lecture des graphiques par la suite.

Tableau 4.6: Description des critères de compétitivité pour l'étude de cas CTBI (suite)

Critères	Justifications	Définitions idéales	Définitions pratiques	Métriques
Marges en situation de volatilité des prix – <i>Margins under Price Volatility</i> (MPV)	CT: aptitude à survivre sous des conditions de marché défavorables. LT: potentiel de créer des marges substantielles lors des périodes favorables.	Evaluation du BAIIA dans les meilleures et les pires conditions par extrapolation des données de volatilité sur les 3-5 dernières années.	Evaluation du BAIIA le plus bas comme proxy de l'aptitude à survivre sous des conditions défavorables, et du BAIIA le plus élevé comme proxy du potentiel de bénéficier de la volatilité.	MPV = 60% plus bas BAIIA + 40% BAIIA plus élevé
Stratégie technologique – <i>Technology strategy related to market competitiveness</i> (TECH)	CT: aptitude à supporter des contraintes économiques lors des phases d'implantation du modèle d'affaires. LT: flexibilité du modèle d'affaires à l'environnement compétitif.	Evaluation de la possibilité d'implanter le modèle d'affaires en plusieurs phases, puis de la faisabilité de chacune d'elles.	Evaluation de la possibilité d'implanter le modèle d'affaires en deux phases, et de la complexité de l'évolution de la phase initiale à l'implantation complète.	TECH = 60% implantation par phases + 40% flexibilité du modèle d'affaires

Les résultats obtenus à la suite du calcul des métriques pour les alternatives de bioraffinage sur les trois plateformes sont présentés dans le Tableau 4.7 ci-dessous. On peut notamment y remarquer que les alternatives de la plateforme des biocarburants présentent des marges bien moins substantielles que celles des autres plateformes, ce qui n'est toutefois pas surprenant étant donné que l'éthanol est un produit de commodité. L'alternative qui se démarque est l'Alt. 3, celle qui implique le prétraitement de la paille par de l'eau pressurisée à faible polarité, permettant ainsi la production de xylitol. Ce dernier présente une valeur marchande plus élevée que celle des autres produits constituant les portefeuilles des alternatives de la plateforme (prix moyen de marché de 4 500\$/t, alors qu'aucun des autres co-produits n'atteint la barre des 500\$/t), ce qui permet non seulement à l'Alt. 3 de présenter des marges plus confortables que toutes les autres sur la même plateforme, mais aussi de concurrencer certaines alternatives sur les plateformes de biochimiques et de biomatériaux. Ce constat a notamment permis de démontrer les bénéfices que pourraient tirer les bioraffineries du fait d'avoir un portefeuille de produits varié incluant au moins un produit à valeur ajoutée dans un volume assez important pour générer des revenus considérables. Ce constat prend encore plus de sens dans le cas où le produit principal est une commodité. Mettre une telle stratégie en place nécessite toutefois une plus grande prise de risque technologique et/ou de marché, qui nécessite d'être pesée vis-à-vis des avantages attendus. Dans le cas du xylitol, la variabilité de la demande et l'émergence d'autres substituts de sucre sur le marché créent de l'incertitude quant à la part de marché réellement atteignable, ce qui se traduit en un faible score sur le critère de positionnement.

L'observation des résultats met également en lumière deux autres éléments. Le premier est l'existence de grandes disparités entre les performances des alternatives sur la plateforme des biomatériaux, ce qui semble être justifié par la recherche d'une autosuffisance énergétique par la présence ou non d'une unité de cogénération. Les alternatives qui requièrent un plus grand apport en biomasse pour l'unité de cogénération, les Alt. 1 et 3, se retrouvent à restreindre leurs marges car les économies d'énergie réalisées ne compensent pas les coûts additionnels en triticales. Le cas de base et l'Alt. 2 quant à eux génèrent un portefeuille de produits dont la valeur absorbe aisément les dépenses additionnelles en énergie.

Le second élément est le fait que sur aucune des plateformes il n'y ait d'alternative qui apparaisse meilleure que toutes les autres sur l'ensemble des critères. Aussi, pour un critère donné, l'on peut remarquer que les alternatives présentent des différences notables d'une plateforme à l'autre, sans qu'une tendance évidente ne se dégage quant aux écarts entre les plateformes. Les stratégies supportant les combinaisons procédé-produit de l'étude de cas présentent différents avantages et limites qui se reflètent dans les scores que les alternatives obtiennent lors de l'évaluation des critères, d'où la nécessité d'employer un outil de type MCDM pour compiler les préférences des décideurs relativement aux problématiques qui leur apparaissent les plus importantes, et par ricochet des avantages compétitifs qu'il convient de maximiser. La prise de décision étant en pratique réalisée dans le contexte d'un secteur donné de l'industrie, il convenait pour le reste de l'étude de cas de se focaliser sur une plateforme d'intérêt, notamment une pour laquelle les variations entre les performances des alternatives pour les critères à l'étude étaient les plus marquées, prenant en considération les différentes perspectives d'évaluation considérées. La plateforme des biochimiques a été retenue à cet effet pour les activités subséquentes.

Tableau 4.7: Résultats de l'évaluation des critères de compétitivité pour l'étude de cas CTBI

		Critères				
Alternatives		CAB (\$/t)	PPP (0 à 1)	CPC (%)	MPV (10 ⁶ \$)	TECH (0 à 1)
Ethanol	Cas de base	108.27	0.59	-8%	44.2	0.7
	Alt. 1	11.32	0.65	92%	2.8	0.4
	Alt. 2	92.21	0.59	-2%	38.3	1.0
	Alt. 3	398.86	0.39	38%	267.7	0.5
	Alt. 4	60.11	0.59	18%	21.8	0.5
	Alt. 5	93.05	0.59	-4%	41.7	0.7
PLA	Cas de base	248.11	0.68	-38%	140.0	1.0
	Alt. 1	208.46	0.69	-28%	163.9	0.7
	Alt. 2	259.44	0.69	-38%	150.6	1.0
	Alt. 3	308.59	0.68	-47%	166.7	0.8
	Alt. 4	277.28	0.68	-43%	160.6	0.8
	Alt. 5	246.35	0.69	-38%	146.9	1.0
TPS/PLA	Cas de base	1 205.52	0.65	43%	57.6	0.4
	Alt. 1	244.43	0.60	-13%	61.7	0.4
	Alt. 2	801.45	0.76	66%	43.8	0.7
	Alt. 3	108.27	0.65	50%	58.8	0.7

4.5.3 Réduction de l'ensemble de critères de marché et de compétitivité

Dans le but d'obtenir un nombre de critères qu'il soit pratique de traiter lors de l'atelier MCDM multi-perspectives, les ensembles de critères des perspectives économique, environnementale et de compétitivité ont premièrement été réduits lors d'ateliers MCDM préliminaires, avant d'être combinés en un ensemble unique. Le panel de décideurs a été reconduit d'un atelier à l'autre, chacun présentant un double objectif, soit (1) l'identification des critères les plus importants pour la prise de décision selon la perspective considérée, et (2) la réduction de la famille de critères à un ensemble minimal mais suffisant pour couvrir les problématiques majeures de la perspective considérée, dans le contexte de la plateforme des biochimiques. L'évaluation des critères et les résultats des ateliers préliminaires sont présentés par Liard et al. [210] pour l'aspect environnemental, et par Sanaei et al. [211] pour l'aspect économique. La pondération qui a résulté des activités d'échange-et-compromis lors de l'atelier préliminaire centré sur le marché et la compétitivité est présentée à la Figure 4.8, et les scores des alternatives obtenus suite à l'application de ces poids sont présentés à la Figure 4.9.

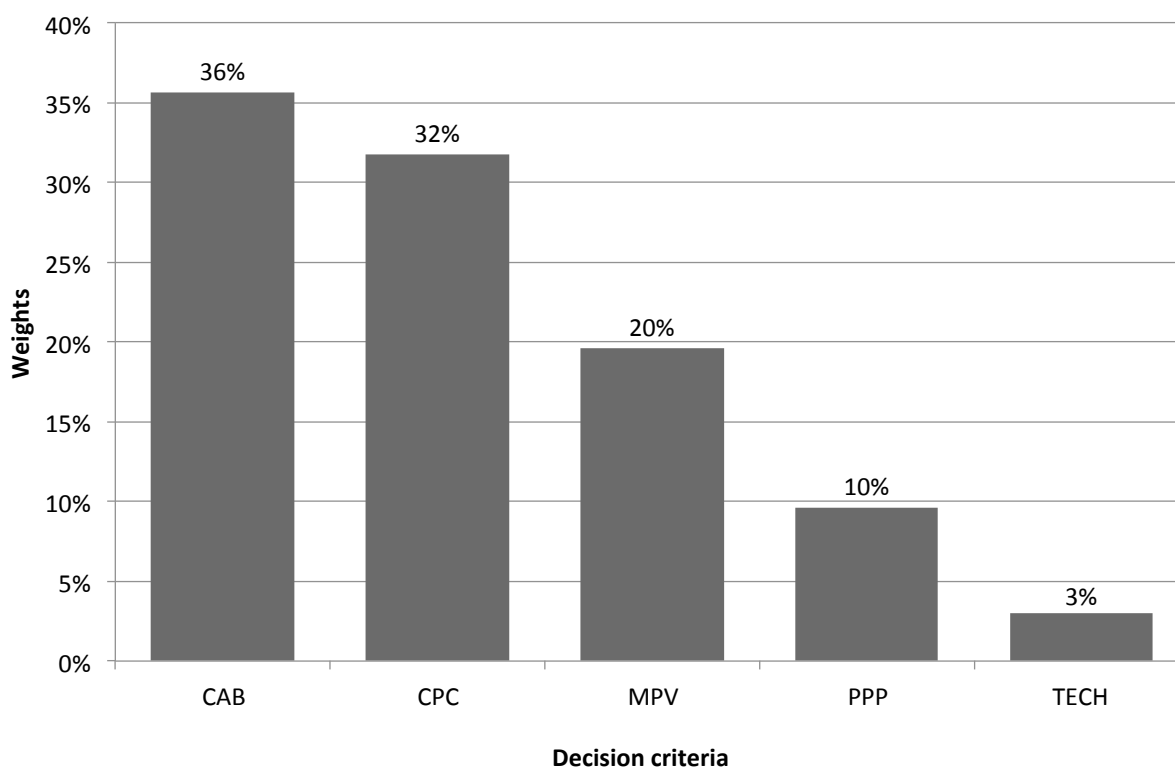


Figure 4.8 Pondération des critères – Atelier MCDM de marché et compétitivité

Le critère d'accès à la biomasse, CAB, a été sélectionné par le panel comme étant le plus important au contexte de prise de décision, la nécessité de sécuriser un accès viable à la ressource apparaissant critique au développement, mais surtout au maintien de la bioraffinerie dans le long-terme. Le fait que toutes les alternatives de la plateforme puissent générer des marges convenables vis-à-vis du prix de la biomasse n'a pas empêché les membres du panel de donner leur préférence à ce critère, l'opinion commune étant que ces marges pourraient être sérieusement menacées par l'émergence d'éventuels concurrents pour l'accès au triticales, d'autant plus que le potentiel d'établir des contrats garantis d'approvisionnement sur plusieurs décennies (comme c'est souvent le cas pour la biomasse forestière) était incertain. Dans la même optique d'établissement et de maintien du modèle d'affaires associé à la bioraffinerie, les critères CPC et MPV respectivement associés à la compétitivité des coûts de production et à la gestion de la volatilité, ont été les mieux classés après le CAB. La préférence du panel a toutefois été en faveur du CPC, la complexité et le risque associés à la pénétration de nouveaux marchés étant jugés plus importants.

Enfin, le panel a jugé que les valeurs obtenues lors de l'évaluation des critères PPP et TECH ne permettaient pas d'assez distinguer les alternatives pour qu'un poids plus élevé leur soit attribué. Il a de plus manqué au critère TECH de tenir compte de la maturité technologique dans sa définition pratique, pour être jugé plus complet.

L'ensemble de critères de compétitivité retenu pour l'atelier MCDM multi-perspectives a donc été constitué des critères CAB, CPC et MPV, du fait d'une part de l'importance majeure des problématiques qu'ils couvrent dans le contexte de la plateforme des biochimiques, et d'autre part de l'incapacité des autres critères à créer une différenciation assez importante entre les alternatives pour être d'intérêt au processus de prise de décision.

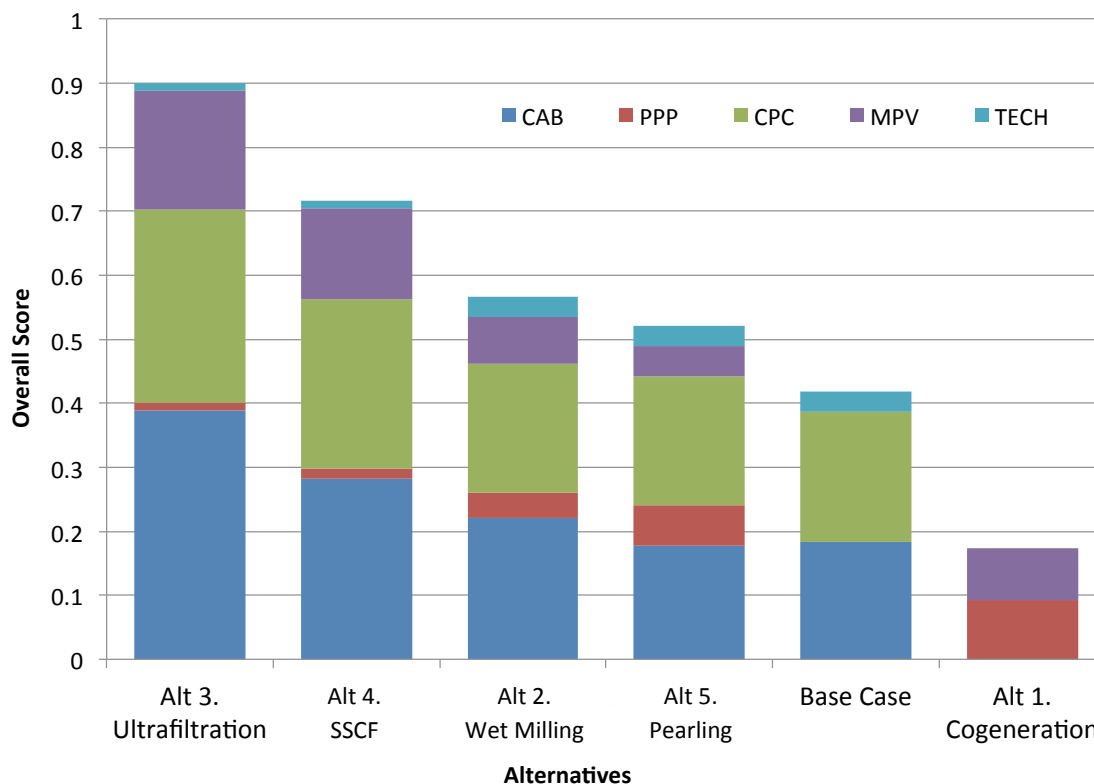


Figure 4.9 Classement des alternatives – Atelier MCDM de marché et compétitivité

L'observation du classement des alternatives permet de mettre en lumière l'impact des différentes modifications de procédé sur la compétitivité des alternatives de bioraffinage concernées. L'alternative qui se retrouve la mieux classée, Alt. 3, diffère des autres par une unité de séparation/purification des produits plus efficace, et qui en plus permet d'isoler l'acide acétique, ce qui lui procure un produit de haute valeur de plus que les autres stratégies. Le fait d'effectuer la séparation par ultrafiltration et électrodialyse a ainsi le double-effet de réduire la quantité de biomasse requise par la bioraffinerie et d'en augmenter les revenus via un co-produit additionnel, d'où de meilleures marges vis-à-vis du prix de la biomasse, du prix du PLA sur le marché, et de la volatilité. L'alternative qui est seconde au classement, Alt. 4, a mis en place une unité de SFS qui s'avère avoir un meilleur rendement et une plus faible consommation d'énergie que les saccharification et fermentation successives. Elle optimise ainsi la production de PLA et d'acide succinique, ce qui lui procure une meilleure position compétitive que l'Alt. 2 qui a plutôt misé sur le broyage humide sur la ligne de paille, pour la production de millfeed et de protéines.

Le cas de base et l'Alt. 5 obtiennent des scores moins élevés, mais qui demeurent proches de celui de l'Alt. 2. Par contre, le classement et le score obtenu par l'Alt. 1 mettent clairement en évidence la faiblesse de la stratégie consistant à dédier la ligne de paille à la production d'électricité. Sous une telle configuration, un plus grand volume de biomasse est requis pour une génération de revenus moins conséquente, ce qui affecte négativement les marges. Ces dernières induisent à leur tour de moins bonnes performances en termes de CAB et de CPC, les deux critères les plus importants.

4.5.4 Résultats de l'atelier MCDM multi-perspectives

En plus de l'intérêt évident que comporte l'association de critères de différentes perspectives dans un ensemble unique, celui-ci a été renforcé dans le cas de la plateforme des biochimiques par le fait que les ateliers préliminaires réalisés séparément pour chacune des perspectives ont tous mené à un classement différent des alternatives (voir Tableau 4.8). Alors que l'Alt. 3 est la meilleure pour les perspectives environnementale et de compétitivité, elle est devancée par l'Alt 4 selon la perspective économique. Plusieurs autres chamboulements apparaissent d'un atelier à l'autre, le plus marquant étant celui de l'Alt. 1 qui est dernière selon les perspectives économique et de compétitivité, mais seconde mieux classée selon la perspective environnementale.

Tableau 4.8: Classements des alternatives dans les ateliers MCDM préliminaires

Perspective	Classement des alternatives					
	Cas de base	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Compétitivité	5	6	3	1	2	4
Économique	3	6	4	2	1	5
Environnementale	4	2	6	1	3	5

L'ensemble retenu pour l'atelier multi-perspectives était constitué de dix critères dont trois de marché et compétitivité, trois économiques, et quatre environnementaux. Le Tableau 4.9 ci-dessous en présente les métriques, ainsi que les interprétations sur lesquelles se sont accordés les membres du panel de décision lors de l'atelier MCDM. Outre les critères de compétitivité dont le processus de réduction a été présenté à la section précédente, l'on peut noter que les trois critères économiques qui ont été retenus couvrent principalement des problématiques de profitabilité et de robustesse. Les deux premiers, le taux de rentabilité (IRR) et sa variante (DIRR), estiment la profitabilité des alternatives de bioraffinage respectivement dans les conditions normales et dans des conditions pessimistes de marché. Le troisième, la résistance à l'incertitude des marchés des intrants (RTMU), mesure la sensibilité des alternatives aux fluctuations des prix de la matière première et de l'énergie. Du point de vue environnemental, l'atelier préliminaire a évalué des critères essentiellement dérivés des indicateurs d'impact en analyse ACV. Des quatre retenus, le critère relatif aux émissions de gaz à effet de serre (GHG) a été sélectionné comme étant le plus important étant donné que la province de l'Alberta en a fait une priorité, en vue notamment de possibles lois et règlements à venir dans le domaine. Les autres incluaient, en ordre d'importance, l'utilisation de ressources non-renouvelables (NRR), l'occupation des terres (LO), et la santé humaine (HH).

Tableau 4.9: Description des critères de l'atelier MCDM multi-perspectives

Critères par perspective		Interprétations	Métriques
Compétitivité	<i>Competitive Access to Biomass</i> (CAB)	Le CAB représente l'aptitude à garantir l'approvisionnement en biomasse sur le long terme, tout en procurant une proposition de valeur compétitive aux fermiers. Il représente également le potentiel de faire face à la volatilité des prix de la biomasse.	$CAB = \frac{BAIIA}{\text{tonne de biomasse livrée}}$
	<i>Competitiveness on Production Costs</i> (CPC)	Le CPC représente le niveau de compétitivité d'une alternative donnée vis-à-vis de la référence actuelle en matière de production de PLA, de même que le potentiel de pénétrer le marché ou d'y améliorer sa position par le biais d'une stratégie de prix compétitive.	$CPC = \frac{\text{Coûts de production} - \text{Coûts référence}}{\text{Coûts référence}}$
	<i>Margins under Price Volatility</i> (MPV)	Le MPV mesure les marges générées sous les conditions défavorables de marché et celles extraites lors de fluctuations positives des prix. Il démontre ainsi le potentiel d'atteindre un modèle d'affaire durable sur le long terme.	$MPV = 60\% \text{ plus bas BAIIA} + 40\% \text{ BAIIA plus élevé}$
Économique	<i>Internal Rate of Return</i> (IRR)	L'IRR mesure le ratio profit/risque dans les conditions normales de marché. Il devrait être supérieur à 20%, cible minimale de risque pour les industries émergentes, afin de garantir la rentabilité dans le court terme avant d'envisager toute amélioration future.	IRR correspondant à $VAN = \sum_{t=0}^{22} \frac{\text{flux de trésorerie}_t}{(1 + IRR)^t} = 0$
	<i>Downside Internal Rate of Return</i> (DIRR)	Le DIRR mesure l'aptitude du modèle d'affaires à survivre et maintenir sa production dans les pires conditions de marché (prix maximum de biomasse et prix minimum du produit), en générant un TRI supérieur à 11%.	DIRR correspondant à $VAN = \sum_{t=0}^{22} \frac{\text{flux de trésorerie}_t}{(1 + DIRR)^t} = 0$
	<i>Resistance to Supply Market Uncertainty</i> (RTMU)	Le RTMU mesure la sensibilité du projet à la fluctuation des valeurs sur le marché de paramètres clés pour le bioraffinage (matière première et énergie). Un projet au RTMU élevé serait plus robuste face aux sources externes d'incertitude.	$RTMU = \frac{BAII}{\text{coûts (matière première + énergie)}}$

Tableau 4.9: Description des critères de l'atelier MCDM multi-perspectives (suite)

Critères par perspective		Interprétations	Métriques
Environnementale	<i>Greenhouse Gases Emissions (GHG)</i>	Le GHG représente la contribution potentielle de la bioraffinerie aux changements climatiques via l'émission de GES, en terme de nombre équivalent d'automobiles.	$GHG = \frac{\text{Emissions annuelles GES bioraffinerie}}{\text{Emissions annuelles moyennes GES d'une auto au Canada}}$
	<i>Non-Renewable Resources (NRR)</i>	Le NRR mesure l'utilisation de ressources non-renouvelables par la bioraffinerie en comparaison avec la disponibilité du charbon, matière de prédilection dans la province.	$NRR = \frac{\text{Consommation d'énergie fossile}}{\text{Réserves de charbon disponibles}}$
	<i>Land Occupation (LO)</i>	Le LO mesure la proportion de terres utilisées pour les besoins de la bioraffinerie, relativement à celle utilisée pour la culture du blé aux fins alimentaires, dans la région des Prairies. Le parallèle peut être fait ici avec une éventuelle compétition avec l'industrie alimentaire.	$LO = \frac{\text{Superficie occupée pour les besoins de la bioraffinerie}}{\text{Superficie occupée pour la culture du blé dans les Prairies}}$
	<i>Human Health (HH)</i>	Le HH représente la contribution de la bioraffinerie aux impacts sur la santé humaine (perte d'années de vie en bonne santé) dus à l'évitement d'émissions polluantes autres que les GES, particulièrement les particules fines, en comparaison avec les activités industrielles courantes dans la région de Red Deer.	$HH = \frac{\text{Impact de la bioraffinerie}}{\text{Impact des activités courantes dans la région de Red Deer}}$

La Figure 4.10 et la Figure 4.11 ci-dessous sont tirées de la publication de Sanaei et al. [212], qui présente dans le détail les résultats des activités de prise de décision multi-perspectives. Le premier constat à leur observation est la constitution du trio de tête (IRR, GHG et CAB), qui regroupe les premiers critères des ateliers préliminaires selon les différentes perspectives. L'IRR creuse toutefois un écart marqué sur les deux autres, ce qui met premièrement en évidence l'importance de la rentabilité dans le développement de toute activité de bioraffinage. La pertinence de considérer un ensemble diversifié de critères lors de la prise de décision ressort également. Elle est appuyée par le fait que le groupe des cinq premiers critères englobe les trois perspectives (un critère environnemental, deux économiques et deux de compétitivité), et que ceux-ci ont tous obtenu des pondérations supérieures à 10%.

L'écart est assez faible entre les critères, ce qui était prévisible vu leur nombre. Les deux derniers critères, HH et MPV, sont cependant bien distancés des autres. Le critère de santé humaine n'a pas reçu les faveurs du panel car ayant un impact local, alors que les autres critères environnementaux ont des impacts régionaux ou globaux. Comparé aux autres critères évaluant la robustesse, le MPV est celui qui crée la moins bonne distinction entre les alternatives. Il doit également son très faible poids à la complémentarité jugée par le panel entre lui et le RTMU.

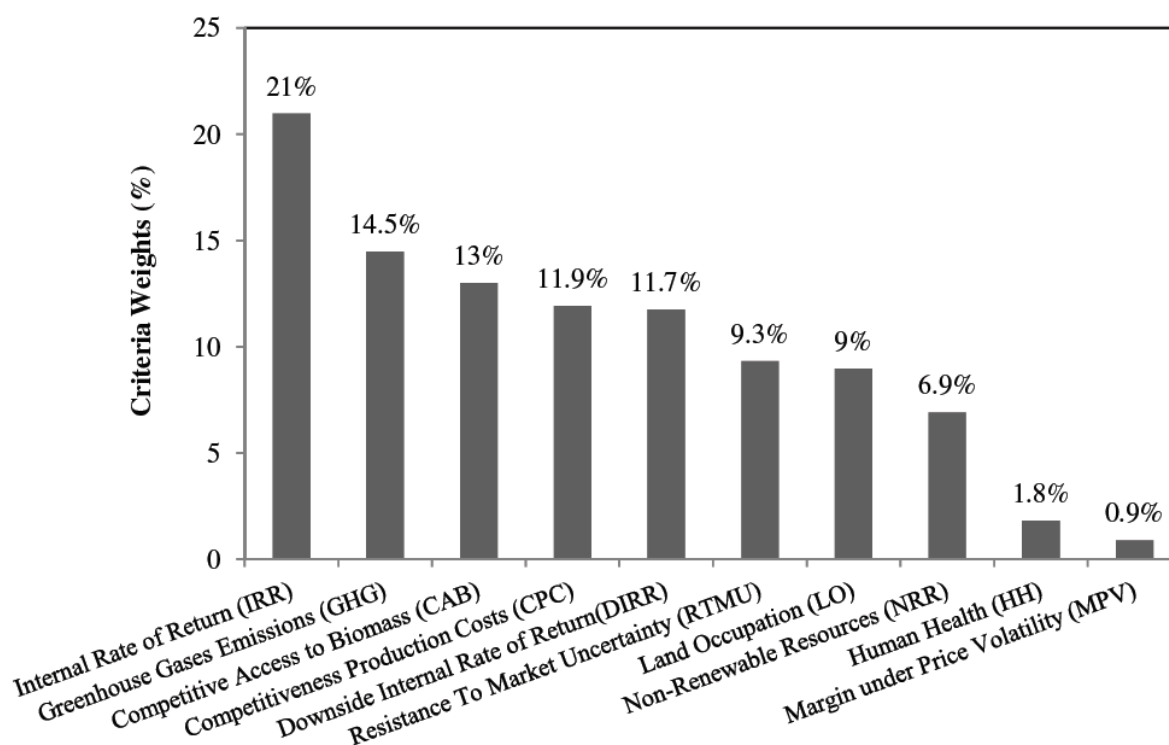


Figure 4.10 Distribution du poids des critères – MCDM multi-perspectives

S'agissant du classement des alternatives sur la base de leurs scores globaux, deux d'entre elles, les Alt. 3 et 4, se démarquent en créant un écart considérable sur le reste de la plateforme. Toutes les deux sont avantagées par différentes combinaisons de critères à forte pondération, notamment l'IRR, le DIRR, le CPC et dans une certaine mesure le LO. L'Alt. 4 tout d'abord qui arrive en seconde position s'appuie fortement sur les économies de coûts réalisées via l'intensification du procédé, alors que l'Alt. 3 s'appuie sur la production de xylitol pour accroître sa génération de marge, ce qui lui procure un avantage dans la perspective de compétitivité. Sur la base de leurs scores et de l'écart avec les autres alternatives, les deux premières alternatives ont été sélectionnées comme préférentielles.

Le cas de base et les Alt. 2 et 5 se tiennent dans un intervalle assez étroit de par les similitudes entre leurs offres de produits et leurs performances, qui les rendent difficilement distinguables. Ces alternatives ont été classées en observation, comme possible variantes aux alternatives préférentielles.

À l'autre bout du classement on retrouve assez logiquement l'Alt. 1 qui dédie la ligne de paille à la production d'électricité, et qui ne trouve de réelle justification que dans ses performances environnementales. Cette alternative a reçu un verdict d'élimination de la part du panel.

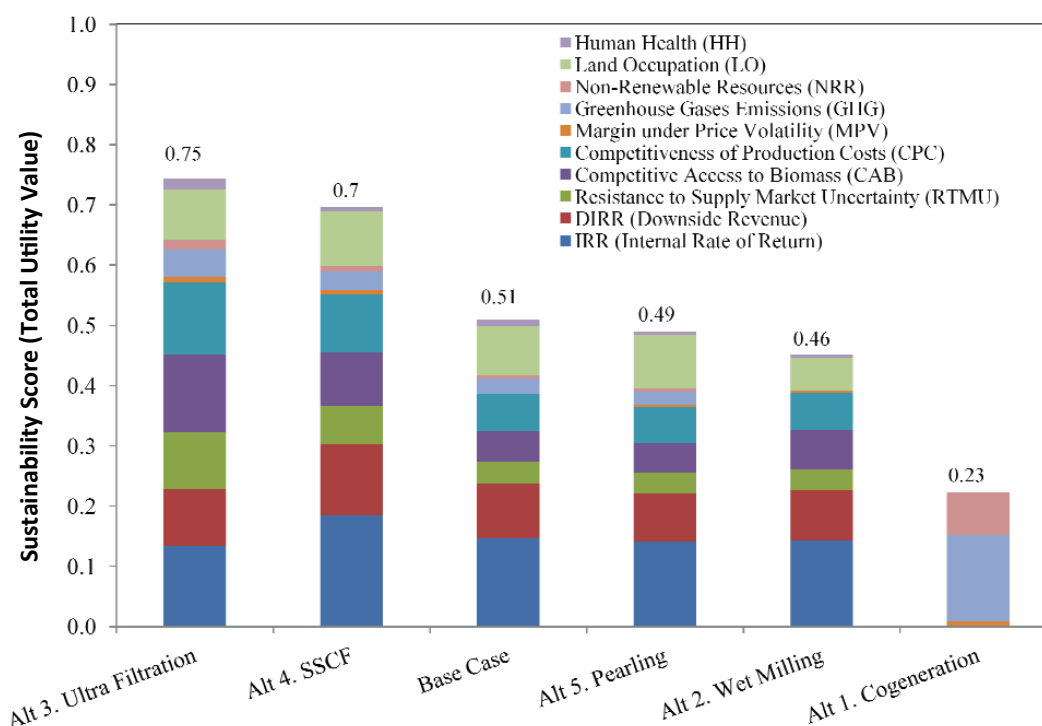


Figure 4.11 Classement des alternatives de la plateforme PLA – MCDM multi-perspectives

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

Les compagnies forestières désirant transformer leur modèle d'affaires par l'implantation du bioraffinage font face à de nombreux défis. Ils sont d'ordre technologiques d'abord car le bioraffinage implique l'intégration de nouveaux procédés, mais surtout d'ordre économique et stratégique étant donné l'affaiblissement de bon nombre de compagnies dans le secteur forestier, et le fait que la diversification de produits qui est nécessaire pour assurer leur pérennité implique l'exploration de nouveaux segments de marché. L'ensemble de ces défis génère indéniablement de l'incertitude, laquelle peut accroître rapidement selon le niveau de familiarité de la compagnie forestière avec le type de technologie, de produit, ou de marché envisagé.

Les opportunités de bioraffinage ne manquent pas, toutefois pouvoir identifier dans la multitude de possibilités les quelques alternatives qui sont le plus susceptibles d'amener la compagnie à atteindre ses objectifs de transformation et que cette dernière soit un succès durable, n'est pas chose aisée. Le présent projet de recherche s'est penché sur cette problématique avec pour objectif de développer une approche de conception de produit pour l'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage, où seraient considérées les différentes perspectives d'atténuation de risque et de création de valeur auxquelles les compagnies forestières font face, dans le but de les guider dans leur processus de transformation. Chaque compagnie présentant un cas unique, l'approche devrait intégrer la gestion d'éléments spécifiques au contexte de chacune d'elles, lui permettant de faire ressortir ses avantages et de gérer les risques qui lui sont propres.

Différents éléments influençant le développement de stratégies de bioraffinage sont discutés ci-dessous, en lien notamment avec l'adaptation d'une approche de type stage-and-gate pour les besoins de l'évaluation de portefeuilles de produits de bioraffinage.

5.1 Utilisation des motivations et barrières de la compagnie pour le triage au Gate 1

Le caractère exploratoire des méthodes employées dans la littérature pour l'identification des opportunités de bioraffinage a été soulevé. Énumérer les différentes combinaisons biomasse-procédé-produit(s) qu'une compagnie forestière pourrait envisager donne généralement lieu à une liste interminable de possibilités, d'où le besoin de la réduire à un nombre gérable. Pour ce faire, l'approche de triage suivie lors de l'exécution du présent projet a eu pour socle l'identification et l'interprétation des motivations et barrières propres à la compagnie forestière. Celles-ci se sont révélées être d'une importance capitale à la fois pour la génération et pour le tri des alternatives.

Tout d'abord, la clarification des barrières au développement du bioraffinage dans la compagnie forestière donne une orientation à la génération des stratégies. Que celles-ci soient liées à des limitations extérieures (ex. accès limité à la biomasse) ou qu'elles soient auto-imposées par la compagnie comme ce fût le cas lors de l'étude de cas principale, elles permettent de définir des frontières à l'ensemble d'opportunités de bioraffinage, en exprimant implicitement un critère de pertinence au contexte de transformation. Pareille coordination des efforts est trouvée dans la littérature dans l'approche suggérée par Cooper pour l'identification des arènes stratégiques de nouveaux produits, par la revue des axes « qui » (les segments de consommateurs ciblés), « quoi » (les produits par lesquels ils sont ciblés), et « comment » (les technologies intégrées aux produits) en partant du secteur d'activité principal de la compagnie en transformation [91].

En lien directement avec l'objectif énoncé de réduire considérablement le nombre d'alternatives considérées, l'interprétation des motivations et barrières a amené à définir deux critères de triage pour le Gate 1, dont l'emploi a permis d'isoler trois alternatives, deux accessibles dans le court terme, et une à long terme. Ayant dénombré initialement près d'une cinquantaine de dérivés potentiels de lignine dans la littérature [126], la réduction à trois options est significative, et consistante avec l'hypothèse de recherche émise. On constate d'une part qu'il n'y a parmi les options retenues aucune qu'il soit évident d'éliminer, toutes étant pertinentes au contexte de la compagnie. D'autre part l'ensemble peut effectivement être considéré gérable, car même après définition des plans d'implantation par phases et évolution des trois alternatives en sept stratégies, l'on obtient un effectif assez faible pour maintenir l'aspect pratique des panels de décision à tenir au Gate 2 à venir.

Il convient de relever que le triage réalisé au Gate 1 met l'emphasis sur le contexte spécifique à la compagnie forestière, et que parmi les options éliminées se retrouvent certainement quelques unes qui auraient pu être retenues sous d'autres circonstances. En d'autres termes ces options ne sont pas non viables en soit, ce sont plutôt les critères employés qui amènent à cette conclusion. Un défi majeur à cette étape réside dans l'aptitude à lire entre les lignes dessinées par les informations fournies par la compagnie, et à les interpréter adéquatement. En pratique, outre le besoin d'améliorer leur situation économique qui s'explique aisément au regard de la santé générale du secteur forestier, les motivations des compagnies demeurent souvent floues, et ce même pour les personnes impliquées à l'interne. Les compagnies affichent certes des profils de tolérance au risque différents, elles semblent parfois initier des projets de bioraffinage sans avoir au préalable défini des indices de performance quant à la transformation à mettre en place, ou encore clarifié la place que devrait occuper la nouvelle activité de bioraffinage vis-à-vis de l'activité principale. On semble plutôt faire face à des situations où l'issue de la première expérience servira de marque de référence pour les initiatives futures, et pourraient en dicter la naissance. Dans le cadre de la première étude de cas des sondages ont été réalisés auprès de membres de la direction des départements chargés de mener l'initiative de bioraffinage, et la définition de visions stratégiques exprimant l'envergure de la transformation (localisée à l'usine ou étendue à l'échelle de l'entreprise) a contribué à en clarifier les contours. Telle approche convient bien aux contextes d'implantation en retrofit, et pourrait être adaptée à des contextes greenfield. Des réponses recueillies lors des sondages, l'extrapolation aux critères de triage relève cependant plus du savoir-faire de l'analyste que d'une science exacte.

5.2 Considération d'approches d'implantation par phases des stratégies de bioraffinage dans le processus stage-and-gate

Dans les étapes qui ont suivi le Gate 1, les alternatives de bioraffinage retenues ont été converties en stratégies par l'ajout aux combinaisons procédé-produits d'une dimension d'implantation séquentielle, en lien avec l'objectif énoncé d'améliorer la convenance du processus stage-and-gate pour l'évaluation des alternatives impliquant des portefeuilles multi-produits, notamment l'appréciation du risque associé.

Les problématiques majeures identifiées lors des études sur les alternatives de bioraffinage ayant été reflétées dans les critères décisionnels, la perspective qu'ils procuraient vis-à-vis de l'appréciation du risque a été évaluée à travers l'interprétation que les membres des panels de décision ont fait des critères obtenus suite à la considération d'une approche d'implantation séquentielle (étude de cas du bioraffinage de la lignine, voir Tableau 4.4) et en ne considérant que les combinaisons procédé-produits (étude de cas du bioraffinage du triticales, voir Tableau 4.9). Les deux panels bien que réalisés dans des contextes différents ont eu certains critères en commun, et il ressort une association au risque plus claire et plus directe dans l'interprétation du critère, dans le cas où celui-ci découlait de la considération d'une approche par phases. L'exemple le plus marquant est celui du TRI pour lequel les membres du panel d'évaluation des stratégies de bioraffinage de la lignine ont établi la borne supérieure de l'intervalle d'échange-et-compromis à une valeur de 75% suite à une meilleure identification des paramètres clés influençant le retour sur investissement à chaque phase d'implantation des stratégies, alors que pour l'étude de cas du triticales la borne supérieure a été établie par défaut à la valeur la plus élevée du TRI parmi les alternatives à l'étude. Ceci a eu comme impact de diminuer la pondération attribuée au critère dans le premier cas, même si dans les deux contextes il avait été sélectionné comme critère le plus important à la prise de décision.

En effet, à moins qu'elle ait un niveau de tolérance au risque très élevé, il est improbable qu'une compagnie forestière envisage d'introduire sur un marché sur lequel elle n'a pas des marques, des produits de valeur ajoutée issus de différentes composantes du bois simultanément. En intégrant la dimension du plan d'implantation par phases à la définition des stratégies, l'on obtient une perspective plus réaliste, se rapprochant d'une approche de pénétration des nouveaux segments de marché un à la fois. En ne considérant que les combinaisons procédé-produits, l'on se retrouve comme dans le cas de l'étude sur le bioraffinage du triticales à comparer les déclinaisons à long-terme du portefeuille (Phase II), sans tenir compte des facteurs qui pourraient compromettre leur viabilité dans le court-terme (soit à l'équivalent d'une Phase I). Telle carence pourrait entraîner des erreurs d'appréciation vis-à-vis des risques réellement associés à une alternative de bioraffinage donnée, lesquels sont plus facilement identifiables en considérant une implantation par phases. Les critères qui en découlent permettent autant de comparer les portefeuilles à produit unique que les portefeuilles multi-produits, ce qui est une amélioration majeure à l'application de l'approche stage-and-gate pour l'évaluation des alternatives de bioraffinage.

Concernant le processus de NPD, il convient également de relever que le fait de considérer des plans d'implantation séquentielle des portefeuilles de produits permet d'intégrer aux stratégies de bioraffinage des approches d'atténuation de risque dès leur définition dans la FFE. Ceci aura pour effet d'optimiser les *stages* et les *gates* en aval dans le processus de NPD, en dirigeant l'attention sur les sources majeures de risque résiduel. À cet effet, il serait recommandé de renouveler l'utilisation des critères ayant reçu les poids les plus élevés au Gate 2 comme critères d'approbation aux *gates* subséquents. Leur évaluation permettrait notamment de mesurer le niveau d'atténuation du risque associé à une stratégie donnée, d'un *stage* à l'autre.

5.3 Identification des stratégies préférentielles au Gate 2

La tenue de panels MCDM au Gate 2 dans les contextes du bioraffinage de la lignine et du triticales a permis de mettre en application l'évaluation des critères relatifs à la proposition de valeur et au risque, dans le but premier d'établir des préférences entre les stratégies, mais aussi de valider la nécessité de considérer des perspectives de marché et de compétitivité lors de l'évaluation des stratégies de bioraffinage. Ils ont, dans cette mesure, contribué à répondre conjointement aux deux derniers objectifs du projet de recherche.

5.3.1 Établissement de préférences entre les stratégies

Pour ce qui est de l'établissement de préférences entre les stratégies/alternatives, force est de constater que l'emploi des ensembles de critères développés utilisant une méthodologie de panels MCDM a permis de manière effective de distinguer des stratégies préférentielles, un ensemble de stratégies à rejeter, et finalement un dernier ensemble constitué des stratégies à garder en observation et à éventuellement reconsidérer sous certaines conditions. Cette ségrégation résulte de l'interprétation (1) du score obtenu par chaque stratégie, et (2) des contributions respectives des critères aux scores des stratégies. Ces dernières amènent notamment à dresser des profils de potentiels de création de valeur et d'atténuation de risque spécifiques aux stratégies.

De l'issue des discussions ayant suivi la pondération des critères et le calcul des scores globaux des alternatives dans les deux contextes d'études de cas, une tendance ressort :

- L'identification des stratégies à rejeter, et d'au moins une des stratégies préférentielles repose essentiellement sur l'interprétation des scores globaux. Dans le cas du bioraffinage de la lignine (voir Figure 4.6) ce sont les deux dernières stratégies qui ont été écartées et la première sélectionnée comme préférentielle, alors que dans le cas du bioraffinage du triticales (voir Figure 4.11) la dernière alternative s'est vue disqualifiée par son faible score, et les deux premières ont été identifiées comme préférentielles en raison de leurs scores et du grand écart qu'elles ont creusé sur le peloton. De plus,
- L'interprétation des profils de contributions des critères aux scores globaux des stratégies supporte la décision d'approuver une stratégie au *stage* suivant ou de la mettre en attente. Le cas du bioraffinage de la lignine illustre au mieux ce postulat. En effet, la proximité entre les scores des stratégies de deuxième et troisième rangs ne permettant pas de les départager, l'observation des profils de contribution des critères a permis de les différencier, de même que d'identifier de possibles complémentarités de chacune avec la stratégie de premier rang, d'où la décision d'approuver les trois stratégies au *stage* suivant. D'autre part, la similarité des profils des stratégies de premier et de cinquième rangs, de même que des stratégies de second et de quatrième rangs a entraîné le choix de mettre les stratégies de quatrième et cinquième rangs en attente, et de les garder pour assurer de la flexibilité au développement des stratégies dans les *stages* subséquents.

Il serait précipité de vouloir généraliser ces constats tant les résultats d'un atelier MCDM sont dépendants des stratégies à l'étude et des critères employés pour les évaluer, toutefois les résultats obtenus tendent à valider l'hypothèse selon laquelle la distinction entre les stratégies au Gate 2 repose sur l'évaluation des potentiels de création de valeur et d'atténuation de risque. La pondération des critères dans les deux cas (voir Figures 4.5 et 4.10) confirme la complémentarité entre les deux perspectives, les décideurs ne recherchant pas uniquement à maximiser la valeur créée ou à mitiger les risques, mais bien à trouver un équilibre entre les deux.

5.3.2 Place des critères de marché et de compétitivité

En ce qui concerne la représentation des perspectives de marché et de compétitivité dans les panels d'évaluation des stratégies de bioraffinage, les résultats des panels MCDM ont permis d'apprécier la nécessité de les considérer pour la prise de décision relative aux stratégies de bioraffinage au Gate 2.

Dans le cadre de l'étude de cas du bioraffinage de la lignine, une première marque de l'importance des critères de marché et de compétitivité a été leur présence en grand nombre dans l'ensemble final de critères obtenu après que toutes les étapes de triage aient été réalisées. L'ensemble final a en effet compté quatre critères représentant ces perspectives pour deux critères économiques, tandis que les critères environnementaux ont été repoussés aux étapes subséquentes du processus de NPD.

En outre, les critères de marché et de compétitivité ont dans chacun des contextes été parmi les mieux classés à la suite des activités d'échange-et-compromis. Dans le cas du bioraffinage du triticales où les critères étaient plus variés le critère de compétitivité le mieux classé arrive certes en troisième position, mais l'on peut surtout noter la présence de deux critères de compétitivité parmi les cinq premiers. La catégorie place ainsi un critère de plus que la perspective environnementale (qui comptait pourtant plus de critères au départ) et fait aussi bien que la perspective économique. Plus que leur classement, leurs poids leur permettent de contribuer significativement au score global des alternatives, principalement celles occupant les deux premiers rangs.

La seule ombre au tableau lors de cette étude de cas est le poids global obtenu par la catégorie de compétitivité. En additionnant les poids des critères, l'on obtient 42% et 32% pour les catégories économique et environnementale respectivement, alors que la catégorie de compétitivité ne récolte que 26%. Le très faible poids obtenu par le critère MPV en est la principale cause, lequel a vu son importance être transposée au critère RTMU avec lequel il a été jugé complémentaire, ce dernier revêtant alors une double perspective économique-compétitivité. En s'alignant sur le même esprit que le panel, la catégorie de compétitivité aurait alors un poids total de 35%, soit trois points de plus que la catégorie environnementale.

Plutôt que de remettre en question l'importance des critères de marché et de compétitivité, ce fait a plutôt mis en relief le défaut de l'approche de triage des critères par une cascade d'ateliers MCDM séparés, qui n'aura pas assuré la non redondance de la famille résultant de la mise en commun des critères retenus.

Finalement, deux leçons importantes sont ressorties des expériences d'application des critères de marché et compétitivité en vue d'une éventuelle amélioration :

- Il n'est pas idéal de combiner des indicateurs de création de valeur et de mitigation de risque dans un critère unique, comme cela a été le cas pour le critère MPV. En effet, une trop grande différence entre les indicateurs pourrait tendre à déséquilibrer les valeurs du critère et créer une illusion de positivité ou de négativité. Il serait plus convenable d'évaluer les potentiels de création de valeur et de mitigation de risque dans des critères séparés, l'équilibre entre les deux concepts se reflétant ensuite dans le poids que le panel attribuerait à leurs critères respectifs. Aussi,
- Il est primordial que la définition pratique et le métrique d'un critère donné, bien que consciemment imparfaits, réussissent à convaincre les membres du panel quant à la représentation de la problématique couverte par le critère. Dans le cas contraire, certains d'entre eux pourraient développer un biais vis-à-vis du critère, lequel se reflèterait alors par une faible pondération. Ce constat est valide aussi dans le cas d'un sous-critère peu convaincant, qui tendrait à tirer la pondération du critère global vers le bas.

5.4 Méthodologie d'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage

En suivant les activités de conception et de prise de décision réalisées dans les études de cas, l'on peut résumer le processus d'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage dans la FFE en une approche de type stage-and-gate constituée de deux *stages* et deux *gates*, qui correspond à une adaptation des *stages* de Découverte et de Définition du projet, dans le processus classique de deuxième génération. La Figure 5.1 en propose un aperçu global.

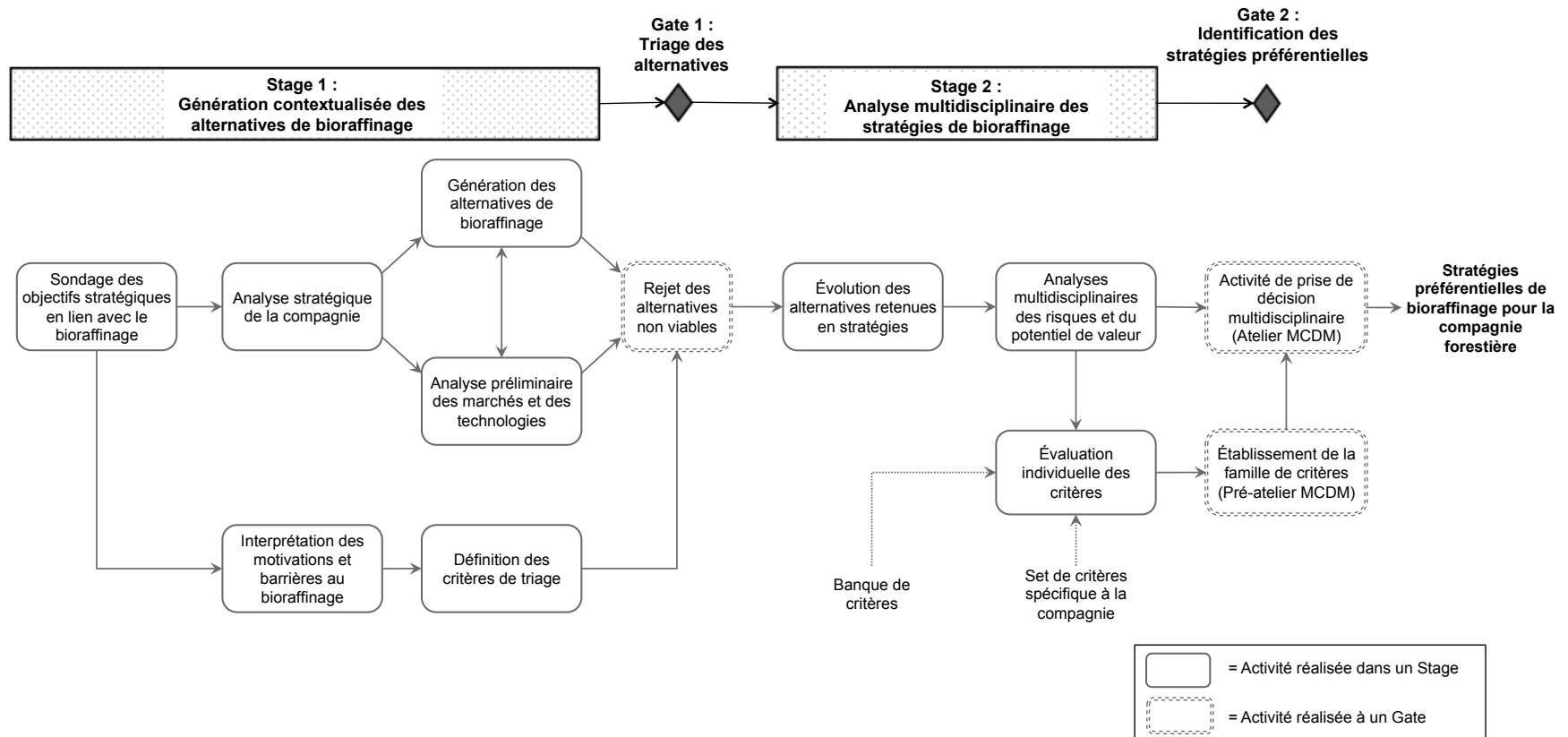


Figure 5.1 Approche stage-and-gate d'identification des stratégies préférentielles de bioraffinage dans le contexte d'une compagnie forestière

L'activité de démarrage consiste en la clarification des objectifs de la compagnie forestière relativement à l'implantation du bioraffinage, principalement de la vision à long-terme qu'elle a quant à son envergure et la place stratégique qu'il occupera vis-à-vis de l'activité principale. Cette étape est cruciale car d'elle découlent les frontières du projet que l'interprétation des barrières au bioraffinage permet de définir. Leur considération oriente la génération des alternatives de bioraffinage vers des opportunités pertinentes au contexte de la compagnie forestière. Celles-ci peuvent être scindées en options accessibles à court ou à plus long terme, par anticipation d'une implantation séquentielle de l'initiative de bioraffinage.

Le premier jalon de triage a pour objectif d'épurer l'ensemble d'alternatives en éliminant celles pour lesquelles il apparaît clairement qu'elles ne correspondent pas aux objectifs de l'initiative de transformation. Les critères utilisés à cet effet sont déduits des motivations et barrières spécifiques à la compagnie forestière, et évalués de manière stricte (showstoppers).

Pour les alternatives retenues au sortir du Gate 1, des plans d'implantation généralement en deux phases sont définis en établissant le positionnement sur la chaîne de valeur associé à chacune des phases, de même que le mode de développement en intégration verticale ou horizontale qui relie les phases. La phase correspondant à la vision dans le plus long-terme est définie dans un premier temps et concentre les risques de marché, puis la stratégie permettant de la mettre en place est définie rétroactivement avec une emphase sur l'atténuation des risques technologiques dans le court terme. Les stratégies ainsi définies sont ensuite analysées selon des perspectives technico-économique, environnementale et de compétitivité. Selon le cas, la réalisation d'études complémentaires pourrait être adapté, mais leur interprétation devrait tenir compte de l'incertitude encore élevée dans les premières étapes du processus de NPD.

Les diverses études mènent à l'identification de la proposition de valeur et des risques associés aux portefeuilles de produits à chaque phase d'implantation, desquels découlent les critères employés pour l'évaluation des stratégies et l'établissement de préférences entre celles-ci. La considération d'une implantation séquentielle de la stratégie de bioraffinage est primordiale à cet effet car elle permet de concrétiser les voies d'atténuation de risque dès les étapes initiatrices du processus de NPD. De plus, elle oriente les étapes en aval dans le processus vers une meilleure appréciation des sources majeures de risque, ce qui améliore la convenance de l'approche stage-and-gate à l'évaluation des stratégies de bioraffinage impliquant des portefeuilles multi-produits.

La tenue d'une activité de prise de décision multidisciplinaire permet ensuite au Gate 2 d'identifier les stratégies préférentielles. L'emploi d'une méthode de type MCDM est recommandé afin d'agrèger les préférences des décideurs vis-à-vis des critères des diverses perspectives. L'ensemble de critères employé résulte d'un triage basé sur l'analyse séquentielle et itérative de propriétés spécifiques aux critères individuels (pertinence, importance, représentativité, discrimination, fiabilité), et à la famille qu'ils forment (non redondance, exhaustivité, manœuvrabilité, opérationnalité).

Le triage des critères est effectué par le panel de décideurs en amont de l'atelier de prise de décision, mais il est crucial pour la fluidité du processus de décision au *gate* que l'équipe de conception réalise une, voire plusieurs itérations de la phase d'évaluation des critères individuels, dans le but de prévenir d'éventuels délais entre le pré-atelier et l'atelier de prise de décision.

Nul ne peut assurer le succès futur des stratégies retenues. L'approche permet toutefois d'identifier de manière systématique celles qui dans le contexte de la compagnie forestière et selon les préférences de ses décideurs, sont les plus prometteuses. La prise de décision au Gate 2 permet également d'identifier un ensemble de stratégies de recours aux stratégies préférentielles, qui selon les circonstances (évolution des conditions de marché, des technologies, des lois et règlements, par exemple) pourraient être reconsidérées.

Il convient de mentionner que la mise en application de la méthodologie dans et par les compagnies forestières requiert :

- Le savoir-faire d'une personne chargée de superviser l'exécution du processus de NPD, laquelle assurerait la liaison entre l'équipe de conception des stratégies de bioraffinage et les membres du panel décisionnel aux *gates*. Cette personne ne devrait idéalement pas être directement impliquée dans les activités de conception.
- La constitution d'une équipe multidisciplinaire pour la conception des stratégies de bioraffinage. La réalisation des études relatives au développement d'une bioraffinerie requiert des compétences variées, et il serait trompeur de limiter la responsabilité de la conception des procédés et/ou des produits à l'équipe d'ingénierie.
- L'implication active des personnes qui ont une autorité décisionnelle dans la compagnie et sur lesquelles repose l'approbation des nouveaux projets, dans les activités de prise de décision. Sans cela, l'approche stage-and-gate sus définie n'aurait aucun impact concret.

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le présent projet de recherche a été réalisé dans le contexte de la transformation du modèle d'affaires des compagnies forestières, qui dans le but de revitaliser leur compétitivité entreprennent la diversification de leurs portefeuilles de produits. Cette diversification passe par l'implantation de technologies de bioraffinage, la valorisation des diverses sources de biomasse disponibles, et la pénétration de nouveaux marchés sur lesquels les compagnies forestières n'ont pas souvent leurs marques. Elles font face à une multitude d'opportunités et de défis, créant le besoin de définir une approche systématique afin de les guider dans le processus d'identification et de sélection des alternatives de bioraffinage les plus prometteuses. Tel a été l'objectif principal de ce projet, au cours duquel ont tour à tour été revues les notions relatives à la conception et le développement de nouveaux produits, à la définition du portefeuille de produits de bioraffinage, et aux méthodes et outils d'évaluation et de sélection de projets. La réalisation de deux études de cas – l'une sur l'implantation du bioraffinage basé sur la lignine en retrofit dans une compagnie forestière et l'autre sur le développement d'une bioraffinerie de type greenfield basée sur le triticales – a supporté les efforts de développement de critères de triage pour l'évaluation des stratégies de bioraffinage, de même que l'intégration d'approches d'implantation séquentielle de celles-ci. Ces travaux ont mené à la définition d'une adaptation du processus stage-and-gate de deuxième génération, soit une méthodologie à deux *stages* et deux *gates* couvrant les étapes initiatrices du processus de développement (la FFE), qui convient à l'évaluation des stratégies impliquant des portefeuilles multi-produits et qui permet d'identifier les stratégies préférentielles dans le contexte d'une compagnie forestière donnée. Les objectifs établis dans le cadre du présent projet ont en ce sens été pleinement atteints.

6.1 Contributions au corps des connaissances

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ont contribué à l'ensemble des connaissances par la définition d'une approche de type stage-and-gate où peuvent être évalués des portefeuilles à produit unique et multi-produits, et qui guide le processus d'identification et de sélection des stratégies préférentielles de bioraffinage pour des compagnies forestières en transformation, de manière propre à leur contexte. Elle intègre notamment :

- La génération des alternatives de bioraffinage par la considération des barrières externes et auto-imposées à la transformation stratégique par le bioraffinage, qui sont spécifiques à la compagnie forestière.
- La considération d'approches d'implantation séquentielle lors de la définition des stratégies de bioraffinage, laquelle permet d'intégrer des méthodes d'atténuation de risque, ainsi que d'identifier les sources majeures de risque selon diverses perspectives.
- Une approche de sélection en deux étapes. Les motivations et barrières en lien avec le bioraffinage sont utilisées pour le triage initial, ensuite des critères exprimant les potentiels d'atténuation de risque et de création de valeur selon différentes perspectives sont utilisés pour établir les préférences entre les stratégies à la seconde étape.
- Un ensemble de critères permettant d'évaluer les performances des stratégies de bioraffinage vis-à-vis des problématiques de marché et de compétitivité. Les critères peuvent être employés par l'entremise de divers outils de prise ou d'aide à la décision.

6.2 Orientation des travaux futurs

La méthodologie développée dans le cadre du présent projet s'étant limitée à la FFE du processus de développement des stratégies de bioraffinage, les réflexions qu'elle a initiées pourraient être étendues à la résolution d'autres problématiques dans les étapes de développement subséquentes. Elles pourraient inclure entre autres :

- La définition dans le détail des *stages* et des *gates* dans les étapes en aval de la FFE, notamment du développement conjoint du produit et de la technologie. Peu de technologies de bioraffinage ont été prouvées à l'échelle commerciale, et les produits se doivent d'atteindre des performances au moins comparables à celles des produits déjà sur le marché. Selon leur niveau de tolérance au risque, les compagnies implantant des stratégies de bioraffinage devront contribuer à amener à maturité simultanément la technologie et le(s) produit(s) de bioraffinage. Au meilleur de nos connaissances, ce cas de figure n'a jusqu'à présent pas été couvert par la littérature.
- Une évolution des travaux portant sur la mise en action de l'implantation par phases des stratégies de bioraffinage dans le processus stage-and-gate. On pense notamment à la correspondance des phases de développement de la stratégie avec les *stages* du processus de NPd. L'une des différences premières est reliée au fait que l'étape de commercialisation du processus stage-and-gate traditionnel concerne le produit unique visé, alors que l'achèvement ultime de l'implantation par phases est l'atteinte du portefeuille diversifié en Phase II ou plus, laquelle passerait par la mise sur le marché de produits intermédiaires.
- La détermination du timing le plus approprié pour l'investissement dans le procédé de la Phase I. Le moment idéal pour l'investissement varierait assurément d'une compagnie à l'autre, et dépendrait d'un équilibre à déterminer entre (1) la disponibilité des ressources financières incluant les subventions gouvernementales, (2) le potentiel de création d'avantages compétitifs reliés à une familiarisation anticipée avec les nouvelles technologies et un accès privilégié au marché, et (3) le risque d'annihilation de la flexibilité du modèle d'affaires par la limitation des options de Phase II envisageables.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Forest Products Association of Canada. (2010) www.fpac.ca. [Online]. <http://www.fpac.ca/wp-content/uploads/Biopathways-ENG.pdf>
- [2] British Columbia Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations. (2016, August) STRONG PAST, BRIGHT FUTURE: A Competitiveness Agenda for British Columbia's Forest Sector. [Online]. http://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/forestry/competitive-forest-industry/print_version_bcfs_agenda_final_lrsingles_r2.pdf
- [3] A. Orzechowska, "SAVING THE CANADIAN INDUSTRY: discussing possible solutions," *Pulp & Paper Canada*, vol. 106, no. 1, pp. 25-27, 2005.
- [4] B. Thorp and D. Raymond, "Forest Biorefinery Could Open Door To Bright Future for P&P Industry," *PaperAge*, vol. 120, no. 7, pp. 16-18, 2004.
- [5] P. R. Stuart, "The forest biorefinery: survival strategy of Canada's P&P sector?," *Pulp & Paper Canada*, vol. 107, no. 6, pp. 13-16, 2006.
- [6] S. Hämäläinen, A. Näyhä, and H. L. Pesonen, "Forest biorefineries - a business opportunity for the Finnish forest cluster," *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 16, pp. 1884-1891, 2011.
- [7] International Energy Agency, "Biorefineries: adding value to the sustainable utilisation of biomass," IEA Bionergy:T42:2009:01, 2009.
- [8] P. Axegård, "The future pulp mill - a biorefinery?," in *1st International Biorefinery Workshop*, Washington, DC, 2005.
- [9] A. Van Heiningen, "Converting a kraft pulp mill into an integrated forest biorefinery," *Pulp & Paper Canada*, vol. 107, no. 6, pp. 38-43, 2006.
- [10] Forest Products Association of Canada. (2011) www.fpac.ca. [Online]. <http://www.fpac.ca/wp-content/uploads/BIOPATHWAYS-II-web.pdf>
- [11] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2015," 2015.
- [12] A. Demirbas, *Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities*. London: Springer, 2010.

- [13] V. Chambost, J. McNutt, and P. R. Stuart, "Guided tour: Implementing the forest biorefinery (FBR) at existing pulp and paper mills," *Pulp and Paper Canada*, vol. 109(7-8), pp. 19-27, 2008.
- [14] E. L. Cussler and G. D. Moggridge, *Chemical Product Design*, 2nd ed. New-York: Cambridge University Press, 2011.
- [15] M. Hill, "Chemical Product Engineering—The third paradigm," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 33, pp. 947-953, 2009.
- [16] R. Costa, G. D. Moggridge, and P. M. Saraiva, "Chemical Product Engineering: An Emerging Paradigm Within Chemical Engineering," *AIChE Journal*, vol. 52, no. 6, pp. 1976-1986, 2006.
- [17] E. L. Cussler and J. Wei, "Chemical product engineering," *AIChE Journal*, vol. 49, pp. 1072-1075, May 2003.
- [18] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product design and development*. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [19] E. Favre, L. Marchal-Heusler, and M. Kind, "Chemical product engineering: Research and educational challenges," *Transactions of IChemE*, vol. 80A, pp. 65-74, 2002.
- [20] W. D. Seider, J. D. Seader, D. R. Lewin, and S. Widagdo, *Product and Process Design Principles*, 3rd ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [21] C. Wibowo and K. M. Ng, "Product-Centered Processing: Manufacture of Chemical-Based Consumer Products," *AIChE Journal*, vol. 48, no. 6, pp. 1212-1230, June 2002.
- [22] M. Hill, "Product and Process Design for Structured Products," *AIChE Journal*, vol. 50, no. 8, pp. 1656-1661, August 2004.
- [23] E. von Hippel, "Lead users: A source of novel product concepts," *Management Science*, vol. 32, no. 7, pp. 791-805, 1986.
- [24] E. von Hippel, "User toolkits for innovation," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 18, no. 4, pp. 247-257, 2001.

- [25] G. L. Lilien, P. D. Morrison, K. Searls, M. Sonnack, and E. von Hippel, "Performance assessment of the lead user idea generation process for new product development," *Management Science*, vol. 48, no. 8, pp. 1042-1059, 2002.
- [26] S. Thomke and E. von Hippel, "Customers as Innovators: A New Way to Create Value," *Harvard Business Review*, vol. 80, no. 4, pp. 74-81, April 2002.
- [27] G. Day and P. Shoemaker, "Scanning the Periphery," *Harvard Business Review*, vol. 84, no. 2, pp. 135-148, November 2005.
- [28] N. Franke, E. von Hippel, and M. Schreier, "Finding commercially attractive user innovations: a test of lead-user theory," *The Journal of Product Innovation Management*, vol. 23, pp. 301-315, 2006.
- [29] E. L. Cussler, A. Wagner, and L. Marchal-Heussler, "Designing Chemical Products Requires More Knowledge of Perception," *AIChE Journal*, vol. 56, no. 2, pp. 283-288, February 2010.
- [30] J. R. Hauser and D. Clausing, "The House of Quality," *Harvard Business Review*, May 1988.
- [31] [31] VB Kreng and T Lee, "QFD-based modular product design with linear integer programming—a case study," *Journal of Engineering Design*, vol. 15, no. 3, pp. 261-284, 2004.
- [32] T. Sakao, "A QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design," *International Journal of Production Research*, vol. 45, no. 18-19, pp. 4143-4162, 2007.
- [33] L. Chen and W. Ko, "Fuzzy linear programming models for new product design using QFD with FMEA," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 33, pp. 633–647, 2009.
- [34] E. B. Magrab, S. K. Gupta, F. P. McCluskey, and P. A. Sandborn, "Translating Customer Requirements into a Product Design Specification," in *Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process, Second Edition.*: CRC Press, 2009, pp. 73-89.

- [35] H. Liu, "Product design and selection using fuzzy QFD and fuzzy MCDM approaches," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35, pp. 482–496, 2011.
- [36] J. Li and J. Vederas, "Drug Discovery and Natural Products: End of an Era or an Endless Frontier," *Science*, vol. 25, pp. 161-165, 2009.
- [37] G. Lowe, "Combinatorial chemistry," *Chemical Society Reviews*, vol. 24, pp. 309–317, 1995.
- [38] J. R. Engstrom and W. H. Weinberg, "Combinatorial materials science," *AIChE Journal*, vol. 46, pp. 2–5, 2000.
- [39] R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting, and J. A. Shaeiwitz, "Chemical Product Design (Chap 4)," in *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes - 3rd Edition.*: Pearson Education, 2009.
- [40] M. Hill and K. Joback. (2017) Computing and Systems Technology - AIChE. [Online]. <http://www.castdiv.org/archive/Chemical%20Product%20Design%20-%20Hill.pdf>
- [41] R. Costa, R. G. Gabriel, P. M. Saraiva, E. Cussler, and G. D. Moggridge, "Chemical Product Design and Engineering," in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.*: John Wiley & Sons, 2014, pp. DOI: 10.1002/0471238961.0308051313150707.a01.pub2.
- [42] R. Gani, "Chemical product design: challenges and opportunities," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 2441-2457, 2004.
- [43] H. Schubert, K. Ax, and O. Behrend, "Product engineering of dispersed systems," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 14, pp. 9-16, 2003.
- [44] N. V. Sahinidis, M. Tawarmalani, and M. Yu, "Design of Alternative Refrigerants via Global Optimization," *AIChE Journal*, vol. 49, no. 7, pp. 1761-1775, July 2003.
- [45] S. Hada, N. Chemmangattuvalappil, C. B. Roberts, and M. Eden, "Optimization of Product Formulation through Multivariate Statistical Analysis of Process Data," *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 31, pp. 1361–1365, 2012.
- [46] L. T. Biegler, I. E. Grossmann, and A. W. Westerberg, *Systematic Methods of Chemical Process Design.*: Prentice Hall, 1997.

- [47] M. Peters, K. Timmerhaus, and R. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th ed. Boston, MA, US: McGraw-Hill, 2003.
- [48] R. Smith, *Chemical Process Design and Integration*.: John Wiley & Sons, 2005.
- [49] W. D. Seider, S. Widagdo, J. D. Seader, and D. R. Lewin, "Perspectives on chemical product and process design," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 33, pp. 930-935, 2009.
- [50] K. B. Kahn, *The PDMA Handbook of New Product Development, 3rd Edition*.: John Wiley & Sons, 2013.
- [51] Product Development and Management Association, *Journal of Product Innovation Management*, 1984-present.
- [52] Booz-Allen & Hamilton, *New Product Management for the 1980s*. New-York: Booz-Allen & Hamilton Inc., 1982.
- [53] D. Boike and M. Adams, "PDMA Foundation CPAS Study reveals new trends: while the 'best-rest' gap in NPD widens," *Visions*, vol. 28, pp. 26-29, 2004.
- [54] K. B. Kahn, G. Barczak, and R. Moss, "PERSPECTIVE: Establishing an NPD Best Practices Framework," *The Journal of Product Innovation Management*, vol. 23, no. 2, pp. 106–116, March 2006.
- [55] R. G. Cooper and S. J. Edgett, "Best Practices in the Idea-to-Launch Process and Its Governance: A Study of New-Product Development Practices at 211 Businesses Provides Insights into Best Practices in Both the Idea-to-Launch Process and Its Governance," *Research Technology Management*, pp. 43-54, March-April 2012.
- [56] M. Crawford and A. Di Benedetto, "The Strategic Elements of Product Development," in *New Products Management, Tenth Edition*. New-York: McGraw-Hill, 2010, pp. 5-25.
- [57] S. Valeri, M. Santiago, A. Campello, H. Resende, and L. Trabasso, "Implementation of the Phase Review Process in the NPD : A Successful Experience," in *International Conference on Engineering Design*, Stockholm, 2003.
- [58] R. G. Cooper, "The new product process: A decision guide for management," *Journal of Marketing Management*, vol. 3, no. 3, pp. 238-255, 1988.

- [59] R. G. Cooper, "NEW PRODUCTS—WHAT SEPARATES THE WINNERS FROM THE LOSERS AND WHAT DRIVES SUCCESS," in *THE PDMA HANDBOOK OF NEW PRODUCT DEVELOPMENT*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 3-28.
- [60] R. G. Cooper, "The New Product Process: The Stage-Gate Game Plan," in *Winning at New Products: Accelerating the Process from Idea to Launch*, 3rd ed. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2001, pp. 113-153.
- [61] R. G. Cooper and S. J. Edgett, "Ideation for Product Innovation: What Are the Best Sources?," *PDMA Visions*, vol. XXXII, no. 1, pp. 12-17, March 2008.
- [62] R. G. Cooper and A. Dreher, "Voice of Customer Methods: What Is the Best Source of New Product Ideas?," *Marketing Management Magazine*, pp. 38-43, 2010.
- [63] R. G. Cooper, "The Early Game: From Discovery to Development," in *Winning at New Products - Accelerating the Process from Idea to Launch*, 3rd ed. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2001, pp. 178-212.
- [64] A. Osterwalder and Y. Pigneur, *Business Model Generation*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [65] G. Castellion, "A NEW PRODUCT'S DEVELOPMENT STRATEGY: FORMULATION AND IMPLEMENTATION," in *THE PDMA HANDBOOK OF NEW PRODUCT DEVELOPMENT*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 29-45.
- [66] M. E. Porter, "How Competitive Forces Shape Strategy," *Harvard Business Review*, vol. 57, no. 2, pp. 137-145, March-April 1979.
- [67] A. J. Slywotzky, *Value Migration: How to Think Several Moves Ahead of the Competition.*: Harvard Business Review Press, 1995.
- [68] E. Anderson, G. S. Day, and V. K. Rangan, "Strategic Channel Design," *Sloan Management Review*, pp. 59-69, Summer 1997.

- [69] S. Caisse and B. Montreuil, "Business model innovation in a transforming commodity industry: The case of a Canadian Lumber remanufacturer," in *Frontiers of e-business research 2007 (CD-ROM)*.: Tampere: Tampere University of Technology and University of Jyväskylä, 2008.
- [70] W. C. Kim and R. Mauborgne, *Blue Ocean Strategy: How To Create Uncontested Market Space And Make The Competition Irrelevant.*: Harvard Business Press, 2005.
- [71] J. A. Covello and B. Hazelgren, *The Complete Book of Business Plans*, 2nd ed. Naperville, Illinois: Sourcebooks, Inc., 2006.
- [72] E. Olson, O. Walker, R. Ruekert, and J. Bonner, "Patterns of cooperation during new product development among marketing, operations and R&D: implications for project performance," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 18, no. 4, pp. 258-271, 2001.
- [73] Espriex. (2016, Avril) Espriex. [Online]. <http://espriex.co/business-model-canvas>
- [74] K. I. Kaitin, "Deconstructing the drug development process: the new face of innovation," *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, vol. 87, no. 3, pp. 356-361, March 2010.
- [75] J. A. Di Masi, L. Feldman, A. Seckler, and A. Wilson, "Trends in risks associated with new drug development: success rates for investigational drugs," *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, vol. 87, no. 3, pp. 272-277, March 2010.
- [76] Minister of Justice. (2016, December) Justice Laws Website. [Online]. http://laws-lois.justice.gc.ca/PDF/C.R.C.,_c._870.pdf
- [77] R. G. Cooper, "What's next? After Stage-Gate," *Research-Technology Management*, vol. 157, pp. 20-31, 2014.
- [78] G. Ajamian and P. A. Koen, "Technology Stage Gate: A Structured Process for Managing High-Risk New Technology Projects," in *The PDMA Toolbox for New Product Development*. New-York: John Wiley & Sons, 2002, pp. 267-295.
- [79] R. G. Cooper, "Managing Technology Development Projects," *IEEE Engineering Management Review*, vol. 35, no. 1, pp. 67-76, 2007.

- [80] P. G. Smith and D. G. Reinertsen, *Developing products in half the time*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [81] A. Khurana and S. R. Rosenthal, "Integrating the Fuzzy Front End of New Product Development," *Sloan Management Review*, vol. 38, no. 2, pp. 103-120, Winter 1997.
- [82] J. Kim and D. Wilemon, "Focusing the fuzzy front-end in new product development," *R&D Management*, vol. 32, no. 4, pp. 269-279, 2002.
- [83] P. A. Koen et al., "Fuzzy front end: effective methods, tools and techniques," in *The PDMA Toolbox for New Product Development*. New-York: John Wiley & Sons, 2002, pp. 5-35.
- [84] F. Gautier and S. Lenfle, "L'avant-projet : définitions et enjeux," in *Faire de la recherche en management de projet.*: Vuilbert, 2004, pp. 11-34.
- [85] S. Chang, C. Chen, and S. Wey, "Conceptualizing, assessing, and managing front-end fuzziness in innovation/NPD projects," *R&D Management*, vol. 37, no. 5, pp. 469-478, 2007.
- [86] M. Kurkkio, "Managing the fuzzy front-end: insights from process firms," *European Journal of Innovation Management*, vol. 14, no. 2, pp. 252-269, 2011.
- [87] P. A. Koen, H. M. J. Bertels, and E. Kleinschmidt, "Managing the Front End of Innovation—Part I," *Research-Technology Management*, pp. 34-43, March-April 2014.
- [88] P. A. Koen, H. M. J. Bertels, and E. Kleinschmidt, "Managing the Front End of Innovation—Part II," *Research-Technology Management*, May-June 2014.
- [89] R. G. Cooper, "Fixing the fuzzy front end of the new product process: building the business case," *The Management Accounting Magazine*, vol. 71, pp. 21–23, 1997.
- [90] P. A. Koen, "THE FUZZY FRONT END FOR INCREMENTAL, PLATFORM, AND BREAKTHROUGH PRODUCTS," in *THE PDMA HANDBOOK OF NEW PRODUCT DEVELOPMENT*, 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 81-91.

- [91] R. G. Cooper, "A Product Innovation Strategy for Your Business : What Markets, Products, and Technologies?," in *Product Leadership: Pathways to Profitable Innovation, 2nd edition*. New York: Basic Books, 2005, pp. 51-90.
- [92] G. S. Day, "A strategic perspective on product planning," *Journal of Contemporary Business*, pp. 1-34, Spring 1975.
- [93] Harvard Business School Press, "SWOT Analysis I and II," in *Strategy: Create and Implement the Best Strategy for Your Business.*: Harvard Business School Press, 2005, pp. 1-28.
- [94] M. E. Porter, *On Competition*. Boston, MA: Harvard Business School Publishing Corporation, 2008.
- [95] M. Crawford and A. Di Benedetto, "Opportunity Identification and Selection: Strategic Planning for New Products," in *New Products Management, Tenth Edition*. New-York: McGraw-Hill, 2010, pp. 60-90.
- [96] H. M. J. Bertels and P. A. Koen, "Business Model Innovation: Innovation Outside the Core," in *The PDMA Handbook of New Product Development.*: John Wiley & Sons, 2013, pp. 68-81.
- [97] K. Storbacka and S. Nenonen, "Competitive Arena Mapping: Market Innovation Using Morphological Analysis in Business Markets," *Journal of Business-to-Business Marketing*, vol. 19, no. 3, pp. 183-215, 2012.
- [98] J. S. Armstrong, "Effects of portfolio planning methods on decision making: Experimental results," *International Journal of Research in Marketing*, vol. 11, no. 1, pp. 73-84, January 1994.
- [99] R. F. Olsen and L. M. Ellram, "A portfolio approach to supplier relationships," *Industrial Marketing Management*, vol. 26, no. 2, pp. 101-113, March 1997.
- [100] R. G. Cooper, "Picking the Winners: Effective Gates and Portfolio Management," in *Winning at New Products - Accelerating the Process from Idea to Launch*, 3rd ed. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2001, pp. 213-251.

- [101] R. E. Miles, C. C. Snow, A. D. Meyer, and H. J. Coleman Jr., "Organizational Strategy, Structure, and Process," *Academy of Management Review*, vol. 3, no. 3, pp. 546-562, July 1978.
- [102] A. Griffin and A. L. Page, "PDMA Success Measurement Project: Recommended Measures for Product Development Success and Failure," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 13, pp. 478-496, October 1996.
- [103] M. E. Porter, "Competitive Strategy: The Core Concepts," in *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*.: Free Press, 1998, pp. 1-30.
- [104] E. B. Roberts, "New Ventures for Corporate Growth," *Harvard Business Review*, pp. 3-17, July 1980.
- [105] E. B. Roberts and C. A. Berry, "Entering New Businesses : Selecting Strategies for Success," *Sloan Management Review*, pp. 3-17, Spring 1983.
- [106] R. G. Cooper, "Product Innovation Strategy to Portfolio Management - Resource Commitment and Deployment," in *Product Leadership: Pathways to Profitable Innovation, 2nd edition*. New York: Basic Books, 2005, pp. 91-134.
- [107] M. L. Patterson, "NEW PRODUCT PORTFOLIO PLANNING AND MANAGEMENT," in *THE PDMA HANDBOOK OF NEW PRODUCT DEVELOPMENT*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, pp. 46-58.
- [108] C. K. Bart, "Product Innovation Charters: Mission Statements for New Products," *R&D Management*, vol. 32, no. 1, pp. 23-34, 2002.
- [109] C. Bart and A. Pujari, "The Performance Impact of Content and Process in Product Innovation Charters," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 24, no. 1, pp. 3-19, January 2007.
- [110] U. Högman and H. Johannesson, "Applying stage-gate processes to technology development—Experience from six hardware-oriented companies," *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 30, pp. 264-287, 2013.
- [111] L. Y. Cohen, P. W. Kamienski, and R. L. Espino, "Gate System Focuses Industrial Basic Research," *Research Technology Management*, vol. 41, no. 4, pp. 34-37, Jul/Aug 1998.

- [112] Adhikari A., Chandrapal C., Murali N. Fernando S., "Biorefineries : Current Status, Challenges, and Future Direction," *Energy & Fuels*, vol. 20, pp. 1727-1737, 2006.
- [113] D. Bacovsky, M. Dallos, and M. Wörgetter, "Status of 2nd Generation Biofuels Demonstration Facilities in June 2010 - IEA BIOENERGY TASK 39," International Energy Agency, 2010.
- [114] S. K. Maity, "Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1427-1445, 2015.
- [115] S. K. Maity, "Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part II," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1446-1466, 2015.
- [116] M. Towers, T. Browne, R. Kerekes, J. Paris, and H. Tran, "Biorefinery opportunities for the Canadian pulp and paper industry," *Pulp & Paper Canada*, vol. 108, no. 6, pp. T109-112, June 2007.
- [117] V. B. Agbor, N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, and D. B. Levin, "Biomass pretreatment: Fundamentals toward application," *Biotechnology Advances*, vol. 29, no. 6, pp. 675-685, 2011.
- [118] J. Moncada, J. A. Tamayo, and C. A. Cardona, "Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery," *Chemical Engineering Science*, vol. 118, pp. 126-140, 2014.
- [119] D.J. Hayes, "State of Play in The Biorefining Industry," University of Limerick., 2007.
- [120] N. E. Sammons Jr., W. Yuan, M. Eden, B. Aksoy, and H. Cullinan, "Optimal Biorefinery Product Allocation by Combining Process and Economic Modelling," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 86, no. 7, pp. 800–808, 2008.
- [121] D. Tay, D. Ng, N. Sammons Jr., and M. Eden, "Fuzzy Optimization Approach for the Synthesis of a Sustainable Integrated Biorefinery," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 3, pp. 1652-1665, 2011.
- [122] D. Tay, D. Ng, and R. Tan, "Robust Optimization Approach for Synthesis of Integrated Biorefineries with Supply and Demand Uncertainties," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 32, no. 2, pp. 384-389, July 2013.

- [123] L. Dansereau, M. El-Halwagi, V. Chambost, and P. Stuart, "Methodology for biorefinery portfolio assessment using supply-chain fundamentals of bioproducts," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 8, no. 5, pp. 716-727, 2014.
- [124] V. Chambost and P. R. Stuart, "Selecting the most appropriate products for the forest biorefinery," *Industrial Biotechnology*, vol. 3, no. 2, pp. 112-119, 2007.
- [125] T. Werpy and G. Petersen, "Top Value Added Chemicals from Biomass Volume I—Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas," Oak Ridge (TN), 2004.
- [126] J. E. Holladay, J.J. Bozell, and al., "Top value- added chemicals from biomass – Volume II: Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin," PNNL for US Department of Energy, 2007.
- [127] M. Farmer, "Adaptable biorefinery: Some basic economic concepts to guide research selection," in *Engineering, Pulping and Environmental Conference*, Philadelphia, PA, United States, 2005.
- [128] U. Wising and P. R. Stuart, "Identifying the Canadian Forest Biorefinery," *Pulp & Paper Canada*, vol. 107, no. 6, pp. T128-133, June 2006.
- [129] V. Chambost, B. Earmer, and P. R. Stuart, "Systematic methodology for identifying promising forest biorefinery products," *Pulp & Paper Canada*, vol. 108, no. 6, pp. T114-118, 2007.
- [130] M. Janssen, V. Chambost, and P. Stuart, "Successful partnerships for the forest biorefinery," *Industrial Bioechnology*, vol. 4, no. 4, pp. 352-362, 2008.
- [131] M. Machani, M. Nourelfath, and S. D'Amours, "A Multi-Level Decisional Approach to Design Integrated Forest Biorfinery Business Model for Pulp and paper Companies," CIRRELT, CIRRELT-2014-07, 2014.
- [132] D. R. Batsy et al., "Product Portfolio Selection and Process Design for the Forest Biorefinery," in *Integrated Biorefineries: Design, Analysis, and Optimization.*: CRC Press, 2012.

- [133] F. Clerc, V. Chambost, and P. Stuart, "RISK-BASED APPROACH TO TRIAGE AND ASSESS TRANSFORMATIVE BIOREFINERY STRATEGIES AT THE EARLY DESIGN STAGE," in *PaperWeek Canada 2015*, vol. Volume 1 of 2, Montreal, Canada, 2015, pp. 674-682.
- [134] N. P. Archer and F. Ghasemzadeh, "An integrated framework for project portfolio selection," *International Journal of Project Management*, vol. 17, no. 4, pp. 207-216, 1999.
- [135] H. J. Thamhain, "Assessing the Effectiveness of Quantitative and Qualitative Methods for R&D Project Proposal Evaluations," *Engineering Management Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 3-12, 2014.
- [136] A. D. Henriksen and A. J. Traynor, "A Practical R&D Project-Selection Scoring Tool," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 46, no. 2, pp. 158-170, 1999.
- [137] C. Verbano and A. Nosella, "Addressing R&D investment decisions: a cross analysis of R&D project selection methods," *European Journal of Innovation Management*, vol. 13, no. 3, pp. 355-379, 2010.
- [138] D. L. Hall and A. Nauda, "An interactive approach for selecting IR&D projects," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 37, no. 2, pp. 126-133, 1990.
- [139] R. L. Schmidt and J. R. Freeland, "Recent Progress in Modeling R&D Project-Selection Processes," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 39, no. 2, pp. 189-201, June 1992.
- [140] K. L. Poh, B. W. Ang, and F. Bai, "A comparative analysis of R&D project evaluation methods," *R&D Management*, vol. 31, no. 1, pp. 63-75, 2001.
- [141] C. Chien, "A portfolio-evluation framework for selecting R&D projects," *R&D Management*, vol. 32, no. 4, pp. 359-368, 2002.
- [142] J. P. Martino, "Project Selection," in *Project Management ToolBox: Tools and Techniques for the Practicing Project Manager.*, 2003, pp. 19-66.

- [143] C. P. Killen, R. A. Hunt, and E. J. Kleinschmidt, "Managing the New Product Development Project Portfolio: A Review of the Literature and Empirical Evidence," in *Portland International Center for Management of Engineering and Technology (PICMET)*, Portland, 2007, pp. 1864-1874.
- [144] Z. Liu and Y. Huang, "Technology evaluation and decision making for sustainability enhancement of industrial systems under uncertainty," *AIChE Journal*, vol. 58, no. 6, pp. 1841-1852, 2012.
- [145] PricewaterhouseCoopers (PWC). (2008) PricewaterhouseCoopers. [Online]. https://web.actuaries.ie/sites/default/files/erm-resources/risk_assessment_guide_pwc_Dec
- [146] T. A. Luehrman, "Investment Opportunities as Real Options: Getting Started on the Numbers," *Harvard Business Review*, pp. 3-15, July–August 1998.
- [147] T. A. Luehrman, "Strategy As A Portfolio of Options," *Harvard Business Review*, pp. 89-99, September-October 1998.
- [148] C. H. Loch, M. T. Pich, C. Terwiesch, and M. Urbschat, "Selecting R&D projects at BMW: A case study of adopting mathematical programming models," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 48, no. 1, pp. 70-80, 2001.
- [149] S. Kavadias and C. H. Loch, *Project Selection Under Uncertainty: Dynamically Allocating Resources to Maximize Value*. Norwood, MA: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [150] D. Zhang, J. Zhang, K.K. Lai, and Y. Lu, "A novel approach to supplier selection based on vague sets group decisions," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 5, pp. 9557-9563, 2009.
- [151] R. L. Keeney, "An analysis of the portfolio of sites to characterize for selecting a nuclear repository," *Risk Analysis*, vol. 7, pp. 195-218, 1987.
- [152] P. H. Farquhar and V. R. Rao, "A balance model for evaluating subsets of multiattributed items," *Management Science*, vol. 22, pp. 528–539, 1976.
- [153] H. Markowitz, "Portfolio selection," *The Journal of Finance*, vol. 7, pp. 77–91, 1952.

- [154] R. L. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*.: Cambridge University Press, 1993.
- [155] J. S. Dyer, "MAUT - Multiattribute Utility and Value Theories," in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston: Springer, 2005, pp. 265-292.
- [156] T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making," in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston: Springer, 2005, pp. 345-405.
- [157] E. Jacquet-Lagrange and J. Siskos, "Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision making, the UTA method," *European Journal of Operational Research*, vol. 10, no. 2, pp. 151–164, 1982.
- [158] J. Spronk, *Interactive multiple goal programming*. The Hague: Martinus Nijhoff, 1981.
- [159] S. Ben Mena, "Introduction aux méthodes multicritère d'aide à la décision," *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, vol. 4, no. 2, pp. 83–93, 2000.
- [160] P. Vincke, *Multicriteria decision aid*. New York: Wiley and Sons, 1992.
- [161] G. Froger and G. Munda, "Methodology for Environmental Decision Support," in *Valuation for Sustainable Development*. Cheltenham: Edward Elgar, 1998, pp. 167-186.
- [162] Y. De Smet and K. Lidouh, "An Introduction to Multicriteria Decision Aid: The PROMETHEE and GAIA Methods," in *Business Intelligence*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013, vol. 138, pp. 150-176.
- [163] J. Figueira, V. Mousseau, and B. Roy, "ELECTRE methods," in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston: Springer, 2005, pp. 133-153.
- [164] L. R. Gardiner and R. E. Steuer, "Unified interactive multiple objective programming: an open architecture for accomodating new procedures," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 45, no. 12, pp. 1456-1466, 1994.
- [165] D. Bouyssou, "Building Criteria: A Prerequisite for MCDA," in *Readings in Mutiple Criteria Decision Aid*. Berlin: Springer Verlag, 1990, pp. 58-80.
- [166] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica, 1985.

- [167] B. Roy and D. Bouyssou, *Aide multicritère à la décision: Méthodes et cas*. Paris: Economica, 1993.
- [168] R. G. Cooper, S. J. Edgett, and E. J. Kleinschmidt, "Portfolio Management: Fundamental to New Product Success," in *The PDMA Toolbox for New Product development*. New York: John Wiley & Sons, 2002, pp. 331–364.
- [169] R. G. Cooper, S. J. Edgett, and E. J. Kleinschmidt, "New Product Portfolio Management : Practices and Performance," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 16, pp. 333–351, 1999.
- [170] J. B. Schmidt, "GATE DECISIONS: THE KEY TO MANAGING RISK DURING NEW PRODUCT DEVELOPMENT," in *THE PDMA HANDBOOK OF NEW PRODUCT DEVELOPMENT*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, pp. 337-348.
- [171] National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Stage Gate Management in the Biofuels Program," 2001.
- [172] M. A. Papalexandrou, P. A. Pilavachi, and A. I. Chatzimouratidis, "Evaluation of liquid bio-fuels using the Analytic Hierarchy Process," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 86, no. 5, pp. 360-374, 2008.
- [173] S. Niekamp, U. R. Bharadwaj, J. Sadhukhan, and M. K. Chryssanthopoulos, "A multi-criteria decision support framework for sustainable asset management and challenges in its application," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 23-36, 2015.
- [174] H. Sugiyama, U. Fischer, K. Hungerbuhler, and M. Hirao, "Decision framework for chemical process design including different stages of environmental, health, and safety assessment," *AIChE Journal*, vol. 54, pp. 1037–1053, 2008.
- [175] J. J. Wang, Y. Y. Jing, Z. F. Zhang, and J. H. Zhao, "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2263-2278, 2009.
- [176] J. Cohen, M. Janssen, V. Chambost, and P. Stuart, "Critical Analysis of Emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies for Ethanol Production," *Pulp & Paper Canada*, vol. 111, pp. 24-30, May/June 2010.

- [177] S. H. Gheewala, S. Bonnet, K. Prueksakorn, and P. Nilsalab, "Sustainability Assessment of a Biorefinery Complex in Thailand," *Sustainability*, vol. 3, pp. 518-530, 2011.
- [178] E. Gnansounou, "Assessing the sustainability of biofuels: A logic-based model," *Energy*, vol. 36, pp. 2089-2096, 2011.
- [179] M. R. b. Othman, "Sustainability assessment and decision making in chemical process design," Technical University of Berlin, Berlin, PhD Thesis 2011.
- [180] J. A. Schaidle, C. J. Moline, and P. E. Savage, "Biorefinery Sustainability Assessment," *Environmental Progress and Sustainable Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 743-753, 2011.
- [181] M. A. Quintero-Bermudez, N. Janssen, J. Cohen, and P. R. Stuart, "Early design-stage biorefinery process selection," *TAPPI JOURNAL*, vol. 11, no. 11, pp. 9-16, November 2012.
- [182] J. A. Posada et al., "Potential of bioethanol as a chemical building block for biorefineries: Preliminary sustainability assessment of 12 bioethanol-based products," *Bioresource Technology*, vol. 135, pp. 490-499, 2013.
- [183] J. C. Sacramento-Rivero, "A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators," *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, vol. 6, pp. 32-44, 2012.
- [184] E. Tarver. (2015, May) Investopedia, LLC. [Online].
<http://www.investopedia.com/ask/answers/051315/what-difference-between-horizontal-integration-and-vertical-integration.asp>
- [185] E. Hytönen and P.R. Stuart, "Biofuel Production in an Integrated Forest Biorefinery—Technology Identification Under Uncertainty," *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. 4, no. 1, pp. 58-67, 2010.
- [186] N. Smolarski. (2012) "High-Value Opportunities for Lignin: Unlocking its Potential". [Online].
<http://www.greenmaterials.fr/wp-content/uploads/2013/01/High-value-Opportunities-for-Lignin-Unlocking-its-Potential-Market-Insights.pdf>
- [187] R Gosselink, "Tomorrow's biorefineries in Europe - Future perspectives of organosolv lignins," in *Biocore*, Brussels, 2014.

- [188] N. S. Çetin and N. Özmen, "Use of organosolv lignin in phenol–formaldehyde resins for particleboard production," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 22, no. 6, pp. 477-486, 2002.
- [189] A. Pizzi, "Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 20, no. 8, pp. 829-846, 2006.
- [190] Y. Matsushita, "Conversion of technical lignins to functional materials with retained polymeric properties," *Journal of Wood Science*, vol. 61, no. 3, pp. 230-250, 2015.
- [191] M. Wang, M. Leitch, and C. Xu, "Synthesis of phenol–formaldehyde resol resins using organosolv pine lignins," *European Polymer Journal*, vol. 45, no. 12, pp. 3380–3388, 2009.
- [192] I. Norberg, "Carbon fibres from kraft lignin", Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012.
- [193] J. F. Kadla et al., "Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications," *Carbon*, vol. 40, no. 15, pp. 2913–2920, 2002.
- [194] A. K. Naskar, "Developing Low Cost Carbon Fiber for Automotive Lightweight Composites," in *32nd Annual Meeting The Council for Chemical Research, MI*, 2011.
- [195] P. Axegård, P. Tomani, Innventia, and H. Hansson. (2014) Road map 2014 till 2025: Swedish lignin-based carbon fibre in composite materials of the future.
- [196] C. Arato, E. K. Pye, and G. Gjennestad, "The Lignol Approach to Biorefining of Woody Biomass to Produce Ethanol and Chemicals," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 121-124, pp. 871-882, 2005.
- [197] F. Öhman, H. Theliander, P. Tomani, and P. Axegard, "Method for separating lignin from black liquor," WO 2006/031175, March 23, 2006.
- [198] L. Kouisni, A. Gagné, K. Maki, P. Holt-Hindle, and M. Paleologou, "LignoForce System for the Recovery of Lignin from Black Liquor: Feedstock Options, Odor Profile, and Product Characterization," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 4, pp. 5152-5159, 2016.

- [199] Z. Périn-Levasseur, L. Savulescu, and M. Benali, "Lignin Production Path Assessment: Energy, Water, and Chemical Integration Perspective," *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, vol. 1, no. 3, pp. 25-30, 2011.
- [200] J. Brault, E. Kouakou, V. Chambost, and P. Stuart, "Potential Impact on Activated Sludge Treatment from the Implementation of Cellulosic Ethanol Production at a Pulp and Paper Mill," *Chemical Product and Process Modeling*, vol. 4, no. 1, p. Article 42, October 2009.
- [201] H. Loutfi, B. Blackwell, and V. Uloth, "Lignin recovery from kraft black liquor: preliminary process design," *Tappi Journal*, pp. 203-210, January 1991.
- [202] D. Humbird et al., "Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol -- Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover," National Renewable Energy Laboratory (NREL), NREL/TP-5100-47764, 2011.
- [203] W. A. Evanko et al., "RECOVERY OF HIGHER ALCOHOLS FROM DILUTE AQUEOUS SOLUTIONS," US 8101808, Jan. 24, 2012.
- [204] G. Johnston. (2013, June) Gevo, Inc. [Online]. <http://www.alternativefuelsworldwide.com/presentations/Gevo%20Paris%20Airshow%202013.pdf>
- [205] U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040," DOE/EIA-0383(2015), 2015.
- [206] Husky Energy Inc. (2016) Husky Energy. [Online]. <http://www.huskyenergy.com/huskyproducts/canada.asp>
- [207] E. T. H. Vink, D. A. Glassner, J. J. Kolstad, R. J. Wooley, and R. P. O'Connor, "The eco-profiles for current and near-future NatureWorks polylactide (PLA) production," *Ind. Biotechnol.*, vol. 3, no. 1, pp. 58-81, 2007.
- [208] M. A. Huneault and H. Li, "Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends," *Polymer*, vol. 48, no. 1, pp. 270-280, 2007.

- [209] J. Melendez and P. Stuart, "Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: a biomass procurement strategy for economic success," *Biofuels, Bioprod. Biorefin.*, doi:10.1002/bbb.1568, 2015.
- [210] G. Liard, B. Amor, P. Lesage, P. Stuart, and R. Samson, "Selection of LCA-based environmental criteria for Multi-criteria decision support in a biorefinery context," in *SETAC Europe 21st Annual Meeting*, Milano, 2011.
- [211] S. Sanaei and P. Stuart, "Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Techno-economic Analysis to Identify Investment Opportunities," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, (accepted for publication) DOI: 10.1002/bbb.1499, 2014.
- [212] S. Sanaei, V. Chambost, and P. Stuart, "Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Sustainability Assessment Using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, (accepted for publication) DOI: 10.1002/bbb.1482, 2014.

**ANNEXE A – Article 1: Analysis of Economically-Viable Lignin-Based
Biorefinery Strategies Implemented Within a Kraft Pulp Mill**

Cédric Dikko Téguia, Rod Albers, et Paul Stuart.

Article 1, soumis à *TAPPI Journal*.

Abstract

Many pulp and paper companies are considering implementing the lignin-based biorefinery in order to diversify their core business to new products, and improve their longer-term competitiveness. However, the best strategy to achieve this is not obvious, considering the lignin extraction process and derivatives to be implemented over the longer-term that meet market and business objectives, and provide competitive advantage. In this article, various lignin biorefinery strategies were considered in a case study, involving lignin precipitation processes integrated within an existing kraft mill, and solvent pulping processes which would be implemented in parallel to the existing mill processes using additional hardwood. The analysis aimed to identify the conditions under which various strategies would represent suitable investments. Operating constraints in the case study mill limited lignin extraction to 85 tpd from 15% of the mill's black liquor, while 260 tpd lignin could be extracted by solvent pulping 1500 tpd of hardwood. The preferred strategies identified by the study were lignin precipitation to phenolic resins production, and solvent pulping to carbon fiber production. The first product-process strategy requires lower investment, provides high returns (IRR of 39% to 43%), and is more easily implemented in the near-term. Solvent pulping resulted in a reasonable profitability (IRR of 18% to 25%) with higher production volumes and a diversified product portfolio, and was considered more suitable as a longer-term strategy. Business model robustness and long-term competitiveness can be better assured by combining both strategies. It was shown that (1) government support to offset capital cost, and (2) high derivatives market prices positively impact lignin valorization strategies, which are sensitive to technology and market maturity.

INTRODUCTION

In recent years, certain segments of the pulp and paper industry have experienced stable growth led by emerging markets in Asia and Latin America [1, 2], and the forecasted trend is for flat to timid growth going forward [3]. These global numbers overshadow a more difficult situation for certain geographic and market segments, and most forestry companies today are actively pursuing transformation through product diversification to procure their competitive position in the longer-term.

Especially for kraft pulp mills that have traditionally focused on the sale of cellulose, there is good potential for biorefinery strategies related to the improved management of hemicelluloses, and from the sale of lignin either present in black liquor or extracted by wood fractionation processes. Lignin is interesting as a basic chemical due to its complex chemical structure with aromatics and methoxyl groups, along with a variety of other functional units [4]. As a result lignin is being explored for a wide range of market applications [5], either by partially using it in a formulation, or by exploiting specific functionalities. However, investment in a lignin-based biorefinery strategy is not obvious due to a number of factors including (1) technology maturity – especially for the case of solvent pulping, (2) uncertainty in the understanding of the linkage that exists between lignin properties and specific market applications, and (3) uncertainty around the reproducibility of lignin-based product properties, etc.

The purpose of this paper is to evaluate lignin-based biorefinery strategies implemented in retrofit to an existing kraft pulp mill. The defined product-process strategies, implemented using a phased approach over several years, consider technology and market risk mitigation. A techno-economic analysis is performed in order to identify lignin-based biorefinery strategies that represent an attractive investment. In this project we addressed the following objectives:

1. To characterize the lignin biorefinery in terms of extraction processes and downstream derivatives;
2. To define a set of promising product-process combinations that could be integrated to an existing kraft pulp mill using a phased implementation strategy; and
3. To evaluate the economic performances of the strategies, and analyze critical factors for their success.

THE LIGNIN-BASED BIOREFINERY

Lignin Extraction Processes

The common nomenclature used for generic lignin types recognizes the difference between native lignin, as it forms in plants and trees, and technical lignins, as obtained from diverse extraction processes. It is practical to classify technical lignins based on physical and chemical conditions in the extraction processes that impact the final structure and functionality of the lignin [6].

An extensive review of existing biomass fractionation processes is presented by Agbor et al. [7], however the technologies reviewed were not defined with the specific purpose of isolating lignin. Biomass fractionation processes can be classified according to comminution (i.e., mechanical size reduction), biological, chemical and physical-chemical characteristics. Comminution methods are mainly used to increase the specific surface area of wood prior to digestion, and biological processes are currently less practical at the industrial scale because of the long residence times required. Physical-chemical pretreatments include the vast majority of fractionation processes that have been developed: steam explosion, dilute acid pretreatment, ammonia fiber expansion, and the use of organic solvents (Organosolv) for pretreatment, among others. In this category, the Organosolv pretreatment appears promising for lignin extraction, especially those processes where the operating and separation conditions produce minimum damage to the lignin structure. The mixture of water and organic solvent (often ethanol) used in Organosolv pulping leads to a purer lignin compared to processes that use sulfurous solvents. Organosolv lignin is recognized as a high-purity, low molecular weight lignin [8, 9].

In kraft black liquor, lignin is kept in colloidal form by repulsion forces that the charged phenolic and carboxylic acid groups create between lignin particles. Disrupting the solution properties such as pH, temperature or ionic strength, can result in a reduction of the repulsion forces and lead to lignin precipitation. The most common method consists of acidification using carbon dioxide, sulfuric acid, or a combination of both to lower the pH of the black liquor from 13-13.5 to 9-10. The resulting precipitated lignin must be filtered and washed [10, 11]. The first commercial scale plant for lignin precipitation from black liquor was implemented by Domtar in their Plymouth NC mill, using the LignoBoost technology developed by Innventia in association with Chalmers University of Technology and supplied by Valmet (Fig. 1) [12]. In this technology, the acidification is followed by an initial filtration of lignin. Following a re-slurry of the lignin cake in dilute sulfuric acid, a second filtration step is then performed. More recently, the LignoForce technology has been introduced developed by FPInnovations, commercialized by NORAM (Fig. 2), and recently implemented by the West Fraser mill in Hinton Alberta. This technology introduces an oxidation step before the acidification, and employs a press filter in a single filtration-washing step.

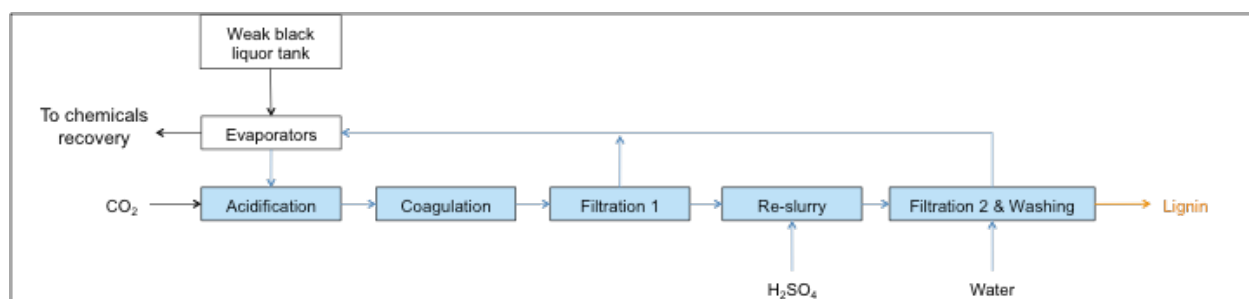


Fig. 1 - Block flow diagram of the LignoBoost process

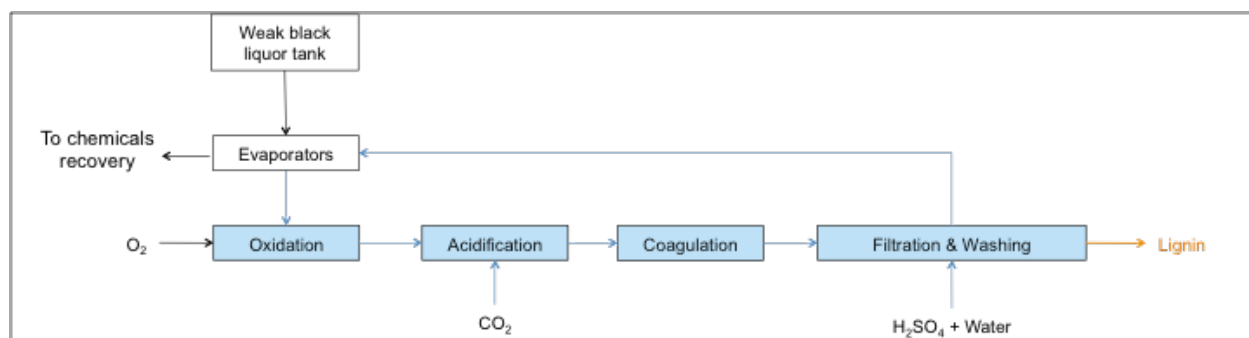


Fig. 2 - Block flow diagram of the LignoForce process

Lignin Conversion Into Value-added Derivatives

Black liquor is combusted in the kraft pulp mill recovery boiler to produce steam and green liquor. When lignin is separated from black liquor, to the extent that acceptable combustion conditions can be maintained, or when lignin is produced by fractionating wood using an Organosolv process, then there are numerous fossil-based products that the separated lignin can be used for. Among these, phenol-formaldehyde (PF) resins and carbon fibers appear as promising [13, 14].

Due to their affinity for wood and wood fibers, liquid phenolic resins are used for the specialty wood adhesives industry. Wood bonding applications such as particleboard, medium-density fiberboard (MDF), or waferboard/plywood have traditionally used phenolic resin binders. The interest in lignin for use in phenolic resins resides in its high substitution potential for phenol. The substitution level for phenol can potentially be higher than 50% [15], but 30% remains a practical maximum tested at the commercial scale in order to meet a range of board processing and product requirements (e.g., bond strength, hardening time, and the mechanical properties of panels). Lignin can essentially be directly mixed with phenol and formaldehyde to formulate PF-resins, however today, this method is limited to a relatively low percentage of lignin due to the amount of reactive sites in the lignin structure. A chemical modification of lignin such as phenolation can be used to overcome this limitation [16]. Phenolation requires mixing lignin with phenol in order to improve its reactivity, prior to blending with formaldehyde and/or additional phenol.

Lignin also has potential as an inexpensive and abundant replacement of Polyacrylonitrile (PAN), which is the most conventionally-used carbon fiber precursor. Higher production volumes and a wider use of carbon fibers are currently limited by the feedstock cost, which can contribute to more than half of production costs and has high market price volatility [17]. Lignin is an interesting alternative, however there remain challenges in its production at higher scales, and the mechanical properties of the resulting fibers.

The conventional carbon fiber manufacturing process consists of four main steps, including (1) fiber spinning, (2) stabilization, (3) carbonization, and (4) surface treatment. In some applications, carbonization is followed by a step of graphitization [18]. A study by Kadla et al. [19] demonstrated the potential to manufacture carbon fibers via melt spinning using Organosolv and hardwood kraft lignins, while softwood kraft lignin failed to pass the spinning step (it charred at temperatures above 140°C). Eckert and Abdullah [20] demonstrated that it was possible to prevent charring by acetylating lignin such that its acetyl content is at least 16% prior to spinning. Acetic anhydride is a suitable acetylating agent for that purpose. More recent work by Norberg [21] shows another alternative, which is to separate the kraft black liquor into two molecular weight fractions using an ultrafiltration membrane prior to acidification, and to use the lower molecular weight fraction for carbon fiber manufacturing. This method has been successfully used with hardwoods, softwoods, and combinations of the two types of feedstock.

Phased Biorefinery Implementation

Every biorefinery strategy implies technology and business risks to different extents, and they should incorporate implementation approaches that serve to mitigate risk to the extent possible. Such an approach has been introduced by Chambost et al. [22] and further applied by Jeaidi et al. [23] to the context of mechanical pulp mills (Fig. 3). They suggest a phased implementation of biorefinery strategies, nominally over three phases. The longer-term Phases II and III are defined first, and these determine the near-term implementation Phases. Phases I and II are where technology disruption mainly occurs, while Phase III implies mainly business disruption. Phase II represents the longer-term evolution of the product portfolio, while Phase I represents the risk mitigation stage(s) implemented in order to gradually achieve the longer-term goals.

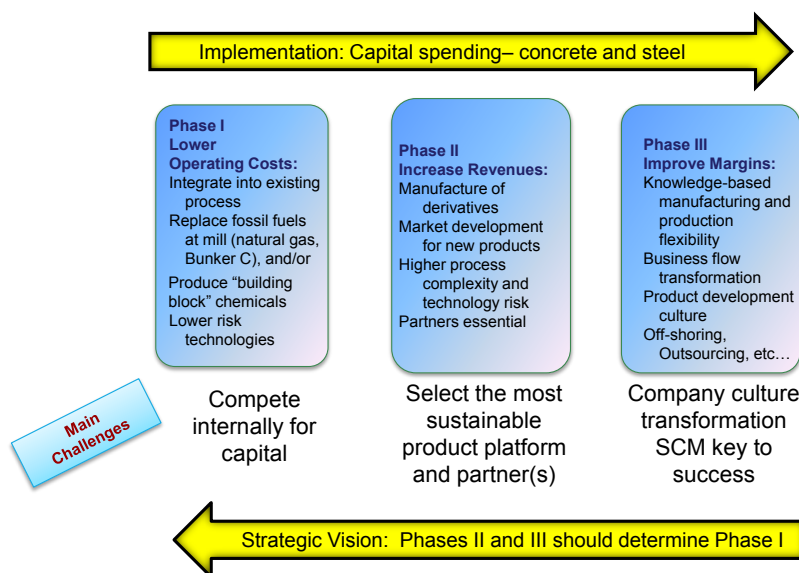


Fig. 3 - Phased-approach for the strategic implementation of biorefinery [22]

To invest, companies expect that their biorefinery strategy should result in high returns and an enhanced competitive position, considering the integration of new bioproducts within the existing product portfolio. Phase I in the near-term (typically <5 years) should involve the implementation of low to no-risk technologies that would be part of the overall process in the long run, and ideally lead to the production of building blocks or intermediate products to provide early profits in the development of the biorefinery. Besides technology and business risk mitigation, an advantage that the sequential implementation is that it can potentially provide flexibility to change the orientation of Phase II as processes and markets evolve in the bioeconomy, in case a more valuable strategy is identified during the Phase I implementation period.

The timeline of each phase is case-specific, and for the later phases, in many cases will depend on the ability of the pulp and paper company to create partnerships, capture market share, and reach targeted production and sales volumes prior to switching from one phase to the next. The case study developed in this article focuses on the assessment of biorefinery implementation in Phases I and II, with additional analyses of the impact of the length of Phase I on the overall economic return of the project.

CASE STUDY

The case study considers an existing kraft pulp mill producing 1,500 admt (air-dried metric tonnes) of softwood pulp per day. In addition to black liquor from the kraft process, potential feedstock for the biorefinery includes non-utilized biomass in the forest management area (FMA) owned by the mill, of approximately 1,500 bdtpd (metric tonnes per day) of hardwood sawlogs. Lignin extraction from black liquor is limited to the extent that would maintain suitable burning properties of the black liquor, thus insuring good operation of the recovery boiler. A major concern for the pulp mill was to maintain both quality and amount of pulp because of existing long-term agreements with customers.

METHODOLOGY

Lignin-based biorefinery strategies were defined by combining process and product possibilities, as well as their phased-approach for implementation. In order to avoid impact of the existing mill pulping process by hardwood chips, strategies were separated into two categories: (1) integrated processes that would use black liquor as the main feedstock, defined as the Lignin Precipitation (LP) strategy, and (2) non-integrated hardwood conversion processes defined as the Organosolv or more specifically, Solvent Pulping (SP) strategy.

Relevant information was collected for the completion of mass and energy balances, and combined in a large-block analysis [24] to obtain comparable capital and operating costs estimates for each phase of the strategies defined. Energy balance simulations of some process units were carried out using Aspen Plus[®], while other calculations relative to mass balances, process economics and cash flows have been made using Microsoft Excel[®].

Definition Of Product-Process Combinations

The LignoBoost process was considered the most mature of the lignin precipitation technologies, and was selected as the base case (“LP Base Case”) (Fig. 1). The LignoForce process is the main comparison alternative (“LP1”), and differences in economics were estimated (Fig. 2). A second alternative consists of incorporating ultrafiltration technologies prior to black liquor acidification in conjunction with the LignoForce process (“LP2”), and using only the lower molecular weight fraction in subsequent operations (Fig. 4). This strategy is interesting due to its implication for the production of carbon fibers. Not having to pretreat the kraft lignin prior to spinning increases savings in both capital and operating costs, and impacts the overall profitability. For the LP process alternatives, estimates are based on a lignin production capacity of 85 tpd. Lignin recovered in the first two strategies (LP Base Case and LP1) was defined as *Kraft Lignin*, while lignin from LP2 was defined as *Ultrafiltrated Kraft Lignin*.

Phenolic resins and carbon fibers are the (only) two lignin derivatives assessed in the case study. They would be produced in Phase II. Lignin was converted either into a PF resin or a carbon fiber precursor and sold to final manufacturer downstream on the value chain during Phase I, in order to mitigate market risks. For PF resin applications, lignin was phenolated prior to sale to resin manufacturers as a phenol replacement. For carbon fiber applications *Kraft Lignin* was acetylated and sold as a PAN replacement, while *Ultrafiltrated Kraft Lignin* was sent to the market without any additional modification.

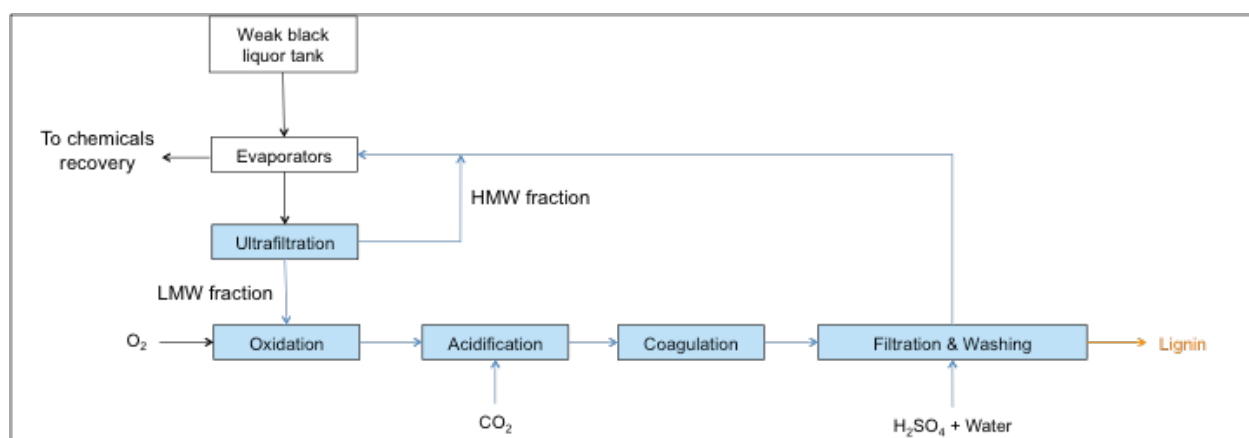


Fig. 4 - Block flow diagram of LP2 strategy, incorporating Ultrafiltration

The Organosolv process as developed by Alcell and further improved by Lignol [25] was defined as the base case for Solvent Pulping (“SP Base Case”), illustrated in Fig. 5. Many similarities exist between solvent-based fractionation and the conventional pulping of wood chips. This facilitates the adoption of the new technology at the mill and mitigates certain risks associated with technology disruption. Although there are several potential lignin extraction spots along the SP process, the differentiation between lignin grades was not considered in the process evaluation. It was assumed that all the lignin collected is mixed into a single stream identified as *Organosolv Lignin*.

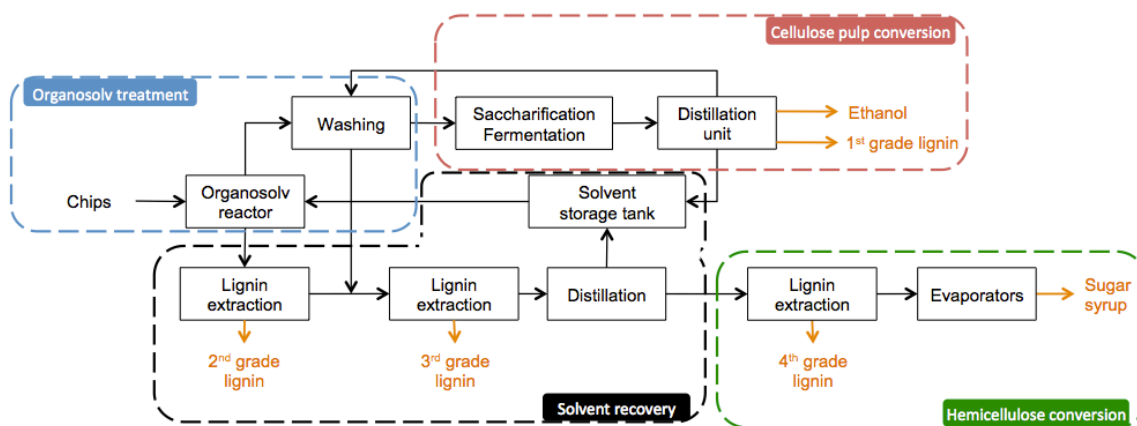


Fig. 5 - Block flow diagram of the Organosolv process, SP Base Case strategy

To make the biorefinery strategy comparisons consistent, the sequence of business phases for the sale of lignin derivatives is the same for the LP and SP alternatives. In the case of carbon fibers production, and similarly with *Ultrafiltrated Kraft Lignin*, *Organosolv Lignin* was considered to not require any pretreatment and sold as-is during Phase I. Since the focus of the case study is on lignin, products identified as “preferred derivatives” have been selected for cellulose and hemicellulose conversion considering a minimum risk approach.

Although ethanol production through C_6 fermentation is well established in North America, the current trend is towards replacing ethanol with butanol, as the latter provides several advantages (higher energy content, better compatibility with automobile systems, higher blending potential with gasoline [26]). Companies such as Gevo and Butamax have developed processes for converting existing ethanol production plants into butanol plants [27], and several projects are expected in the coming years. Two approaches have been considered for butanol production: (1) implement the Organosolv process for ethanol production in Phase I and convert the cellulose line into a butanol plant during Phase II, or (2) implement the A-B-E process [28] (commonly used for the production of butanol with ethanol and acetone as by-products) and start butanol production during Phase I. Butanol from the A-B-E process (n-butanol) would be used for chemical applications, while butanol from retrofitting ethanol processes (isobutanol) would target biofuel applications.

Furfural has been selected among possible hemicellulose derivatives for its market potential [29] and the maturity of processes for its manufacturing. Formic and acetic acids are co-products. The implementation approach proposed for this strategy consists of converting hemicellulose into a C_5 sugar syrup to be sold as animal feed in Phase I, prior to converting sugars into furfural during Phase II. In the pulp and paper industry, hemicellulose extraction processes are increasingly used as pretreatment units in order to isolate C_5 sugars and convert these into higher-value products [7, 30]. This strategy is considered as an alternative in the case study, by implementing a Hot Water Extraction process [31] prior to the Organosolv reactor (see Fig. 6).

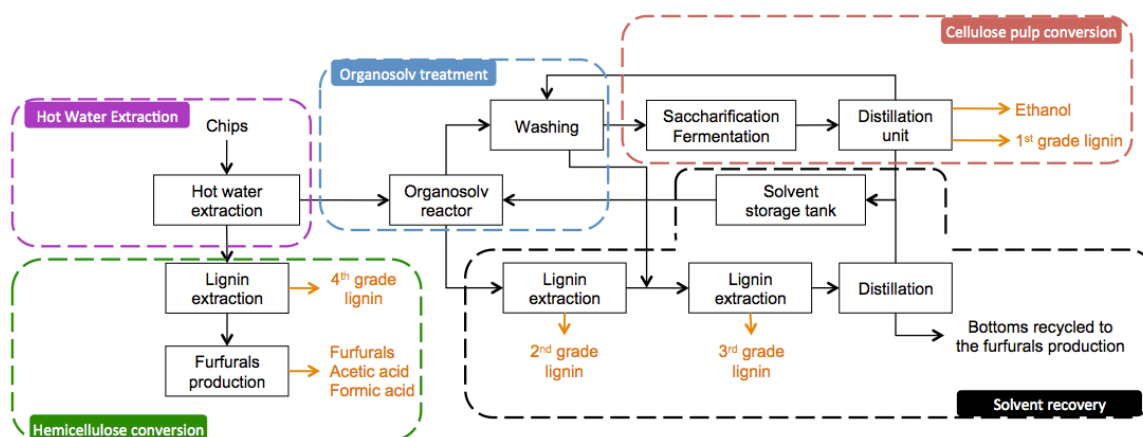


Fig. 6 - Block flow diagram of SP1 strategy, incorporating Hot Water Extraction

Overall, four strategies were defined for the SP category combining the implementation approaches for butanol and furfural, as summarized in Table 1. Figure 7 represents the evolution of the SP Base Case to isobutanol and furfural production in Phase II, and the alternative strategy producing n-butanol, called SP2.

		SP Base Case	SP1	SP2	SP3
Phase I	C6 sugars	Ethanol		Acetone n-Butanol Ethanol	
	C5 sugars	Sugar syrup	Furfural	Sugar syrup	Furfural
	Lignin	Precursor of either PF resin or Carbon fiber			
Phase II	C6 sugars	Isobutanol		Acetone n-Butanol Ethanol	
	C5 sugars	Furfural			
	Lignin	PF resin or Carbon fiber			

Table 1 - Summary of Solvent Pulping biorefinery strategies considered in the case study

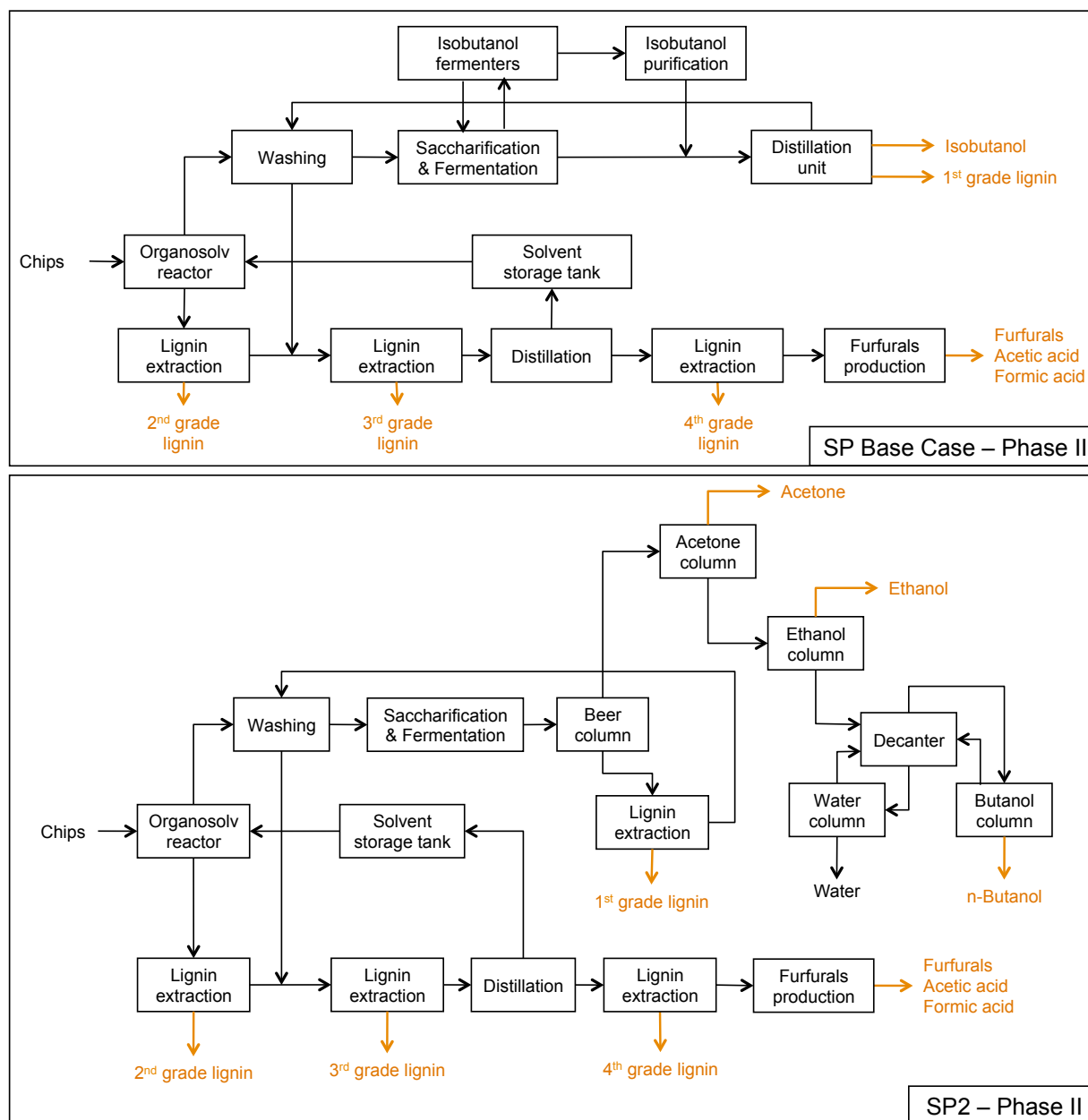


Fig. 7 - Block flow illustrations of SP Base Case and SP2 strategies in Phase II

Process Techno-Economics

Techno-economic estimates involve determining a realistic value for capital and operating costs, and for expected revenues that depend on future market prices. The techno-economics for most biorefinery projects is most sensitive to the latter around which there is high uncertainty.

Equipment costs were estimated by assessing comparable processes in the literature, including projects and equipment similar to those for which estimations were being made. Cost data were scaled to the capacity required for the case study, and actualized using cost index factors. Commonly-used design heuristics were used to estimate components of direct and indirect capital costs for the LP processes. For the SP processes, once equipment costs were obtained, the Lang method [32], which uses factors to obtain order-of-magnitude estimates of capital investment from equipment costs, was applied. This method was considered appropriate due to scarcity of detailed cost information on the Organosolv process. Different Lang factors have been applied to operating units of the SP processes, as summarized in Table 2.

	Process block	Lang factor
Organosolv-related blocks	Organosolv treatment	2.80
	Ethanol/Butanol production	
	Solvent recovery	
Non-Organosolv blocks	Feedstock storage	1.97
	Product storage	
	New boiler(s)	
	Hot water extraction	
	Lignin conversion	
	Furfural production	2.01

Table 2 - Process blocks and associated Lang factors used for techno-economics of Solvent Pulp (SP) strategies

For cash flow calculations, a 2-year construction period was assumed for each of the implementation phases. Two cases were considered for the Internal Rate of Return (IRR) calculations, for each product-process strategy:

- IRR for Phase I is calculated as though run for 20 years, referred to as 'Phase I' in the figures
- IRR for Phase I is calculated for 5 years, then Phase II is implemented and run for 20 years, referred to as 'Phase I + Phase II' in the figures.

Other main assumptions of economic calculations are summarized in Table 3. Regarding lignin derivatives, specific discounts were applied to assumed market prices to reflect market penetration strategies. Discounts applied vary from 10% to 20% for different lignin types and applications, based on judgement.

Parameter	Assumptions / Values
Feedstock costs <ul style="list-style-type: none"> • Biomass • CO₂ • O₂ • H₂SO₄ • Caustic 	<ul style="list-style-type: none"> • \$100/bdmt • \$300/t • \$50/t • \$180/t • \$430/t
Product prices <ul style="list-style-type: none"> • Phenol, PF resin • PAN, Carbon fiber • Ethanol • n-butanol; isobutanol • Sugar syrup • Furfural 	<ul style="list-style-type: none"> • \$1,005/t, and \$2,000/t • \$2,480/t, and \$15,430/t • \$0.49/l (\$1.84/gal) • \$1.36/l (\$5.15/gal, sold as a chemical); \$0.81/l (\$3.08/gal, sold as a fuel) • \$170/t • \$1,600/t
Taxes	33% on positive net income
Depreciation	Accelerated method <ul style="list-style-type: none"> • Year 1: 25% of fixed capital investment (FCI) • Year 2: 50% of FCI • Year 3: 25% of FCI
Production ramp-up	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Year 1: 70% of nominal capacity ▪ Year 2: 90% of nominal capacity ▪ Year 3+: 100% of nominal capacity
Lignin usage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Year 1: 80% burnt, 20% sold as derivative precursor ▪ Year 2: 20% burnt, 80% sold as derivative precursor ▪ Year 3-5: 100% sold as derivative precursor ▪ Year 6+: 100% sold as final customer product
Discount on market price, per type of lignin	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PF resin applications: 10% ▪ Carbon fiber applications <ul style="list-style-type: none"> ○ Kraft Lignin: 20% ○ Ultrafiltrated Kraft Lignin: 15% ○ Organosolv Lignin: 10%

Table 3 - Main assumptions for economic calculations

Scenarios Definition and Sensitivity Analysis

Based on the results of the preliminary profitability assessment, a scenario representing the preferred strategy was developed. A sensitivity analysis was performed on this scenario, considering five parameters identified as critical to the profitability of the case study strategies: capital cost subsidy, process scale, the length of Phase I, as well as the market prices of phenol and carbon fiber.

Capital cost subsidy considered the minimum of (1) 50% of Phase I capital requirements, and (2) \$100 M. Subsidies are considered only for Phase I.

The impact of process scale was assessed on the SP processes for biomass procurement capacities of (1) 500 tpd (ie the same lignin production capacity as lignin precipitation (LP) producing 85 tpd of lignin), and (2) up to 2,335 tpd (inventory of pulplogs and sawlogs in the FMA) on a dry basis.

The length of Phase I has been evaluated from 3 years (2-year construction + 1-year production) to 27 (2-year construction + 25 years of the ‘Phase I + Phase II’ scenario).

RESULTS

With 1500 tpd of hardwood supply, 260 tpd of lignin can be extracted for the SP Base Case process, while only 85 tpd are recovered from the acidification of 15% of the mill black liquor. This amount of lignin results in the production of 178 tpd of resin precursor in Phase I and 410 tpd of PF resin in Phase II, for the case of LP strategies. The same conversion yields apply to *Organosolv Lignin*. In the case of carbon fibers production, a yield of 42% is estimated for *Organosolv Lignin* and *Ultrafiltrated Kraft Lignin*, and a 53% yield is assumed for *Kraft Lignin*. This difference is due to the mass increase that occurs during acetylation of *Kraft Lignin*.

Techno-Economic Performances

Figures 8 and 9 summarize the results of cost and revenue estimates for each phase of the production of PF resins and carbon fibers, respectively. These results are specific only to the case study mill, as they take into consideration integration and other costs that are related to the existing processes (eg materials handling, power island, and wastewater treatment plant). Both costs and revenues are much lower for LP strategies compared to SP processes, however direct comparison between LP and SP categories is difficult to make due to the magnitude of the scale difference between the two types of processes. Regardless of the lignin extraction process, carbon fibers appear more costly to produce than PF resins.

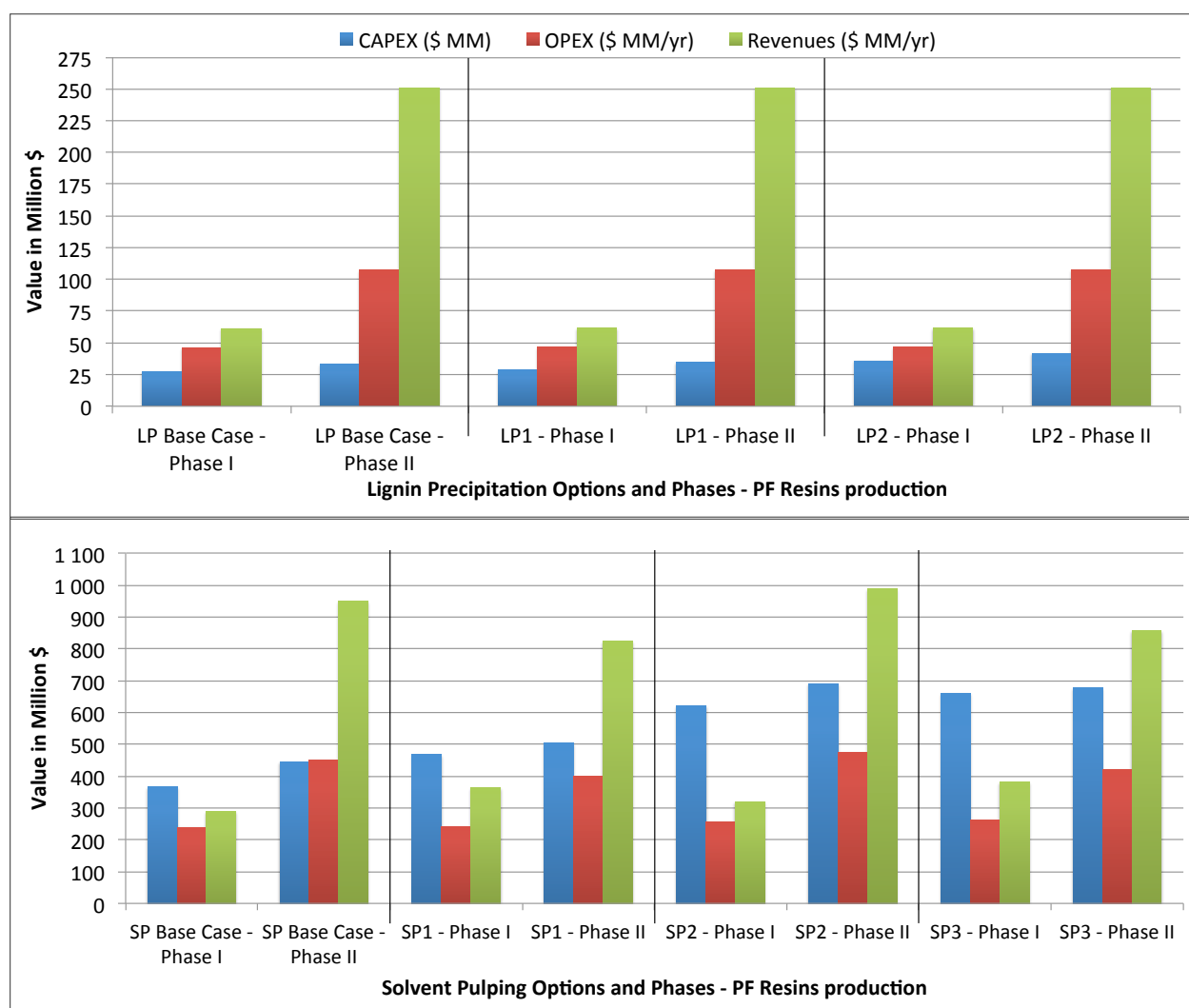


Fig. 8 - Summary of techno-economics for lignin-based PF resins production

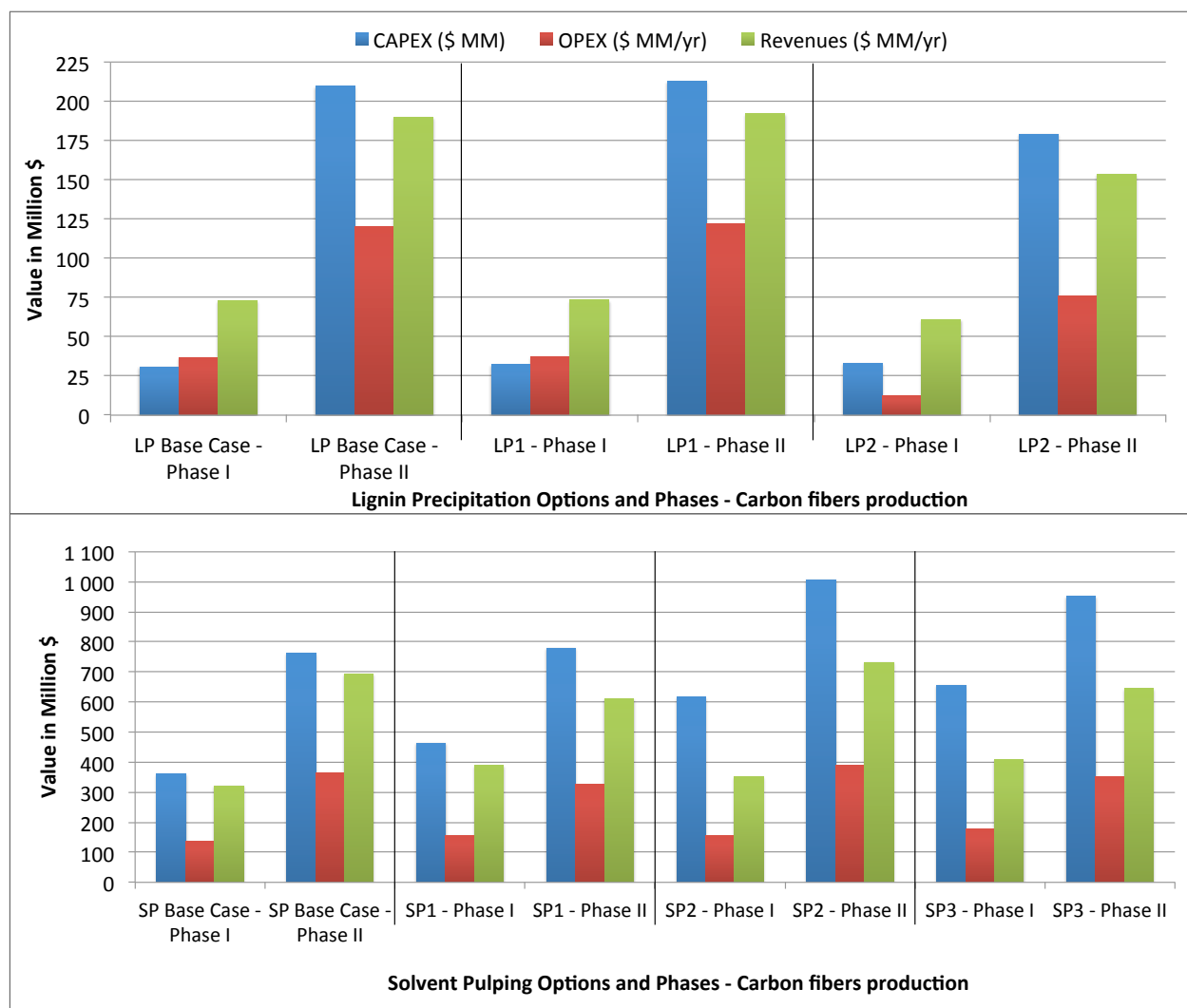


Fig. 9 - Summary of techno-economics for lignin-based Carbon fibers production

Figures 10 and 11 present the IRR estimates for “Phase I” alone, and “Phase I + Phase II” for PF resins and carbon fibers production, respectively. For PF resins production, LP strategies are generally more profitable than SP ones, at each phase of biorefinery implementation. Results are more balanced in the case of carbon fiber production, for which *Ultrafiltrated Kraft Lignin* (LP2) presents substantially better results. The production of PF resins is more interesting in the “Phase I + Phase II” scenarios, while in the case of carbon fibers, the production of precursors (“Phase I” scenarios) are more profitable.

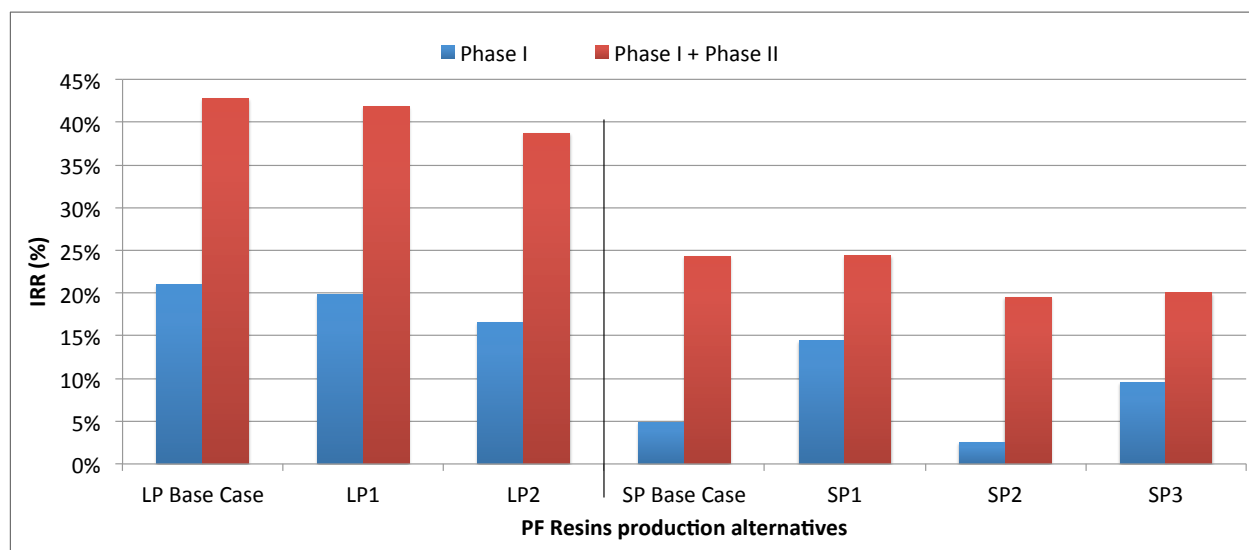


Fig. 10 - Profitability of PF resins production strategies

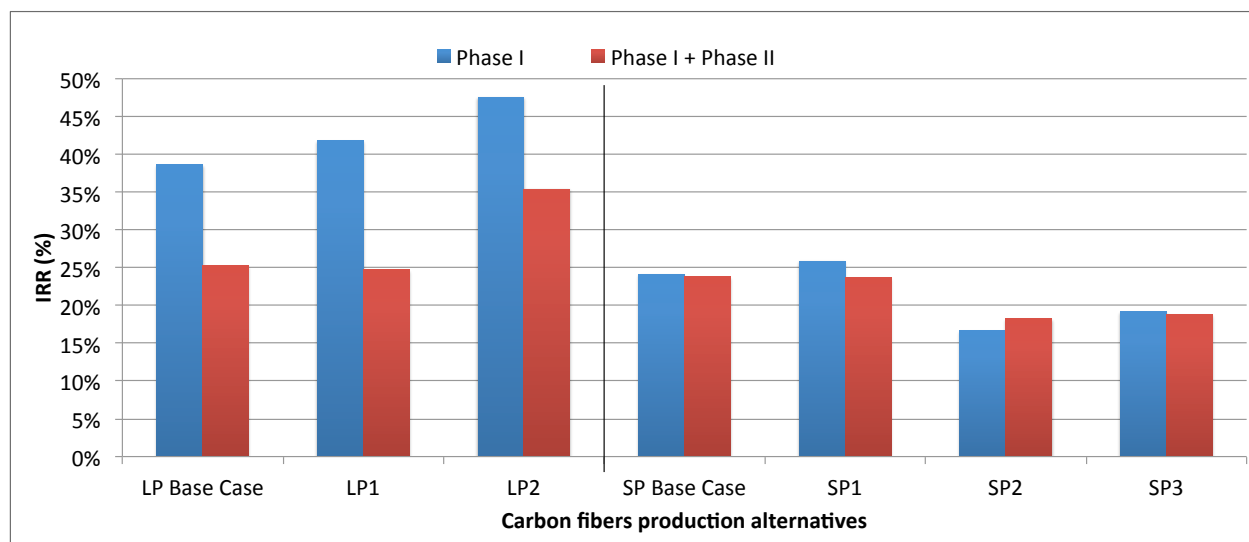


Fig. 11 - Profitability of carbon fibers production strategies

Scenario Analysis

Lower investment requirements, a more mature technology and a good IRR, result in LP processes and PF resins production being the most promising in the short-term. In the longer term, as higher production volumes are required for capturing market share and added-value lignin-based products are manufactured from differentiated lignin, SP processes will become preferred. Furthermore, SP processes result in a better IRR for carbon fibers production. Therefore, the strategy selected for the scenarios analysis combined LP and SP processes as follows:

- Phase I: Lower risk phase
 - LP2 integrated to existing mill, producing PF resins precursor
 - SP Base Case demo plant (300 tpd of hardwood) for carbon fibers development
- Phase II: Commercial scale development
 - LP2 evolves to carbon fiber precursor production
 - SP Base Case commercial scale plant implemented (1,500 tpd), producing carbon fiber precursors, ethanol and sugar syrup
- Phase III: Full implementation of the product portfolio
 - Carbon fiber manufacturing strategy evolves from precursors to carbon fiber production
 - Ethanol and sugar syrup units evolve respectively to isobutanol and furfural production

Figure 12 below presents the results of the sensitivity analysis applied to this “LP+SP strategy”. The allowance of capital cost subsidy, or a higher carbon fiber price, make the strategy much more attractive. As well, a higher phenol price is beneficial to short-term profitability. From another perspective, a low-capacity commercial scale or a longer-than-expected Phase I negatively impacts the profitability of the strategy.

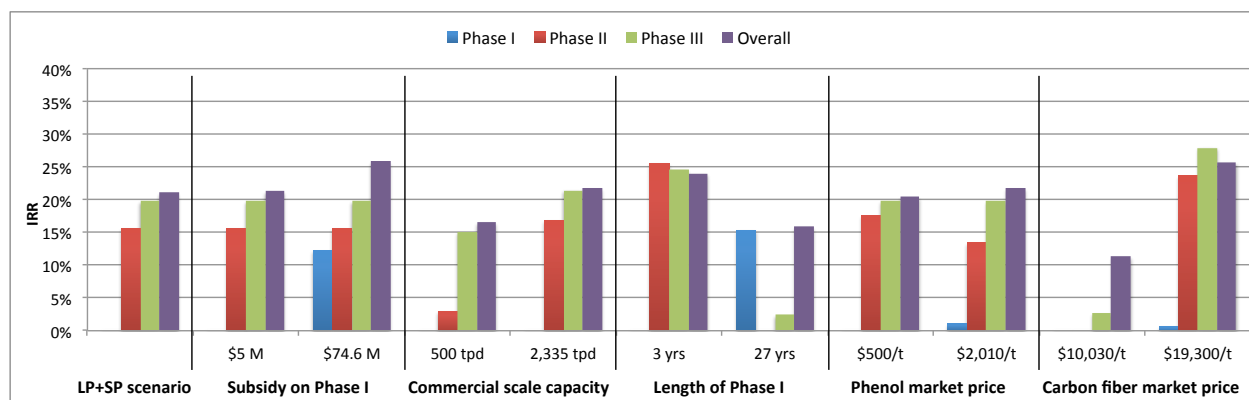


Fig. 12 - Sensitivity analysis for the “LP+SP” lignin-based biorefinery strategy

DISCUSSION

Although the estimates for of biorefinery implementation are context-specific and moreover, have high uncertainty, some generalities can be extrapolated from the case study.

For this case study, PF resins via lignin precipitation (LP) processes was the preferred strategy for the short-term. Revenue from this strategy is limited by capacity constraints of the kraft mill recovery cycle. SP strategies performed better when combined with carbon fiber production.

Solvent pulping (SP) processes are capital-intensive, which considering their level-of-risk especially considering scale-up, is an important showstopper for their implementation in the near-term. Further, depending on the existing mill power island and the process steam demand, the integration of SP processes into existing mills might require the purchase of a new boiler and adapting the chip handling system and/or the wastewater treatment facility. Nonetheless, the resulting diversified product portfolio can potentially provide significant additional revenue streams in the early years of an implemented project if the market conditions realize.

Combining LP and SP processes into a single strategy provides the opportunity to develop a unique competitive advantage regarding lignin markets, and the production of high value derivatives in the longer-term. At the same time, short-term risks are mitigated by more developed applications such as phenol replacement in PF resins. A vertically integrated company that owns forest management areas, pulp mills and plywood manufacturing plants would have a considerable advantage in this regard. Capital cost subsidy significantly enhances the profitability of the transformation strategy, and should be considered essential to mitigate short-term risk.

CONCLUSIONS

Beyond the need to generate positive cash flows in the short-term, pulp and paper companies are faced with the opportunity to define their long-term biorefinery strategy considering substantial volumes of added-value product streams. In this project, the context of the lignin-based biorefinery implemented at a kraft pulp mill has been considered for which integrated Lignin Precipitation (LP) and parallel Solvent Pulping (SP) strategies have been considered for the production of PF resins and/or carbon fiber. These strategies would be implemented using a phased approach, where Phase II involves the manufacture of added-value products, and Phase I is defined to mitigate short-term risks in a way that supports the transition to Phase II. This analysis shows that (1) PF resins production from Lignin Precipitation and (2) carbon fibers production from Solvent Pulping are profitable strategies. Lignin precipitation including ultrafiltration of black liquor prior to acidification is a promising alternative for carbon fiber production. Two important drivers are technology maturity, and the ability to match production volume with market demand, which will depend on the speed to market maturity. In this regard, combining Lignin Precipitation and Solvent Pulping for the production of PF resins in the short-term and carbon fiber in the longer term, appears as a competitive and robust strategy.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by a Collaborative Research and Development (CRD) grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). The authors would like to thank industrial partners in the project, who provided access to operating facilities, process and technology data, and expertise for the validation of assumptions and results.

REFERENCES

- [1] Pöyry PLC. "Paper and paperboard market: Demand is forecast to grow by nearly a fifth by 2030". [Online] <http://www.poyry.com/news/paper-and-paperboard-market-demand-forecast-grow-nearly-fifth-2030>, 2015.
- [2] Hawkins Wright. "Market Outlook – PwC Global Forest and Paper Industry Conference". [Online] <https://www.pwc.com/ca/en/forest-paper-packaging/publications/20150506-pwc-roger-wright-market-outlook-fpp.pdf>, 2015.
- [3] C. Macdonald, "Market Pulp: Overcapacity on the Way," *Pulp & Paper Canada*, pp. 9-11, May/June 2016.
- [4] A. Eudes, Y. Liang, P. Mitra, and D. Loqué, "Lignin bioengineering," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 26, pp. 189-198, April 2014. doi.org/10.1016/j.copbio.2014.01.002
- [5] Y.-H. Zhang, "Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 35, no. 5, pp. 367–375, 2008.
- [6] P.-O. Bontems, "Stratégie industrielle du bioraffinage de la lignine et méthode pour atténuer les risques dans le modèle d'affaires," École Polytechnique de Montréal, MSc Thesis 2014.
- [7] V.B. Agbor, N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, and D.B. Levin, "Biomass pretreatment: Fundamentals toward application," *Biotechnology Advances*, vol. 29, no. 6, pp. 675-685, 2011.
- [8] C. Arato, E.K. Pye, and G. Gjennestad, "The Lignol Approach to Biorefining of Woody Biomass to Produce Ethanol and Chemicals," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 121-124, pp. 871-882, 2005.
- [9] X. Pan et al., "Bioconversion of Hybrid Poplar to Ethanol and Co-Products Using an Organosolv Fractionation Process: Optimization of Process Yields," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 94, no. 5, 2006.
- [10] F. Öhman, H. Theliander, P. Tomani, and P. Axegard, "Method for separating lignin from black liquor," WO 2006/031175, March 23, 2006.

- [11] L. Kouisni and M. Paleologou, "Method for separating lignin from black liquor," US 2011/0297340, December 8, 2011.
- [12] C. Macdonald, "Biorefineries Coast to Coast," *Pulp & Paper Canada*, pp. 16-17, September/October 2016.
- [13] LigniMatch. Future use of lignin in value added products. [Online]. http://www.gmv.chalmers.se/digitalAssets/1448/1448662_roadmap.pdf
- [14] N. Smolarski. "High-Value Opportunities for Lignin: Unlocking its Potential". [Online]. <http://www.greenmaterials.fr/wp-content/uploads/2013/01/High-value-Opportunities-for-Lignin-Unlocking-its-Potential-Market-Insights.pdf>, 2012.
- [15] M. Wang, M. Leitch, and C. Xu, "Synthesis of phenol–formaldehyde resol resins using organosolv pine lignins," *European Polymer Journal*, vol. 45, no. 12, pp. 3380–3388, 2009.
- [16] N.S. Çetin and N. Özmen, "Use of organosolv lignin in phenol–formaldehyde resins for particleboard production," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 22, no. 6, pp. 477-486, 2002.
- [17] A.K. Naskar, "Developing Low Cost Carbon Fiber for Automotive Lightweight Composites," in *32nd Annual Meeting The Council for Chemical Research, MI*, 2011.
- [18] X. Huang, "Fabrication and Properties of Carbon Fibers," *Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 2369-2403, 2009.
- [19] J.F. Kadla et al., "Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications," *Carbon*, vol. 40, no. 15, pp. 2913–2920, 2002.
- [20] R.C. Eckert and Z. Abdullah, "Carbon fibers from kraft softwood lignin," US 7,794,824, September 14, 2010.
- [21] I. Norberg, "Carbon fibres from kraft lignin", Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012.
- [22] V. Chambost, J. McNutt, and P.R. Stuart, "Guided tour: Implementing the forest biorefinery (FBR) at existing pulp and paper mills," *Pulp and Paper Canada*, vol. 109(7-8), pp. 19-27 , 2008.

- [23] J. Jeaidi and P.R. Stuart, "Techno-economic analysis of biorefinery process options for mechanical pulp mills," *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, vol. 1, no. 3, 2011.
- [24] E. Hytönen and P.R. Stuart, "Integrating Bioethanol Production into an Integrated Kraft Pulp and Paper Mill: Techno-Economic Assessment," *Pulp and Paper Canada*, vol. 110, no. 5, pp. T58-T65, 2009.
- [25] C. Hallberg et al., "Continuous counter-current organosolv processing of lignocellulosic feedstocks," US 7,465,791, December 16, 2008.
- [26] J. Abbasi. "The fuel that could be the end of Ethanol". [Online]. <http://tech.fortune.cnn.com/2013/04/12/the-fuel-that-could-be-the-end-of-ethanol/>, 2013.
- [27] H. Fountain. "Corn Ethanol Makers Weigh Switch to Butanol". [Online]. <http://www.nytimes.com/2012/10/24/business/energy-environment/weighing-butanol-as-an-alternative-to-ethanol.html>, 2012.
- [28] A.P. Mariano et al., "Energy Requirements for Butanol Recovery Using the Flash Fermentation Technology," *Energy & Fuels*, vol. 25, pp. 2347–2355, 2011.
- [29] W. De Jong and G. Marcotullio, "Overview of Biorefineries based on Co-Production of Furfural, Existing Concepts and Novel Developments," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 8, no. 1, p. Article A69, 2010.
- [30] N. Mosier et al., "Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass," *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 6, pp. 673-686, 2005.
- [31] H. Wang et al., "Effect of Acid, Alkali, and Steam Explosion Pretreatments on Characteristics of Bio-Oil Produced from Pinewood," *Energy & Fuels*, vol. 25, no. 8, pp. 3758–3764, 2011.
- [32] M. Peters, K. Timmerhaus, and R. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th ed. Boston, MA, US: McGraw-Hill, 2003.

**ANNEXE B – Article 2: Decision-Making Process for the Identification of
Preferred Lignin-Based Biorefinery Strategies**

Cédric Dikko Téguia, Sophie D'Amours, Rod Albers, et Paul Stuart.

Article 2, soumis à *TAPPI Journal*.

Abstract

The lignin biorefinery is emerging; there has been significant progress in recent years regarding lignin extraction and conversion processes, their implementation at the commercial scale, and the validation of lignin substitution potential in various applications. In this paper, seven strategies for implementing the lignin-based biorefinery into a kraft pulp mill were considered, and different performance metrics for these strategies were calculated in order to identify the “most preferred”. The different options addressed two distinctly different objectives that companies can consider regarding their biorefinery strategy, either (1) a near-term mill-level profitability improvement vision, or (2) a longer-term revenue growth-oriented vision. A phased-implementation approach was systematically defined for each option in order to mitigate technology and market risks. Lignin product applications that were considered included phenol replacement in PF resins, polyols replacement in PU foams, and PAN replacement in carbon fiber.

A Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) panel was executed for evaluating the seven lignin-based biorefinery strategies, using a set of economic, market and risk criteria. Although the panel selected Internal Rate of Return (IRR) as the most important criterion, Competitiveness on Production Costs (CPC) appeared to be the most important factor for distinguishing between lignin strategy options. CPC reflects the robustness of the biorefinery strategy relative to an aggressive price-cutting strategy from the competition. Overall, strategies involving lignin precipitation were more attractive economically, while those involving larger-scale solvent pulping processes and the associated larger revenue streams were considered better long-term strategies. The most preferred strategy considered by the panel was for precipitated lignin sold for both PF resin and PU foam applications. The next preferred strategy considered lignin sales to the same market segments, but at larger volumes. The next, closely-ranked strategy considered the production of a lignin-based PF resin at the host mill. These three strategies were considered as “preferred”, for further more-detailed assessment.

Keywords

Biorefinery, Lignin, MCDM, Product design, Retrofit implementation, Product portfolio, Business model

Introduction

Lignin is burnt as black liquor in the recovery boiler to produce steam and electricity for the pulp manufacturing process, but it could also be separated and comprise the feedstock for new “green” revenue streams. Although the lignin chemical structure is dominated by aromatics and methoxyl groups, it also includes a variety of other functional units, which makes it potentially valuable in a wide range of applications [1, 2]. Recent progress in lignin extraction of lignin from black liquor has resulted in the emergence of the first commercial plants in the US, Canada, and Sweden, using either the LignoBoost process [3] or the LignoForce process [4]. Both of these processes are based on the use of carbon dioxide to lower the black liquor pH to 9-10, and causing lignin to precipitate [5, 6]. Figure 1 illustrates operational steps of a generic lignin precipitation process. Alternatively, lignin can be extracted directly from wood through various biomass fractionation processes [7], as generically illustrated in Figure 2. A solvent-based technology can be employed for that purpose, which has a less damaging effect on the lignin structure compared to the kraft pulping process. Nevertheless, extracting and/or producing lignin is only the first step of a successful biorefinery transformation. Companies face the complex choice of identifying the right applications to which they should sell their lignin, knowing that each option implies unique technical and market challenges, while the precise understanding of the linkage between lignin properties, derivative product performance, and market supply/demand growth remains uncertain.

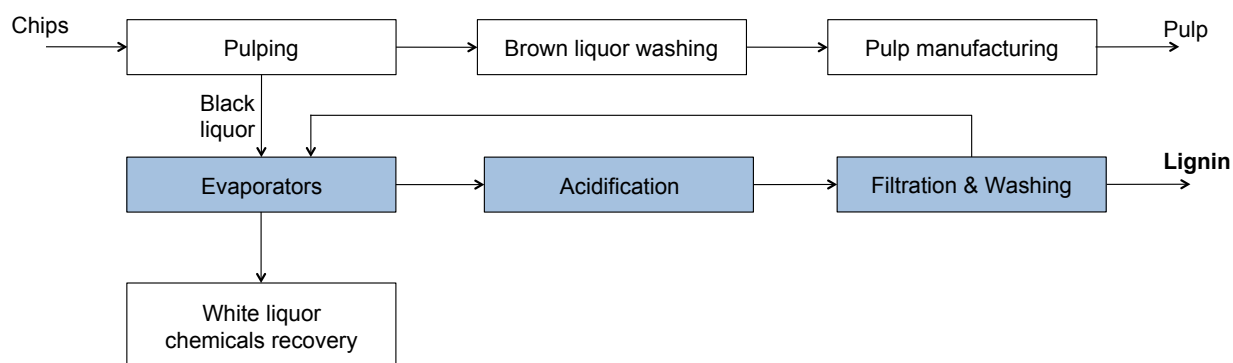


Fig. 1 - Simplified lignin precipitation process from black liquor

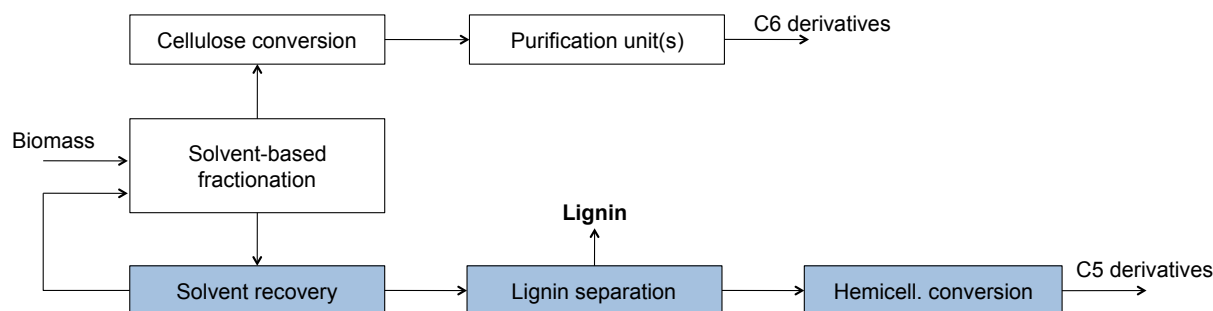


Fig. 2 - Simplified solvent-based biomass fractionation process

Considering this context, this paper aims to assess different strategies for the deployment of the lignin-based biorefinery. Risk mitigation using a phased implementation approach is considered, taking into consideration technology and market uncertainties associated with the business model. The following objectives were addressed in this project:

1. To generalize the market and technology landscape associated with the conversion of lignin into added-value derivatives;
2. To define a set of lignin-based biorefinery strategies, potentially suitable for implementation within an existing kraft pulp mill;
3. To define a set of technology, market and risk-based criteria, and consider these in a panel methodology, in order to identify the “most preferred” lignin-based biorefinery strategies.

LIGNIN DERIVATIVES AND MARKET APPLICATIONS

The spectrum of products that can potentially be synthesized from lignin is fairly diversified. Holladay et al. [8] generally described this spectrum as including power, fuel and syngas products, macromolecules, and aromatics, which can further be classified as near-term, medium-term, and long-term opportunities.

Lignosulfonates obtained from the sulfite pulping process are the most widely used today among technical lignin types, for example as concrete and animal feed additives, for dust control, or as a precursor in the production of vanillin, dimethyl sulfide (DMS) and dimethyl sulfoxide (DMSO). Phenol-formaldehyde (PF) resins, polyurethane (PU) foams, and carbon fibers are emerging as promising near-term opportunities for kraft and organosolv lignins [9-11], the category of lignins considered in this paper.

For example, lignin can theoretically replace more than 50% of phenol used in resin formulations [12], however high levels of substitution are not recommended yet due to the lower performance of the resulting resin (bond strength, hardening time, mechanical properties of panels) [13]. In practice, at the present time the substitution potential of essentially unmodified lignin in PF resins is limited to 25%, and can increase to 40% if the lignin is pre-treated, eg by phenolation, prior to resin manufacturing [14].

With regards to PU foams manufacturing, lignin can be used as a replacement of polyols and is more suitable for rigid foams applications. Lignin depolymerization to obtain polyols can be realized with high yields (80%-90%) but this process remains embryonic for the moment [15]. A level of substitution of 15% has been achieved using a mechanically ground lignin (without chemical modification), while chemically modified lignin can replace up to 30% of polyols in PU foams [11], achieved through an oxyalkylation process.

The opportunity to produce carbon fiber from lignin is arguably one of the most attractive potential applications. Carbon fiber exhibits unique physical and mechanical properties that make it suitable for replacing metals in various applications, including in the automobile and aerospace industries [16]. Despite growing demand, carbon fiber production volumes remain low due to its high cost, which is related in good part to the cost of precursors. Lignin can potentially be a much cheaper alternative to Polyacrylonitrile (PAN), which is currently the most common precursor used in the industry [17]. The conventional carbon fiber manufacturing process includes four steps: fiber spinning, stabilization, carbonization, and surface treatment. The lignin substitution potential varies with the type of spinning employed, ranging from 50% in the case of wet spinning to a full replacement when melt spinning is used [18]. Past studies have highlighted some difficulties for the spinning step using softwood kraft lignin, which charred at high temperature. Recent developments have overcome that limitation by separating the black liquor into distinct molecular weight fractions using an ultrafiltration membrane prior to lignin precipitation and using only the low-molecular weight fraction as a carbon fiber precursor [19]. Nevertheless, the current performance of lignin-based carbon fibers have are not yet equivalent to PAN-based ones, especially for high-strength applications [16].

MITIGATING BIOREFINERY RISKS THROUGH PHASED IMPLEMENTATION

Despite risks associated with lignin product performance and market growth, several forest product companies seek to have significant strategic advantages to being first- or early-to-market with the manufacture of lignin. A practical approach to mitigating these risks is through phased implementation. Chambost et al. [20] suggest a nominal three-phase approach.

Various factors influence the definition of Phases from the perspective of mitigating risk, including (1) the product point-of-entry on the existing value chain, (2) the market characteristics and associated penetration needed, and (3) the technology development approach for the deployment of the strategy [21]. For the example of lignin use in a phenolic resin applications, the first factor would consider whether lignin is sold as phenol replacement for resin manufacture, or mixed/converted into the PF resin. The penetration rate for a given position on the value chain, which is dependent on the substitution potential, leads to defining the design capacity of the process over several phases. Will the lignin be sold internally, or sold and repurchased from the PF resin supplier? The third element considers whether the company is open to horizontal or vertical integration. Is the company open to vertical integration, and increasing risk and added-value from manufacture of the downstream added-value phenolic resin, requiring that their strategy brings them closer to the final user? What would be the company's competitive position to achieve this goal, relative to others?

EVALUATION AND SELECTION OF BIOREFINERY OPTIONS

The problem of biorefinery strategy selection has been addressed in various studies, and several methods have been developed to address the evaluation and decision-making regarding individual projects or project portfolios [22-25]. The success of a biorefinery initiative is dependent on a wide range of factors identified using different perspectives, among which the most important must be identified and taken into account during the biorefinery selection process. A committee of decision-makers rather than a single individual is typically responsible for capital investment recommendations in the company, and the committee must respectfully consider a range of technology, market and risk issues. This emphasizes the need for a decision-making method that is practical for summarizing critical information, and using this to aggregate the perspectives of stakeholders in order to reach a balanced decision. Multi-criteria methods suitable for this purpose have been successfully employed to solve biorefinery decision problems in past studies [26-29]. Among these, multi-criteria decision-making (MCDM) aggregates the panel member preferences systematically and in an interactive context, resulting in an outcome is readily interpretable – resulting in alignment between stakeholders regarding “preferred” strategies.

In the MCDM process, the definition of the set of evaluation criteria is critical. Significant care is needed to define important criteria that reflect the values of the company [30]. Criteria can be defined using top-down [31] or bottom-up approaches [32], ultimately resulting in a consistent family of attributes, which should be exhaustive, monotonic, minimal, legible and operational [33].

OBJECTIVE

This study considers the implementation of a lignin-based biorefinery into a North-American forest product company that owns sawmills and panel board mills, as well as kraft pulp and paper mills. The company seeks to diversify its product offering, starting with one of its market pulp mills. The mill produces 1,500 admt (air-dried metric tons) of kraft softwood pulp per day and is adjacent to a sawmill also owned by the company. Two recovery boilers and one hog fuel boiler are running under normal operating conditions, and the mill has enough cogenerated power to be energy self-sufficient. With regards to the integration of biorefinery processes with the existing pulping process, there is a reasonable capacity for a certain additional steam production, whereas spare capacity at the wastewater treatment plant is more limited. Additional biomass of approximately 1,500 bdmt (bone dry metric tons) per day of hardwood saw logs is available as potential feedstock for the biorefinery from the mill-owned forest management area (FMA).

It is assumed that in the Base Case, that a lignin precipitation unit producing 30 bdmt/day of lignin from black liquor has been implemented at the mill. The objective of the project was to assess the different strategies available to the mill, and maximize the value of the lignin-based biorefinery.

Candidate Biorefinery Strategies

A preliminary screening of lignin applications was made considering (1) technology and market readiness for different lignin products, and (2) the potential to create competitive advantage in the near- and longer-terms. This analysis led to retaining polyols replacement in PU foams among immediately achievable alternatives to PF resins applications, while PAN replacement in carbon fibers was retained among the longer-term applications [34]. All strategies were defined as extensions of the Base Case situation, considering phased implementation.

The first strategy, referenced as “Ligno 90•PF”, aims to improve market position by increasing production volume. It considers tripling the capacity of the lignin precipitation unit from 30 t/d to 90 t/day, still having minimal impact on recovery boiler operations. Two strategy alternatives emerge from this: (1) a mill-centric strategy that focuses on improving the competitive position of the host mill at the current scale (Group 1 strategies), and (2) strategies that seek larger manufacturing scales and greater impact in terms of revenue diversification (Group 2 strategies).

Ligno 90•PF PU and Ligno 90•PF CF strategies consider commercializing lignin respectively for PU foams and carbon fiber applications. In both cases, 7% of the production would be used in company-owned panel board mills, 60% would be sold for PF resin applications, and 33% for either PU foams or carbon fiber applications. A vertical integration approach is represented through the strategy Resin 90, that considers on-site manufacturing of a lignin-phenol-formaldehyde resin. In this case, the acquisition of an existing resin manufacturer is considered in order to facilitate the integration of resin production, as well as access to distribution channels.

In the second group of strategies, a joint venture is considered for the implementation of a stand-alone solvent pulping plant in parallel to the existing process. It would convert the available supply of hardwood into a portfolio with isobutanol (sold as a biofuel), and a hemicellulose-rich sugar syrup (sold as animal feed), and lignin derivatives. The non-lignin products were selected using minimum technology and market risk considerations, and remain fixed for all scenarios. The first lignin strategy, Ligno 90 + SP•PF, considers additional sales with the main lignin application. The last two, Ligno 90 + SP•PF PU and Ligno 90 + SP•PF CFs, consider product diversification into PU foams and carbon fiber applications. Table 1 below summarizes the Phases for each of the 7 strategies.

	Lignin Biorefinery Strategies	Phase 0 Year 0 – Year 4	Phase I Year 5 – Year 9	Phase II Year 10 – Year 30
Strategic orientation	Base Case 30 t/d lignin precipitation	<ul style="list-style-type: none"> • Year 0: 100% lignin burnt • Year 1: 28 t/d burnt, 2 t/d to board mills • Year 2: 24 t/d burnt, 6 t/d to board mills • Year 3: 18 t/d burnt, 6 t/d to board mills, 6 t/d to PF resin market • Year 4: 12 t/d burnt, 6 t/d to board mills, 12 t/d to PF resin market • Year 5: 6 t/d burnt, 6 t/d to board mills, 18 t/d to PF resin market • Year 6+: 6 t/d to board mills, 24 t/d to PF resin market 		
Early market positioning	Ligno 90•PF	Same as Base Case	Increase of lignin precipitation capacity to 90 t/d <ul style="list-style-type: none"> • Year 5: 6 t/d burnt, 6 t/d to board mills, 48 t/d to PF resin market • Year 6: 6 t/d to board mills, 84 t/d to PF resin market 	
Group 1: Improve mill competitive position	Ligno 90•PF PU		Same as Ligno 90•PF, excepting <ul style="list-style-type: none"> • Year 5: 33 t/d to PF resins, 15 t/d to PU foams • Year 6: 54 t/d to PF resins, 30 t/d to PU foams 	
	Ligno 90•PF CFs		Same as Ligno 90•PF, excepting <ul style="list-style-type: none"> • Year 5: 33 t/d to PF resins, 15 t/d to Carbon fibers • Year 6: 54 t/d to PF resins, 30 t/d to Carbon fibers 	
	Resin 90		Same as Ligno 90•PF	Acquisition of a resin producer <ul style="list-style-type: none"> • Year 10: 290 t/d of resin produced • Year 11: 435 t/d of resin produced
Group 2: Larger-scale revenue diversification	Ligno 90 + SP•PF		Same as Ligno 90•PF + Solvent pulping demo plant ¹	Increase of solvent pulping to full capacity ²
	Ligno 90 + SP•PF PU		Same as Ligno 90 + SP•PF, excepting lignin distribution: 6 t/d to board mills, 220 t/d to PF resins, 124 t/d to PU foams	
	Ligno 90 + SP•PF CFs		Same as Ligno 90 + SP•PF, excepting lignin distribution: 6 t/d to board mills, 220 t/d to PF resins, 124 t/d to Carbon fibers	

¹ The demo plant extracts 9 bdmt/day of lignin from 50 bdmt/day of hardwood.

² There is a capacity ramp-up of the full-scale plant from Year 10-12 resulting in 220, 270, and 350 bdmt/day of lignin extracted.

Table 1 - Summary of lignin-based biorefinery strategies and phased implementation

ANALYSIS METHODOLOGY

Information relative to mass and energy balances for the design of processes associated with the lignin-based biorefinery strategies was collected from the literature. A large-block analysis approach [35] was employed to obtain capital and operating costs estimates for each implementation phase of each strategy.

Techno-Economic Analysis

Considering retrofit implementation, the specifics of the case study host mill were taken into account for integration potential. This analysis emphasized the materials handling system, the inventory of unused equipment, the energy island and the wastewater treatment plant - with the purpose of (1) identifying technology risks and additional costs for their mitigation, as well as (2) the potential for cost reduction resulting from synergies with the existing process.

In order to determine realistic values for capital expenses, capital costs were first estimated considering information in the literature on comparable processes, in a manner consistent with Diffo Téguia et al [34]. Equipment with similar functions were identified, then data were scaled up to the case study design capacities and actualized using proper cost index factors. Common design heuristics were used to extrapolate components of direct and indirect capital costs for the integrated precipitation units, while the Lang method was employed for the case of stand-alone solvent pulping plants. Design heuristics were also employed for estimating fixed components of operating costs.

The basis for feed material costs and product prices involved making projections over the period of the project lifetime. Correlations were made between historical feed costs or product prices, and energy commodities (crude oil, natural gas, and/or electricity). Average, minimum and maximum values of projections for energy commodities in reports from the International Energy Agency (IEA) [36] and the U.S. Energy Information Administration (EIA) [37] were used to extrapolate to future values for feed materials and products. For materials not directly linked to energy commodities, only historical values were used as the main basis for pricing. Table 2 summarizes feed material unit costs and Table 3 summarizes product prices considered in this study.

Feed Material	Assumed Unit cost (\$/tonne)		Basis for Assumed Cost
	Nominal	Maximum	
Phenol	1 005	1 905	Correlation identified with the price of crude oil.
Sulfuric acid	180	240	Pricing based on historical trends dictated by phosphate fertilizers and copper industries.
Carbon dioxide	300	390	Case-specific values.
Oxygen	50	65	
Caustic	430	810	Correlation identified with the price of crude oil.
Enzymes	2 270	2 500	Latest available price in literature. A 5% increase was considered for the maximum, as prices are expected to considerably decrease with more economical technologies.
Yeast	1 875	2 060	
Biomass	100 (dry)	127 (dry)	30% of the delivery costs were attributed to transportation, which was assumed to be varying with crude oil.
Formaldehyde	210	400	Formaldehyde is produced on-site. Methanol represents around 80% of production costs, and its price is correlated to both crude oil and natural gas.
Electricity	7.9 ¢/kWh	14.8 ¢/kWh	Values adjusted to mill location based on historical trends.
Natural gas	4.35 \$/GJ	7.15 \$/GJ	

Table 2 - Assumed unit costs for feed materials to process

Product	Assumed Market Price (\$/tonne)		Basis for Assumed Price
	Nominal	Minimum	
Phenol	1 005	690	Correlation identified with the price of crude oil.
Polyols	2 970	2 035	Correlation identified with the price of propylene, which is conjointly influenced by prices of crude oil and natural gas.
PAN	2 480	1 700	Based on target carbon fiber prices between 5-7 \$/lb. Minimum value based on variations of acrylonitrile, therefore of propylene.
PF resin	2 000	1 485	Average price among different providers. Minimum value linked to variations of phenol and formaldehyde.
Sugar syrup	170	155	Molasses price in cattle industry-intensive U.S. states.
Isobutanol	3.08 \$/gal	2.11 \$/gal	Correlation identified with the price of propylene.

Table 3 - Assumed market prices for lignin-based biorefinery products

Conservative discounts have been considered for the first three years following the market launch of derivative lignin products. These were nominally set based on the maturity of the targeted application, at 10% for the replacement of PF resin, 20% for the replacement of phenol and polyols, and 30% for the replacement of PAN. For cash flow calculations, a 1-year construction period was assumed for capacity increase of the precipitation unit and for the solvent pulping demonstration plant, while a 2-year period was assumed for construction of the full-scale solvent pulping plant. In order to compare the impacts of each strategy, cash flow values were actualized to the year of the capacity increase occurring in Phase I of all strategies.

Definition of a Minimal and Necessary Set of Decision Criteria

For the purposes of the case study, a database of MCD panel criteria from many previous panels was considered. There were two criteria triage steps, (1) considering the pertinence of individual criteria, and (2) considering the family of criteria as a whole. In the first step, criteria judged not relevant, important, representative, or discriminative were screened [38]. The panel members judged the reliability of criteria based on information and assumptions used to calculate criteria metrics. The set of criteria resulting from the first step was then enhanced, by assessing that it formed a consistent set of criteria [33]. Certain criteria were combined into a single one to make a set of workable criteria for the panel - a maximum of 8.

A set of six criteria were identified in close collaboration with panel members, a majority being related to market risk and competitiveness. Table 4 below summarizes the criteria and their interpretations as established by the panel members.

Category	Criterion	Interpretation	Metric
Economic risk	Internal Rate of Return (IRR)	Measure of project profitability under normal market conditions , considering all phases of the biorefinery strategy. The hurdle rate was set at 20%, considering the risk level expected in Year 5 of the project.	Discount rate at which NPV ¹ equals zero. $NPV = \sum_{t=0}^{25} \frac{\text{Cash flow}_t}{(1 + IRR)^t} = 0$
	Cash Flow on Capital Employed (CFCE)	Ability to generate cash flows from the capital investment over the life of the project, and thereby to improve the value of the company by lowering its debt .	<ul style="list-style-type: none"> • Discount rate for future EBITs²: 20% • Discount rate for capital investments: 6% $CFCE = \frac{\sum \text{present value of future EBITs}}{\sum \text{present value of capital investments}}$
Market risk and competitiveness	Revenue Diversification (RD)	Potential to meet revenue growth targets from new bioproducts, over the revenue from the mill in its current situation. It Indicates an ability to mitigate market risk by being less dependent on pulp sales , due to a more diversified source of revenues .	RD = Importance of new revenues x Importance of new products
	Competitiveness on Production Costs (CPC)	Robustness of the biorefinery strategy relative to an aggressive price-cutting strategy from the competition , based on assumptions of a low-end production price for the competition.	$CPC = \frac{(\text{Total portfolio revenue})_{\text{minimum market prices}} - \text{Operating costs}}{(\text{Total portfolio revenue})_{\text{minimum market prices}}}$
	Resistance to Energy and Chemicals Market Uncertainty (RECMU)	Vulnerability of the strategy to production cost volatility due to the volatility of feed material costs (product transportation and logistics not included).	$RECMU = 1 - \frac{\text{Costs of (energy + chemicals)}}{\text{Total variable costs}}$
	Robustness to Poor Market Conditions (RPMC)	Ability to afford process operation under poor market conditions for a 6-month period, expressed by EBITDA ³ as a percentage of the capital investment.	$RPMC = \frac{(\text{monthly EBITDA under poor market conditions}) \times 6}{\text{Total capital costs}}$

¹ NPV: Net Present Value.

² EBIT: Earnings Before Interest and Tax.

³ EBITDA: Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization.

Table 4 - Summary of decision criteria used for decision-making panel

Decision-Making for the “Preferred” Lignin-Based Biorefinery Strategy

An MCDM panel method was employed for decision-making. Preferences regarding relative criteria importance (weights) were obtained through a pair-wise trade-off process between criteria with the one considered most important by panel members. Biorefinery strategies could then be compared based on their overall scores, which were calculated using a weighted sum as defined by Eq-1,

$$\text{Score}_{\text{candidate } j} = \sum_{i=1}^N W_i \times U_i(x_j) \quad (1)$$

where N is the number of criteria, W_i is the weight of criterion i, U_i is the utility function associated with criterion i, and x_j is the value obtained by evaluating biorefinery candidate j under criterion i.

RESULTS

Techno-Economic Estimates

The techno-economic analysis results are summarized in Table 5. The “company contribution” considers the joint venture approach used for the solvent pulping (SP) strategy.

Indicator		Ligno 90•PF	Ligno 90•PF PU	Ligno 90•PF CFs	Resin 90	Ligno 90 + SP•PF	Ligno 90 + SP•PF PU	Ligno 90 + SP•PF CFs
Lignin production capacity		90 t/d	90 t/d	90 t/d	90 t/d 435 t/d resin	350 t/d	350 t/d	350 t/d
Capital investment	Total project cost	32 M\$	33 M\$	39 M\$	146 M\$	432 M\$	438 M\$	436 M\$
	Company contribution					153 M\$	156 M\$	154 M\$
Annual operating costs (Phase II)	Total costs	6 M\$/y	7 M\$/y	7 M\$/y	104 M\$/y	123 M\$/y	127 M\$/y	126 M\$/y
	Company contribution					60 M\$/y	62 M\$/y	61 M\$/y
Annual revenues (Phase II)	Total revenues	21 M\$/y	41 M\$/y	36 M\$/y	287 M\$/y	222 M\$/y	305 M\$/y	284 M\$/y
	Company share					120 M\$/y	162 M\$/y	151 M\$/y
Annual EBITDA (Phase II)		15 M\$/y	34 M\$/y	29 M\$/y	183 M\$/y	60 M\$/y	100 M\$/y	90 M\$/y
NPV (Phases I and II combined)		17 M\$	70 M\$	49 M\$	164 M\$	6 M\$	50 M\$	37 M\$

Table 5 - Summary of techno-economic results

Although these techno-economic results are mill-specific, there is an order-of-magnitude difference between costs and revenues associated with integrated (Group 1) and larger-scale (Group 2) strategies. The Group 1 strategies require relatively low capital and operating expenses, but also generate lower annual revenues compared to larger-scale strategies. On the other hand, strategies in Group 2 rely on the availability of subsidies and economies-of-scale for attractive returns. Although they generate higher annual margins, the associated NPV's are lower than those of Group 1 strategies with similar lignin derivative products. Higher profitability could be expected if higher-value derivatives from cellulosic sugars were to be considered, however it was not the focus of this case study. The profitability of the Resin 90 strategy is impressive, but implies more economic uncertainties compared to other strategies.

Assessment of Decision Criteria

Decision-making for corporate transformation to a new product portfolio, such as the case for the lignin-based biorefinery, should not rely on profitability metrics alone. Technology and market risks are critical for this long-term diversification decision, and thus a more complete set of decision-making metrics was considered in the present study.

The values for the 6 decision-making criteria identified and defined in Table 4 are presented in Table 6.

Criterion	Ligno 90•PF	Ligno 90•PF PU	Ligno 90•PF CFs	Resin 90	Ligno 90 + SP•PF	Ligno 90 + SP•PF PU	Ligno 90 + SP•PF CFs
Internal Rate of Return (IRR)	31%	57%	43%	46%	21%	28%	26%
Cash Flow on Capital Employed (CFCE)	2.0	4.5	2.9	3.0	1.0	1.4	1.3
Revenue Diversification (RD)	2%	7%	7%	22%	29%	51%	48%
Competitiveness on Production Costs (CPC)	46%	65%	59%	58%	33%	45%	41%
Resistance to Energy and Chemicals Market Uncertainty (RECMU)	21%	30%	28%	14%	82%	83%	83%
Robustness to Poor Market Conditions (RPMC)	7%	22%	13%	4%	4%	11%	8%

Table 6 - Summary of the results of criteria evaluation

The two economic criteria (IRR and CFCE) display a similar trend, and strategies involving integrated processes are more profitable than those involving larger-scale processes. Group 2 strategies have a greater impact on revenue diversification, and are less vulnerable to fluctuations in energy and chemical costs. RPMC displays a unique profile, which makes a direct comparison between strategies of the two Groups less obvious. Considering the global picture, no candidate strategy results in criteria evaluation that are higher than all other candidates for the criteria considered. This justifies the need to allocate weights to criteria using MCDM panel, alongside other benefits of MCDM panels such as alignment of stakeholders.

MCDM Panel Outcome

IRR was selected by the panel as the most important criterion in the context of the case study, considering the importance of profitability for ensuring competitiveness of the overall site over the long-term. Panel members set the target value of IRR at 25%, and an ambitious value of 75% for the upper limit of the normalization range. The latter was justified by the need to encompass uncertainty of parameters that influence IRR, given especially uncertainty of data for Year 5 and beyond of the project timeline. Criteria weights and ranking that resulted from trade-off activities are summarized in Figure 3, and the overall scores obtained when combining the weights with normalized calculated outcomes for each strategy criteria are presented in Figure 4.

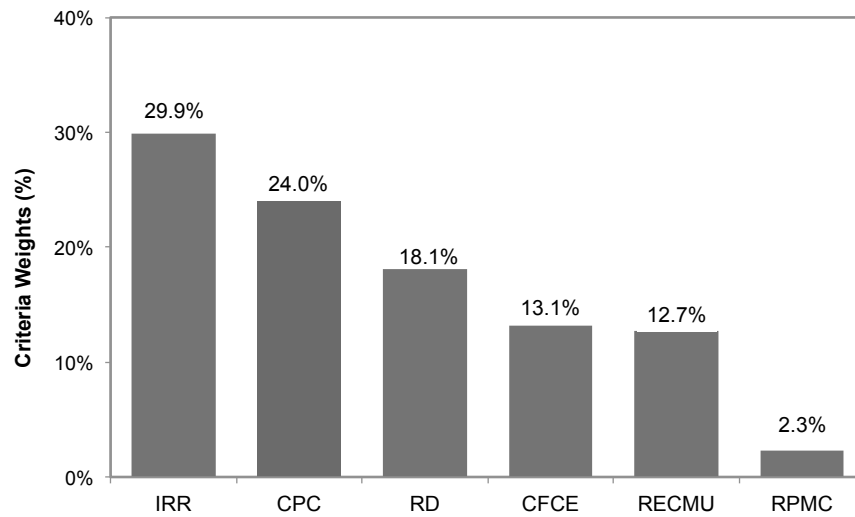


Fig. 3 - Criteria weights resulting from MCDM trade-off panel

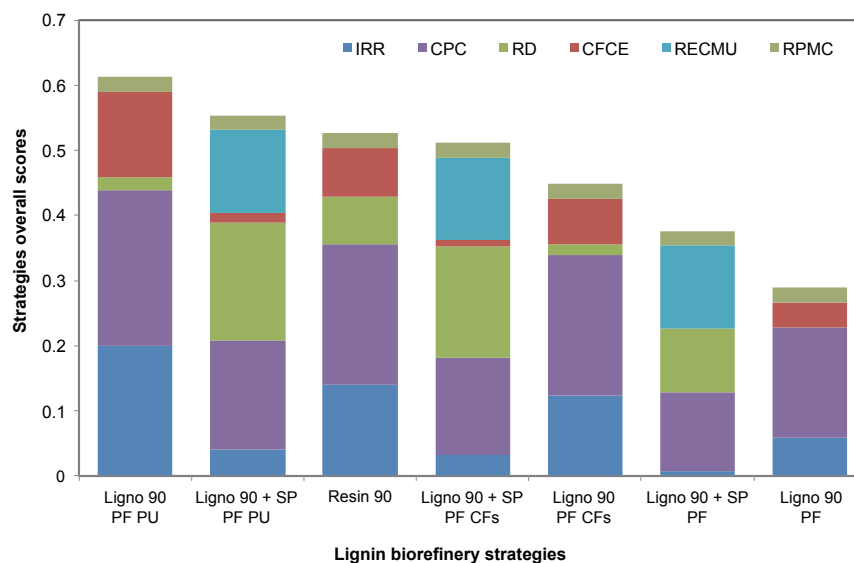


Fig. 4 - Scores for lignin-based biorefinery strategies resulting from the MCDM panel

After IRR, Competitiveness on Production Costs (CPC) was attributed the second highest weighting among the criteria, mainly due to the impact that pricing strategy has on the potential to penetrate and capture early market share. The relatively high weight of the Revenue Diversification (RD) criterion was linked with the objective of diversifying sources of revenues as part of the long-term vision of the forest product company. Cash Flow on Capital Employed (CFCE) and Resistance to Energy and Chemicals Market Uncertainty (RECMU) criteria received similar weights as indicators of profitability and robustness. Since all biorefinery strategies had positive margins under poor market conditions, panel members decided not to attribute Robustness to Poor Market Conditions (RPMC) a significant weight.

As per Figure 4, the application of criteria weights to the different biorefinery strategies did not lead to scores disparate enough so that they were easily distinguished. Criteria weights influenced strategies scores in diverse ways. Strategies involving integrated processes were preferred due their performance on economic indicators, while strategies involving larger-scale processes were preferred due to their diversification potential and robustness. The strategy Ligno 90•PF PU, ranked first, adequately combines economic and strategic advantages, being the best performer for IRR, CFCE, and CPC. Overall, strategies involving PU foams were more preferred than strategies using similar processes but promoting carbon fibre. The strategy Resin 90 also had an interesting position, with a profile distinct to other strategies of comparable scores.

Based on these results, the panel identified the top three strategies as “most preferred” for implementing the lignin-based biorefinery. The following two could eventually be reconsidered if market conditions become more favorable for their implementation. The last two candidate strategies were rejected.

DISCUSSION

A marginally profitable strategy is unlikely to be preferred. On the other hand, the IRR criterion weight is surprisingly low compared to others, due in large part to the upper bound of normalization set at 75% by the panel, ie high profitability expectations from a lignin-based biorefinery strategy by panel members.

CPC has an important impact for distinguishing between strategies, and is the most important contributor for five of seven strategies. Product pricing, which is dependent on both process economics and the comparability of lignin-derived with existing products, is a determining factor for the endorsement of the lignin-based biorefinery by forestry companies.

From the perspective of distinguishing between strategies, RPMC did not play a distinctive role, as all strategies had good performance. Or the assumptions of the study, the lignin-produced products from the mill have good potential to be cost-competitive compared to similar derivative products that use fossil-based feedstocks.

It is clear that the larger-volume strategies are preferred due to their more significant revenue growth, and their diversified product portfolio for mitigating price volatility. Combining the best two candidates, a forest product company could (1) increase its lignin precipitation capacity and diversify the targeted lignin applications including higher-value derivatives in the mid-term, prior to (2) implementing a larger-scale process such as solvent pulping leading to a diversified product portfolio to simultaneously improve its market position and its robustness.

Emphasizing vertical integration by entering into the resin-manufacturing segment was also a preferred lignin-based biorefinery strategy. The score of the Resin 90 strategy shows that it can potentially create unique competitive advantage for the forestry company. Because it can partially absorb unsold volumes of lignin or eventually lignin-based resin by using it in its own board mills, such a company has the opportunity to demonstrate the application, optimize the application, and clearly identify the value proposal for lignin-based phenolic resins.

Finally, the ranking and score of the Ligno 90•PF strategy demonstrates that minimal-risk strategies are unlikely to lead to a sustainable competitive position. Market demand is expected to increase as the usage of lignin derivatives for diverse applications gets mature, and a strategy relying solely on increasing the production capacity would be insufficient from a competitive point-of-view.

CONCLUSIONS

Recent progress towards the emergence of the lignin-based biorefinery motivated this study, which aims at the identification of promising strategies considering particularly the context of a retrofit implementation of the lignin-based biorefinery within a forest product company. This has been achieved through a case study considering seven candidate strategies for implementation at an existing kraft pulp mill where a 30 t/d lignin precipitation unit is already in place. Company-specific drivers and barriers led to retaining PF resins, PU foams, and carbon fiber applications as potential market segments for lignin positioning.

The assessment of candidate strategies was made using a set of economic and market criteria. Results showed that strategies involving integrated (lignin precipitation) processes were more profitable than those involving larger-scale (solvent pulping) processes, while the latter was more attractive in terms of revenue diversification, and were more robust to price volatility on energy and chemical markets.

Criteria weighting was made using a Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) panel, during which Internal Rate of Return (IRR) received the highest weight. Nevertheless, the criterion representing price competitiveness was the highest contributor to strategy scores. Price competitiveness relative to competing fossil-based products is expected to be critical to the development of lignin biorefinery, both for market penetration and positioning. The MCDM panel members identified that the top three lignin-based biorefinery strategies should be retained as “preferred”. The first-ranked strategy would sell lignin for PF resins and PU foams at a low volume and resulted in strong economic returns, cash flow generation and cost competitiveness. The second-ranked strategy considered the same applications for lignin but at a larger scale, and the third-ranked strategy considered on-site manufacturing of a lignin-based PF resin.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by a grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). The authors would like to thank the industrial partners in the project that provided data and contributed to validating assessment results, as well as panelists who participated in MCDM sessions.

REFERENCES

- [1] A. Ragauskas. "Lignin Overview". [Online].
http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas_art/technical_reviews/Lignin%20Overview.pdf
- [2] Y.-H. Zhang, "Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 35, no. 5, pp. 367–375, 2008.
- [3] C. Macdonald, "BIOREFINERIES COAST TO COAST", *Pulp & Paper Canada*, September/October, 2016.
- [4] L. Kouisni, A. Gagné, K. Maki, P. Holt-Hindle, and M. Paleologou, "LignoForce System for the Recovery of Lignin from Black Liquor: Feedstock Options, Odor Profile, and Product Characterization," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 4, pp. 5152-5159, 2016.
- [5] F. Öhman, H. Theliander, P. Tomani, and P. Axegard, "Method for separating lignin from black liquor," WO 2006/031175, March 23, 2006.
- [6] L. Kouisni and M. Paleologou, "Method for separating lignin from black liquor," US 2011/0297340, December 8, 2011.
- [7] V.B. Agbor, N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, and D.B. Levin, "Biomass pretreatment: Fundamentals toward application," *Biotechnology Advances*, vol. 29, no. 6, pp. 675-685, 2011.
- [8] J.E. Holladay, J.J. Bozell, J.F. White, and D. Johnson, "Top Value-Added Chemicals from Biomass Volume II—Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin," Oak Ridge (TN), 2007.
- [9] N. Smolarski. (2012) "High-Value Opportunities for Lignin: Unlocking its Potential". [Online]. <http://www.greenmaterials.fr/wp-content/uploads/2013/01/High-value-Opportunities-for-Lignin-Unlocking-its-Potential-Market-Insights.pdf>
- [10] LigniMatch. Future use of lignin in value added products. [Online].
http://www.gmv.chalmers.gu.se/digitalAssets/1448/1448662_roadmap.pdf
- [11] R. Gosselink, "Tomorrow's biorefineries in Europe - Future perspectives of organosolv lignins," in *Biocore*, Brussels, 2014.
- [12] M. Wang, M. Leitch, and C. Xu, "Synthesis of phenol–formaldehyde resol resins using organosolv pine lignins," *European Polymer Journal*, vol. 45, no. 12, pp. 3380–3388, 2009.
- [13] N.S. Çetin and N. Özmen, "Use of organosolv lignin in phenol–formaldehyde resins for particleboard production," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 22, no. 6, pp. 477-486, 2002.

- [14] Y. Matsushita, "Conversion of technical lignins to functional materials with retained polymeric properties," *Journal of Wood Science*, vol. 61, no. 3, pp. 230-250, 2015.
- [15] N. Mahmood, Z. Yuan, J. Schmidt, and C. Xu, "Preparation of bio-based rigid polyurethane foam using hydrolytically depolymerized Kraft lignin via direct replacement or oxypropylation," *European Polymer Journal*, vol. 68, pp. 1-9, 2015.
- [16] A.K. Naskar, "Developing Low Cost Carbon Fiber for Automotive Lightweight Composites," in *32nd Annual Meeting The Council for Chemical Research, MI*, 2011.
- [17] Y. Nordström, I. Norberg, E. Sjöholm, and R. Drougge, "A New Softening Agent for Melt Spinning of Softwood Kraft Lignin," *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 1274-1279, 2013.
- [18] J.F. Kadla et al., "Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications," *Carbon*, vol. 40, no. 15, pp. 2913-2920, 2002.
- [19] I. Norberg, "Carbon fibres from kraft lignin", Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012.
- [20] V. Chambost, J. McNutt, and P.R. Stuart, "Guided tour: Implementing the forest biorefinery (FBR) at existing pulp and paper mills," *Pulp and Paper Canada*, vol. 109(7- 8), pp. 19-27, 2008.
- [21] C. Diffo Téguia, V. Chambost, S. Sanaei, S. D'Amours, and P. Stuart, "Strategic Transformation of the Forest Industry Value Chain," in *Forest Value Chain Optimization and Sustainability*.: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016, pp. 33-74.
- [22] N.P. Archer and F. Ghasemzadeh, "An integrated framework for project portfolio selection," *International Journal of Project Management*, vol. 17, no. 4, pp. 207-216, 1999.
- [23] A.D. Henriksen and A.J. Traynor, "A Practical R&D Project-Selection Scoring Tool," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 46, no. 2, pp. 158-170, 1999.
- [24] C. Verbano and A. Nosella, "Addressing R&D investment decisions: a cross analysis of R&D project selection methods," *European Journal of Innovation Management*, vol. 13, no. 3, pp. 355-379, 2010.
- [25] H.J. Thamhain, "Assessing the Effectiveness of Quantitative and Qualitative Methods for R&D Project Proposal Evaluations," *Engineering Management Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 3-12, 2014.
- [26] M.A. Papalexandrou, P.A. Pilavachi, and A.I. Chatzimouratidis, "Evaluation of liquid bio-fuels using the Analytic Hierarchy Process," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 86, no. 5, pp. 360-374, 2008.
- [27] J.C. Sacramento-Rivero, "A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators," *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, vol. 6, pp. 32-44, 2012.

- [28] J.A. Posada et al., "Potential of bioethanol as a chemical building block for biorefineries: Preliminary sustainability assessment of 12 bioethanol-based products," *Bioresource Technology*, vol. 135, pp. 490-499, 2013.
- [29] S. Niekamp, U.R. Bharadwaj, J. Sadhukhan, and M.K. Chryssanthopoulos, "A multi-criteria decision support framework for sustainable asset management and challenges in its application," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 23-36, 2015.
- [30] P. Vincke, *Multicriteria decision aid*. New York: Wiley and Sons, 1992.
- [31] R.L. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*.: Cambridge University Press, 1993.
- [32] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica, 1985.
- [33] B. Roy and D. Bouyssou, *Aide multicritère à la décision: Méthodes et cas*. Paris: Economica, 1993.
- [34] C. Diffó Téguia, R. Albers, and P. Stuart, "Analysis of Economically Viable Lignin-Based Biorefinery Strategies Implemented within a Kraft Pulp Mill," *TAPPI Journal*, vol. xx, no. y, pp. z-z, 2017.
- [35] E. Hytönen and P. Stuart, "Integrating Bioethanol Production into an Integrated Kraft Pulp and Paper Mill: Techno-Economic Assessment," *Pulp and Paper Canada*, vol. 110, no. 5, pp. T58-T65, 2009.
- [36] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2015," 2015.
- [37] U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040," DOE/EIA-0383(2015), 2015.
- [38] D. Bouyssou, "Building Criteria: A Prerequisite for MCDA," in *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Berlin: Springer Verlag, 1990, pp. 58-80.

**ANNEXE C – Article 3: Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery
Strategies: Market Competitive Analysis for Business Model Development**

Cédric Dikko Téguia, Virginie Chambost, et Paul Stuart.

Article 3, soumis à *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*.

Abstract

Especially because of its high productivity compared to existing cereal crops and its ability to grow on marginal lands, resulting in non-competition with the food industry, triticale (*X Triticosecale Wittmack*) holds great promise as an industrial feedstock in agricultural biorefineries. Several potential business opportunities exist for triticale-based products; however, systematic approaches are needed for defining a sustainable business model that would lead to value creation, risk mitigation through robust market penetration strategies, product positioning over the long term, and maximization of competitive advantages in the biorefinery context. This study presents a competitive analysis of triticale-based product-process alternatives for the production of ethanol, polylactic acid (PLA), and thermo-plastic starch polymer blends (TPS/PLA) as the main products in 3 product platforms. As part of the analysis framework, we seek to identify a set of necessary and sufficient market-oriented criteria for multi-criteria decision-making (MCDM), prior to an overall sustainability assessment in which techno-economic and environmental criteria are considered as well.

From an initial set of “necessary and sufficient” competitiveness criteria, 3 “most-important” competitiveness criteria for the sustainability assessment of the PLA platform were identified including competitive access to biomass, competitiveness on production costs, and the potential to manage market price volatility. Certain key factors have been highlighted for each platform as an outcome of the competitiveness assessment, such as the impact of value-added co-products on the competitive position of commodity-based product portfolios, and the advantage of combining grain and straw process lines for specialty-based product portfolios leading to improved competitive potential.

Key words: Biorefinery, Triticale, Competitive Analysis, Business Model, Bioproducts Portfolio, MCDM.

1 INTRODUCTION

Triticale (*X Triticosecale* Wittmack) is being increasingly considered as a feedstock for biorefineries, mainly because of its growth rate and high starch content, its resistance to weeds, and its ability to grow on marginal lands.¹ It has relatively similar and in some cases improved properties compared to wheat, which is currently the largest cultivated crop in Alberta.² In this study, conventional and emerging processes that convert cereal crops to bio-products were considered for the triticale-based biorefinery. Many product-process combinations are therefore possible, and the choice of the “right” combination to implement is of crucial importance for the long-term success of the biorefinery.

Most studies to date have focused on evaluating possible alternatives using technically-oriented criteria such as technology maturity, technical barriers, product functionality, and potential for various chemical building blocks to produce a diverse range of derivatives.³ This approach, developed by the NREL (National Renewable Energy Laboratory), has been used to identify promising building block chemicals for the biorefinery⁴ and further adapted to evaluate the potential of lignin derivatives.⁵ Other studies have been carried out on product portfolio development for the forest biorefinery,^[6,7] using a market-driven approach which combines product and process design and MCDM (multi-criteria decision-making) based on the results of market, SWOT (strengths, weaknesses, opportunities, and threats), and competitive analyses.⁸ These systematic analyses, along with risk characterization, are essential for the development of a robust business model in order to increase the likelihood of successful implementation, especially over the longer-term.

The implementation of a triticale conversion process and the commercialization of the product portfolio must be supported by a sustainable business model. For this reason, environmental and techno-economic issues as well as market issues must be considered. From a market perspective, the strategy should enable long-term profitability considering a range of factors such as penetration of existing value chains, product distribution, customer relationships, value creation and capture, resources procurement, and partnerships.⁹ These require an appreciation of the market, market dynamics, and of the existing value chains for replacement and substitution opportunities. Replacement products (which have the same chemical composition as existing products, often fossil-based) and substitution products (which have different chemical

composition but similar functionality than the incumbent products) require well-defined value chain penetration strategies. An analysis of competitive factors thus plays a major role in the definition of successful business models. The classical approach defined by Porter outlines Five Forces that shape competition on the targeted markets: direct competitors, bargaining power of customers, bargaining power of suppliers, the threat of new entrants, and the threat of substitute products.¹⁰

In the context of this study, a greenfield implementation of a triticale-based biorefinery, the main challenges are related to (1) the value proposition to farmers who currently grow wheat and who must be persuaded to switch to triticale in order to secure large volumes of feedstock, (2) the determination of the best point of entry in existing value chains, and (3) the overall management of the product portfolio. The latter point is especially related to product portfolios that typically include commodity and specialty products that can be replacement, substitution or novel products. While replacement products are easily positioned on targeted markets, more challenges can be expected for penetrating existing market segments with substitution and novel products. From another perspective, the biorefinery strategy should seek to create competitive advantage out of this unique combination of various products. This might be achieved by designing for manufacturing flexibility and optimizing distribution chains, in order to manage price volatility considering that products targeting separate markets will have distinct price volatility cycles.¹¹

These critical issues highlight the need that biorefinery strategy necessarily consider competitiveness-related issues in a strategic manner. Furthermore, considering the sustainability context for which environmental and techno-economic factors should as well be taken into account, it is essential to identify the most important competitiveness criteria from a necessary and sufficient set for the overall sustainability assessment of the business model.

The objective of this work was thus to identify a set of competitiveness criteria to be used for assessing triticale-based biorefinery product portfolios, based on the greenfield implementation of three triticale-based product platforms including Ethanol, Polylactic Acid (PLA), and blends of Thermoplastic Starch and PLA (TPS/PLA).

Chambost *et al.*¹² has presented a practical methodology for identifying a set of decision criteria for the purpose of selecting the most promising product/process combinations in a triticale-based

biorefinery context. The competitiveness criteria identified in this study were subsequently integrated into the sustainability assessment of triticale product platforms.¹³

2 METHODOLOGY

2.1 Pathway to a necessary and sufficient set of competitiveness criteria

The methodology suggested in this paper and leading to the definition of a set of necessary criteria for the competitiveness assessment includes (1) the generation of candidate product portfolios as presented by Chambost *et al.*¹², (2) a thorough market analysis of each product in the product portfolio, and (3) the identification of major competitiveness issues that must be further addressed by specific criteria (Figure 1). As stated above, the identification of a small number of criteria that are critical for assessing competitiveness in a given context is achieved through MCDM.

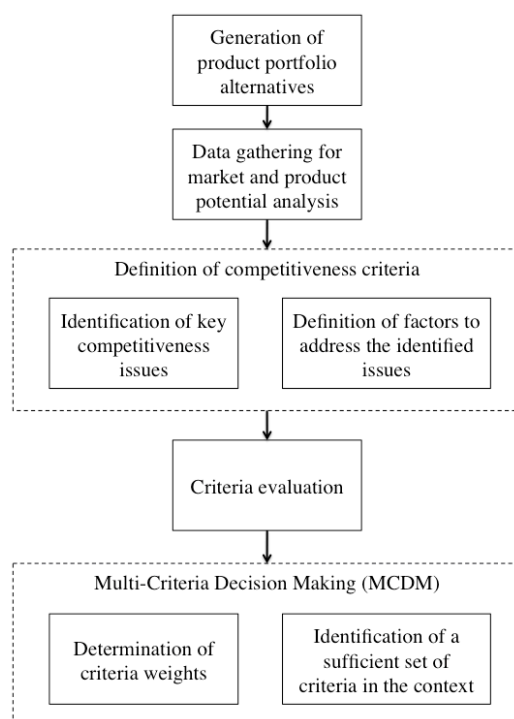


Figure 1: Overall Methodology for Key Competitiveness Criteria Identification

2.1.1 Market/product potential analysis

A clear understanding of market trends and dynamics for each product in the bioproduct portfolio, and the associated value chains, is necessary in order to identify the factors that influence competitive position. This understanding also assists in determining the potential

unique benefits from having a particular combination of products in portfolios. A critical analysis is needed regarding how each product may impact the overall competitiveness of the portfolio due to its volume, its nature (eg replacement, substitution or novel), and the type of market it is sent to (eg commodity or specialty). For example, estimates must be made for expected market prices (lower, upper and average values), current and projected product demand, existing producers on the value chain, and existing and emerging alternative products that can potentially compete for the same markets. The analysis of different points of entry on the value chain helps to determine the issues related to delivering the product through to the ultimate consumer, and the interactions between upstream and downstream actors.⁶ The right positioning on the value chain and the nature of collaboration will improve the likelihood for creating strong competitive advantage.

2.1.2 Definition of competitiveness criteria

A two-step procedure is employed here including (1) identifying key issues relative to Porter's Five Forces, and (2) determining criteria that address one or several of these issues, from which competitive advantage could potentially be created or reinforced to strengthen the business model.

Once key issues are identified, the challenge is to define relevant indicators that may provide a quantitative expression of the potential competitive advantage created or implied. Criteria should respect the following characteristics:

1. Each criterion should address **short-** and **long-term objectives** that support the development of the business model. In the short-term, the issue is to identify how the business model can be implemented, while over the longer term, it is to determine how competitive advantage can be retained. For example, regarding access to triticale biomass, the short-term objective concerns the creation of a value proposition to farmers in order to support the switch from wheat to triticale, while the longer-term objective is to secure access to feedstock in preference to competitors that could potentially compete for triticale feedstock. The short- and long-term objectives must be reflected in the formulation and the interpretation of the criteria metrics.

2. The criteria should be represented by appropriately-defined **metrics** that (a) use information available at early-stage design, and (2) facilitate interpretation. Our approach is to define *ideal* and *practical* definitions. The *ideal* definition assumes that even at the early stage, a complete set of perfect data are available for a model suitable to calculate the criterion. Normally, the *ideal* definition is constrained by its complexity, and the scarcity and reliability of data required for its calculation. A *practical* definition is therefore formulated as a proxy, to represent the associated issue. The quality of the practical definition depends on the assumptions that are made in its formulation.
3. At least some of the criteria should consider the **product portfolio**. For these criteria, metrics are typically calculated at the product level, then extrapolated to the portfolio level considering the influence of each product on the overall portfolio revenue, using the following formula:

$$\text{Portfolio score} = \frac{\sum_i (\text{revenue}_{\text{product } i} \times \text{score}_{\text{product } i})}{\text{Total portfolio revenue}} \quad (\text{Eq. 1})$$

4. In some cases, it might be more appropriate to combine two close or related factors into a single criterion. Weighting is generally used to express the relative importance of the sub-criteria in the criteria, eg 60%-20%-20% for three sub-criteria. Attributing sub-criteria weights implicates some level of subjectivity.

2.1.3 Multi-criteria decision making

Once criteria have been defined, they can be calculated for the competitiveness assessment. Using a panel format, criteria need to be interpreted and weighed relative to each other – in the context of the calculated result. Competitiveness is related to the aggregate of the products in the portfolio and to the target markets, and these differences should be reflected in the calculated criteria. As an example, raw materials are likely to be a major contributor to variable operating costs for portfolios containing a high content of commodity products, making the product portfolio highly dependent on feedstock delivery costs, while added-value specialty-based product portfolios might be more strongly impacted by the level of optimization in the supply chain for a smaller market size. MCDM panels are used to allocate weights to criteria, which when multiplied by the normalized criteria values, result in aggregated scores that are representative of the competitive potential in the context under consideration.¹⁴

MCDM panel objective in this study was to reduce the initial set of competitiveness criteria to a smaller set (of 2 or 3) containing only those criteria that are most important to address the market competitiveness pillar in the overall sustainability assessment.

2.2 Case Study

Three triticale-based product platforms were considered, which consisted of a set of processes assembled together for the purpose of producing mainly (a) ethanol, (b) PLA, and (c) TPS/PLA blends. The design capacities were respectively 40 MM gallon of ethanol, 100,000 tonnes of PLA and 75,000 tonnes of TPS/PLA blends, per year of production. Each triticale platform was comprised of a minimum-risk base case (Figure 2) and process variants in which increasing technology risk is implicated.¹² All the alternatives of the case study can be characterized by the integrated usage of triticale grain and straw in the process lines. For the TPS/PLA platform and its Alternative 1, grain and straw are converted in parallel process lines, however the fundamental vision of using both grain and straw results in a diversified set of product portfolios compared to conventional processes. For the ethanol production platform, the base case is based on the Husky process for the grain line, while straw is gasified. Besides ethanol, a mix of higher alcohols and DDGS are also produced.¹⁵ In the case of PLA, the minimum risk base case grain line is based on the NatureWorks process,¹⁶⁻¹⁸ while the straw line consists of a pre-treatment with lime followed by a simultaneous saccharification and co-fermentation, before the stream is coupled to the grain line. This configuration results in the production of PLA, succinic acid and DDGS. Finally, TPS/PLA blends and a composite made of triticale pellets and polypropylene are obtained, using dry milling, extrusion and pelletizing units.¹⁹ Most of the processes include a CHP unit resulting in the production of electricity. Table 1 summarizes the main process changes between the variants and the base cases for each triticale platform, as well as the impacts of those changes on the associated product portfolio. Products that are common to all the alternatives within each platform are: (a) ethanol and electricity on the ethanol platform, (b) PLA, electricity and succinic acid on the PLA platform, and (c) TPS/PLA blends and bran on the TPS/PLA platform.

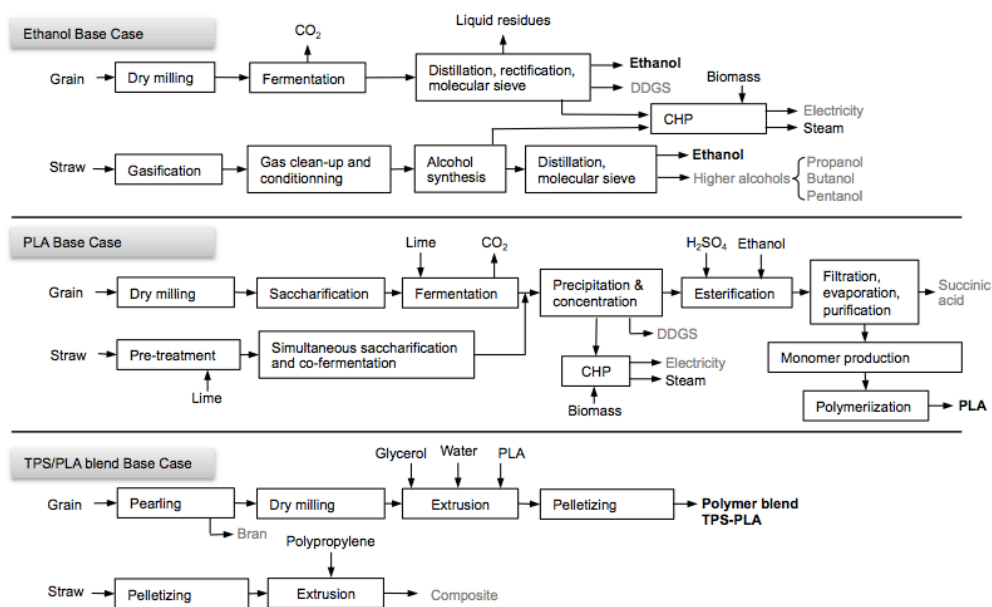


Figure 2: Block flow diagrams of the ethanol, PLA, and TPS/PLA blend “minimum technology risk” base cases.

Table 1: Overview of process alternatives and comparison with the base case (BC)

Alt.	Change in Process			Contribution of Products to Product portfolio*		
	Ethanol	PLA	TPS/PLA	Ethanol	PLA	TPS/PLA
BC	—	—	—	Ethanol (74) Electricity (13) Alcohol (4) DDGS (9)	PLA (90) Electricity (2) Succinic acid (3) DDGS (5)	TPS/PLA (65) Bran (1) Biocomposite (1)
1	All straw sent to CHP unit			Ethanol (54) Electricity (30) DDGS (16)	PLA (77) Electricity (15) Succinic acid (3) DDGS (5)	TPS/PLA (93) Bran Electricity (7)
2	Wet milling on grain line			Ethanol (74) Electricity (14) Alcohol (4) Millfeed (4) Protein (4)	PLA (86) Electricity (7) Succinic acid (3) Millfeed (3) Protein (1)	TPS/PLA (60) Bran Biocomposite (39) Millfeed Protein (1)
3	Pre-treatment of straw by PLPW, ²⁰ followed by SSCF ²¹	Ultrafiltration + electrodialysis ²²	Mechanical pulping on straw line	Ethanol (24) Electricity (4) DDGS (5) Xylitol (67)	PLA (85) Electricity (7) Succinic acid (3) DDGS (4) Acetic acid (1)	TPS/PLA (63) Bran Biocomposite (28) Electricity (9)
4	Pervaporation and molecular sieve for separation on grain line	SSCF on grain line ²¹	—	Ethanol (73) Electricity (13) Alcohol (4) DDGS (10)	PLA (85) Electricity (7) Succinic acid (3) DDGS (5)	—
5	Pearling unit added before grain milling		—	Ethanol (74) Electricity (12) Alcohol (4) Stillage (8) Bran (2)	PLA (87) Electricity (7) Succinic acid (3) Stillage (2) Bran (1)	—

*Numbers in brackets represent the contribution (%) of the product to the overall portfolio revenue:

$$\text{Contribution}_{\text{product } i} = \frac{\text{volume}_{\text{product } i} \times \text{price}_{\text{product } i}}{\text{Total portfolio revenue}} \quad (\text{Eq. 2})$$

2.3 The defined set of competitiveness criteria

Based on competitiveness-related issues and taking a value chain perspective (Table 2), a set of five criteria were defined (Table 3) as per the methodological framework. Under “Justification” in Table 2, points (1) and (2) represent short- and long-term objectives respectively, for each criterion.

Table 2: Key competitiveness issues and associated criteria that were attributed

Competitiveness issue	Criteria	Justification for competitiveness
Is there a long-term biomass strategy in place?	Competitive Access to Biomass (CAB)	Potential (1) to provide a competitive value proposal to farmers, and (2) to secure economically-viable long-term access to triticale feedstock
Is there a potential to procure a competitive position on the market, and maintain this over the long-term?	Product Portfolio Positioning (PPP)	Potential (1) to capture market share on existing markets, and (2) to implement first-to-market strategy on growing future markets
Do production costs provide competitive advantages?	Competitiveness on Production Costs (CPC)	Potential (1) to compete on a market-price basis, and (2) to have the margins needed for mitigating price volatility
Is there a potential to remain competitive considering market price volatility?	Margins under Price Volatility (MPV)	Potential (1) to survive under unfavorable market conditions, and (2) to create margins over the long term
Is there a clear and incremental technology strategy that serves the business strategy?	Technology strategy related to market competitiveness (TECH)	Potential (1) to face short-term capital investment constraints, and (2) to easily adapt the strategy when required in later implementation phases

Table 3: Definitions of the competitiveness criteria

Criteria	Ideal definition	Practical definition	Metric
Competitive Access to Biomass (CAB)	Calculate delivery costs and margins on secured triticale biomass based on its availability (quantity and quality) in the plant area, and terms of potential supply agreements	Calculate margins on delivered biomass based on delivery cost estimates provided by Melendez <i>et al.</i> ²³	EBITDA per tonne of purchased biomass
Product Portfolio Positioning (PPP)	Evaluate market share relative to the market leader, and assess the potential for each co-product to capture market share on growing green markets over the next 5-10 years, considering a potential premium on market prices	Evaluate (1) short-term market penetration potential via potential market share, and (2) the potential for longer-term margin creation via green co-products sale	60% market penetration potential + 40% margin creation potential
Competitiveness on Production Costs (CPC)	Compare the production cost with those resulting from minimum risk, Best Available Technology on the market	Evaluate the relative difference between production costs and a benchmark defined among competitors	Difference (%) between biorefinery production costs and defined benchmark
Margins under Price Volatility (MPV)	Evaluate best and worst case EBITDAs by extrapolating data of market volatility over the past 3 to 5 years	Evaluate potential to survive under volatile market conditions considering (a) worst case EBITDA, and (b) offsetting this via the volatility via best case EBITDA	60% worst-case EBITDA + 40% best-case EBITDA
Technology strategy related to market competitiveness (TECH)	Assess the possibility to implement the business strategy using a phased implementation approach, and evaluate the feasibility of each phase	Assess the potential to divide the implementation of the business strategy into two business phases, and the potential to easily switch from the “starting” phase, to the “complete” project	60% phase implementation potential + 40% process flexibility potential

3 RESULTS

3.1 Results of the competitiveness assessment

The criteria assessment was made mainly based (1) on mass balances presented by Chambost *et al.*,¹² (2) on the biomass delivery cost model introduced by Melendez *et al.*,²³ and (3) using operating costs presented by Sanaei *et al.*²⁴ Product market prices were collected over the last two years preceding the study, taking into account the lowest value for determining the worst case EBITDA and the average value for ‘normal’ market conditions. Thus, 1.51 CAD/gal and 2.09 CAD/gal were used for ethanol, 1755 CAD/t and 2160 CAD/t for PLA, and 1890 CAD/t and 2970 CAD/t for TPS/PLA blends. A benchmark for ethanol production costs was estimated at 624 CAD/t, based on annual results shared by existing publicly-traded cereal-based ethanol producers (Husky,²⁵ Suncor²⁶). For other platforms, production cost benchmarks of 1 469 CAD/t for PLA and 2 465 CAD/t for TPS/PLA blends were estimated based on operating margins of 32% and 17% respectively.²⁷ Table 4 shows the values for the criteria, for all the alternatives of the three triticale platforms.

Table 4: Results of the competitiveness criteria assessment

Platform	Alt.	Criteria				
		CAB (\$/t)	PPP (0 to 1)	CPC (%)	MPV (10 ⁶ \$)	TECH (0 to 1)
Ethanol	Base	108.27	0.59	-8%	44.2	0.7
	1	11.32	0.65	92%	2.8	0.4
	2	92.21	0.59	-2%	38.3	1.0
	3	398.86	0.39	38%	267.7	0.5
	4	60.11	0.59	18%	21.8	0.5
	5	93.05	0.59	-4%	41.7	0.7
PLA	Base	248.11	0.68	-38%	140.0	1.0
	1	208.46	0.69	-28%	163.9	0.7
	2	259.44	0.69	-38%	150.6	1.0
	3	308.59	0.68	-47%	166.7	0.8
	4	277.28	0.68	-43%	160.6	0.8
	5	246.35	0.69	-38%	146.9	1.0
TPS/PLA	Base	1 205.52	0.65	43%	57.6	0.4
	1	244.43	0.60	-13%	61.7	0.4
	2	801.45	0.76	66%	43.8	0.7
	3	283.58	0.65	50%	58.8	0.7

For the two criteria in which margins are involved in the calculations, CAB and MPV, it is not surprising that the commodity-based platform resulted in lower performance than the others. Assuming a grain market price of 145 CAD/t, margins on the ethanol platform appear to be relatively low (11.32 CAD/t to 108.27 CAD/t, except Alternative 3), compared to the other platforms (208.46 CAD/t to 308.59 CAD/t for the PLA platform, and 244.43 CAD/t to 1 205.52 CAD/t for the TPS/PLA platform). Moreover, the potential to survive considering market price volatility is lower for ethanol platform alternatives. Only Alternative 3 is attractive compared to specialty-based alternatives, and even achieves better performance than some of them. This observation illustrates the expected competitive advantage resulting from the design of a product portfolio that includes value-added co-products and accepts higher technology risks.

The analysis of the CAB and MPV criteria also highlights the potential of alternatives on the PLA platform, especially in the face of market price volatility. This is justified by the presence of multiple specialty products in their portfolios, and the importance of these products in terms of revenues and margins creation. Finally, major differences can be noticed on the TPS/PLA platform between the EBITDA per tonne of biomass for the Base Case and Alternative 2 (1,205 CAD/t and 801 CAD/t) on one hand, and Alternatives 1 and 3 (244 CAD/t and 284 CAD/t) on the other. This gap is due mainly to the presence or absence of a CHP unit. The base case and Alternative 2 have a favourable balance compared to other alternatives on the platform because of the large savings they realize by not purchasing extra biomass for the CHP unit. This observation leads to the conclusion that for lower-volume triticale strategies delivering to added-value markets, energy self-sufficiency is not necessarily an advantage. Using another perspective, it illustrates the importance of premium prices for green electricity to encourage cogeneration based on renewable feedstocks for integrated biorefineries.

All the product portfolios within a given platform achieve similar performance in terms of market positioning. For example, although xylitol could have a positive impact on revenues, this is mitigated by the variability in its demand and the emergence of other sweeteners on the market, resulting in a poor score on competitive positioning.

The combination of triticale grain and straw lines into a single process appears to be a winning strategy for the PLA triticale platform; all alternatives have lower production costs than the benchmark. In contrast for the ethanol platform, the base case and Alternatives 2 and 5 offer

good competitive potential, while only Alternative 1 on the TPS/PLA platform offers interesting potential. These scenarios present lower production costs than their respective benchmarks and higher flexibility, than other alternatives on the same triticale platform. Energy management in particular appears to be a critical issue for the TPS/PLA platform. Alternative 1, which is energy self-sufficient, is the only alternative with lower production costs than the benchmark, but is also the least profitable alternative due to the absence of valuable co-products.

It can be noticed that for a given criterion, alternatives present large variations in performance from one platform to another, and there is no evident trend among platforms (for example, alternatives on the ethanol platform having the lowest performance on all criteria, or alternatives on the PLA platform being the best on the whole set of criteria). This observation supports the unique values and interpretations of the criteria in different product platform contexts, and the need to use a tool such as MCDM to attribute relative weights to criteria.

3.2 Outcomes of the MCDM activities

Through the MCDM panel process, the potential for further improving the defined set of criteria was assessed. It included (1) parameters that take into account the quality and seasonality of biomass for the procurement cost model, (2) accuracy of market penetration sub-scores that link potential market share with the type of end-market, i.e. commodity versus specialty, (3) uncertainty of occurrence of the worst and best case market price conditions, and (4) risks related to technology maturity and ease of switching from a business phase to another, in the phased implementation of the business plan. Two additional criteria for partnership potential and supply chain optimization were initially considered but screened out during the MCDM pre-panel, as no major differentiation was found in the results between alternatives of the same product platform. Figure 3 shows the distribution of criteria weights that was obtained in the context of the PLA triticale platform.

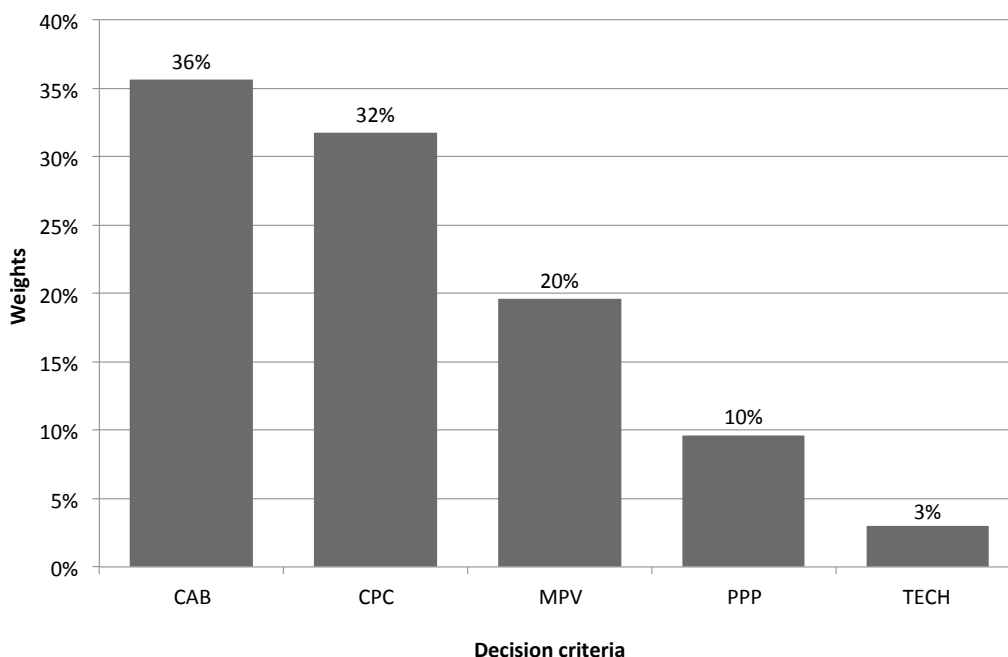


Figure 3: Criteria weights resulting from MCDM panel for the PLA triticale platform

Competitive access to biomass (CAB) was considered by the panel members as the main driver for competitiveness for the PLA triticale platform. All alternatives could provide strong margins, and thus securing access to biomass and offering an attractive value proposal to farmers was considered crucial for the success of a triticale-based biorefinery business model. Competitiveness on production costs (CPC) was considered almost as important due to its impact on pricing strategies, market penetration potential, and overall economic competitive positioning. Potential to create margins under price volatility (MPV) was attributed a relatively high weight due to its impact on the robustness of the business plan over both the short- and longer-terms. The criterion related to market positioning (PP) was considered not necessary by panel members, since all the alternatives had a scores between 0.68 and 0.69 over 1 (see Table 4). For similar reasons and also because it did not consider risks relative to technology maturity, the criterion on technology strategy (TECH) obtained the lowest weight. Considering the set of criteria defined, CAB, CPC and MPV were selected as “important” for addressing the market competitiveness aspect in the overall sustainability assessment.¹³ As the three criteria consider the long-term access to biomass, value proposition to farmers, market penetration, pricing strategies and robustness to volatility - decision-makers on the panel considered the set exhaustive enough in regards to competitiveness-related issues in the context of the PLA platform.

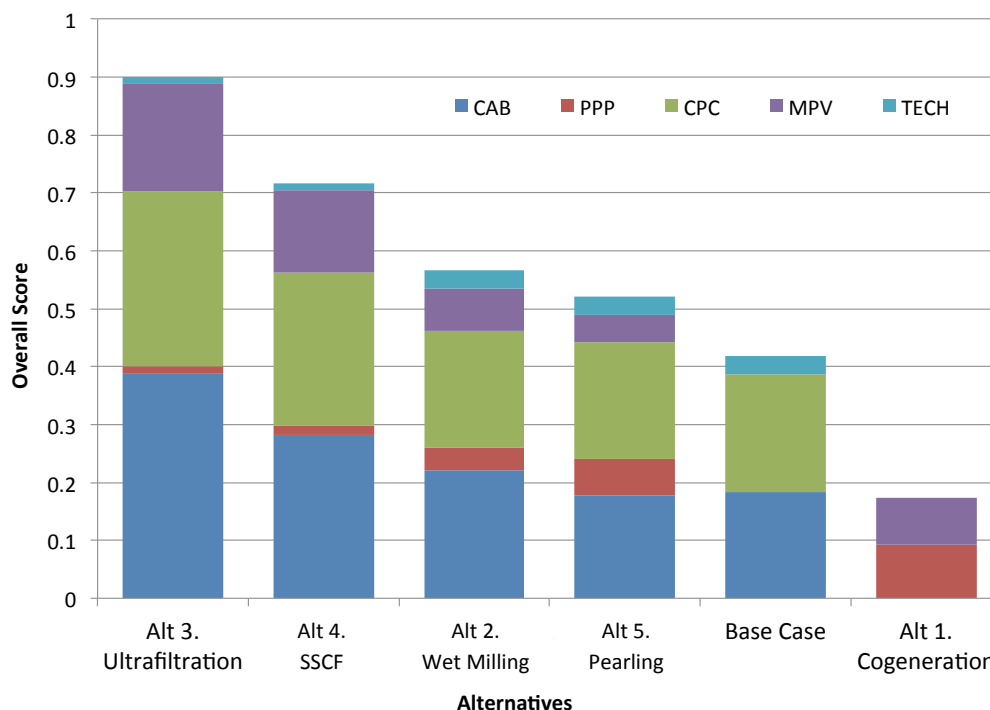


Figure 4: Ranking of alternatives on the PLA triticale platform

Figure 4 shows the ranking of the alternatives based on the competitiveness criterion weights resulting from the MCDM panel. Alternative 3, which includes ultra-filtration and electro-dialysis as the separation technology, appears to offer the most interesting competitive position. Besides consuming the lowest amount of biomass, this option also results in the production of an additional added-value product than the other alternatives, i.e., acetic acid, which results in high margins and lower production costs. Simultaneous saccharification and fermentation was preferred relative to the conventional sequential process, since it requires lower amounts of biomass (excluding CHP) and consumes less energy. Competitive product-process combinations are more likely to include more added-value chemicals, while commodities such as products for the animal feed industry (protein in Alt. 2 and bran in Alt. 5) do not provide substantial advantages compared to the base case.

Procuring straw for electricity production implies the purchase of significantly higher amounts of biomass to fulfill the energy requirements of the grain line. This strategy does not help achieve competitiveness objectives because a balance must be found between the revenues coming from extra electricity sales and the cost of purchasing more biomass and other resources. For Alternative 1, although the amount of electricity sent to the grid (70 MW versus 30 MW for other alternatives) provides a good revenue stream, it is not enough to off-set the increase in production costs due to additional biomass requirements. The base case, that is the minimum risk process, is limited by a lower volume of co-products. Its portfolio is made up of the same products as in Alternatives 1 and 4, but results in the lowest revenue among the alternatives because of limited sales volume. Taking technology maturity and technology risk into consideration would certainly bring a new perspective to the rankings because of its impact on first-to-market potential and early capture of market shares in the face of competition – one of the issues to be addressed in the final MCDM where criteria of dissimilar types are considered alongside the 3 “important” competitiveness criteria.

4 CONCLUSIONS

In response to the need to develop sustainable business models and to make investment decisions about greenfield implementation of the triticale-based biorefinery, a set of five criteria were defined to assess the competitiveness of the possible product-process alternatives. An assessment of these 5 criteria was made considering the product portfolios from three triticale feedstock platforms built around ethanol, PLA, and TPS/PLA blends.

For the commodity-based product platform, the importance of implementing a product-process combination that includes value-added co-products and higher margins has been highlighted. From the perspective of competitiveness, margins are generally of critical importance, for example to enable attractive value propositions to farmers in order to secure access to biomass over the long term, as well as to provide robustness under volatile market price conditions. However, margins play a less important role in the context of specialty-based product platforms such as TPS/PLA. This platform considered the manufacture of value-added biocomposites, and their competitiveness appeared to be driven mainly by energy consumption and volatility management issues. The combined use of grain and straw on that platform made it necessary to compromise between energy requirements and the production of higher-value products; this

compromise affects several competitiveness factors, such as the potential to face volatility and the positioning of the product portfolio on the market.

MCDM was used to assign the relative weights to the criteria, from which overall competitiveness scores could be calculated for the alternatives on the PLA platform, and to identify a set of 3 “important” competitiveness criteria for a sustainability assessment. In this process, developing and securing access to biomass was identified as the most critical competitiveness factor for the implementation of the triticale-based biorefinery for PLA production. Due to its inclusion of value-chain analysis, market forces, and market risk identification, the competitiveness assessment procedure proposed in this paper appears to be a powerful tool for identifying elements that are important to assess the unique aspects of different business models, and to help investors in their decision-making.

Acknowledgments

This study was funded by the Canadian Triticale Biorefinery Initiative (CTBI), as well as by a grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). The authors would like to thank the CTBI Network researchers who helped with data collection and experts who contributed to the validation of criteria.

References

1. Beres BL, Harker KN, Clayton GW, Bremer E, Blackshaw RE and Graf RJ, Weed-Competitive Ability of Spring and Winter Cereals in the Northern Great Plains. *Weed Technol.* 2010; 2:108-16.
2. Alberta Agriculture and Rural Development. Agriculture Statistics Yearbook 2014. Edmonton; 2015. Report No.: ISBN 978-1-4601-2603-5.
3. Werpy T, Petersen G. Top Value Added Chemicals from Biomass Volume I—Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. Oak Ridge (TN); 2004.
4. Paster M, Pellegrino JL, Carole TM. Energetics, Inc. for the U.S. Department of Energy. Industrial Bioproducts: today and tomorrow. Columbia, MD; 2003.
5. Holladay JE, Bozell JJ, White JF, Johnson D. Top Value-Added Chemicals from Biomass Volume II—Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin. Oak Ridge (TN); 2007.
6. Chambost V, Stuart P. Product Portfolio Design for Forest Biorefinery Implementation at an Existing Pulp and Paper Mill. 7th Foundations of Computer-Aided Process Design (FOCAPD) Conference; 2009; Breckenridge, Colorado.
7. Mansoornejad B, Chambost V, Stuart P. Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Comput. Chem. Eng.* 2010; 34(9):1497–1506.
8. Chambost V, Stuart P. Selecting the Most Appropriate Products for the Forest Biorefinery. *Ind. Biotechnol.* 2007; 3(2):112-119.
9. Osterwalder A, Pigneur Y. Business Model Generation. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc.; 2010.
10. Porter ME. On Competition – Updated and Expanded Edition. Boston (MA): Harvard Business Review; 2008.
11. Chambost V, Mansoornejad B, Stuart P. The Role of Supply Chain Analysis in Market-Driven Product Portfolio Selection for the Forest Biorefinery, 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE21; 2011; Chalkidiki, Greece.
12. Chambost V, Janssen M, Stuart P. Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Investment Decision for Sustainable Biorefinery Business Models. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* (À soumettre à *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*)

13. Sanaei S, Stuart P. Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Sustainability Assessment Employing Multi Criteria Decision Making (MCDM) Tool. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* (Accepted for publication) DOI: 10.1002/bbb.1482, 2014.
14. Keeney RL, Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. Cambridge University Press; 1993.
15. Husky Energy Inc. Husky Energy. [Online]; 2016 [cited 2016 October 19. Available from: <http://www.huskyenergy.com/huskyproducts/canada.asp>.
16. Gruber P, Hall E, Kolstad J, Iwen M, Benson R, Borchardt R. Continuous process for the manufacture of a purified lactide from esters of lactic acid. USA; 1993. Patent No. 5247059.
17. Vink E, Rabago K, Glassner D, Gruber P. Application of life cycle assessment to NatureWorks polylactide (PLA) production. *Polym. Degrad. Stab.* 2003; 3:403-419.
18. Vink E, Glassner D, Kolstad J, Wooley R, O'Connor R. ORIGINAL RESEARCH: The eco-profiles for current and near-future NatureWorks polylactide (PLA) production. *Ind. Biotechnol.* 2007; 1:58-81.
19. Huneault M, Li H. Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends. *Polymer.* 2007; 1:270-280.
20. Pronyk C, Mazza G. Kinetic Modeling of Hemicellulose Hydrolysis from Triticale Straw in a Pressurized Low Polarity Water Flow-Trough Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010; 14:6567-6375.
21. Aden A, Ruth M, Ibsen K, Jechura J, Neeves K, Sheehan J, et al. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. Oak Ridge (TN): National Renewable Energy Laboratory and Harris Group; 2002 June. NREL/TP-510-32438.
22. Glassner D, Datta R, Process for production and purification of lactic acid. USA: Michigan Biotechnology Institute; 1990. Patent EP0393818.
23. Melendez J, Stuart P. Systematic Assessment of Triticale based Biorefinery Strategies: A Biomass Procurement Strategy for Economic Success. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* DOI:10.1002/bbb.1568, 2015.
24. Sanaei S and Stuart P, Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Techno-economic Analysis to Identify Investment opportunities. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* (Accepté pour publication) DOI: 10.1002/bbb.1499, 2014.

25. Husky Energy Inc. Husky Energy. [Online]; 2016 [cited 2016 October 19. Available from: <http://www.huskyenergy.com/investorrelations/annualreports.asp>
26. Suncor Energy Inc. Suncor Energy. [Online]; 2016 [cited 2016 October 19. Available from: <http://www.suncor.com/investor-center/financial-reports/annual-disclosure>
27. Shen L, Haufe J, Patel MK. Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009. Utrecht University; 2009.

ANNEXE D – Article 4: Adapting Stage-and-Gate Methodology for Retrofit Implementation of the Forest Biorefinery

Cédric Dikko Téguia, Sophie D'Amours, et Paul Stuart

Article 4, soumis à *European Journal of Innovation Management*.

Abstract

This paper relates to the context of the transforming forest products industry. In light of several driving forces but especially a decline in the demand for several large paper segments such as newsprint and printing and writing papers, the sector has begun to implement product diversification strategies and especially those that are commonly referred to as the “biorefinery”. As forest product companies exploring diverse options for their transformation, they face non-obvious choices in reasons of the unique technical, economic and business uncertainties and risks associated with each possible products-process combination; besides, there are an innumerable number of combinations to consider. The paper introduces a product design methodology suitable to guide forest products companies towards the early-stage identification of its preferred biorefinery strategies.

The methodology follows a phase-gate format and corresponds to an adaptation of the front-end section of the typical second-generation stage-and-gate process to specifics of biorefinery development. It includes the systematic consideration of phased-implementation approaches for mitigating risks associated with biorefinery alternatives, and incorporates Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods for the establishment of preferences between alternatives. A two-gate two-stage framework is suggested in which showstopper criteria largely derived from the company’s drivers and barriers are used at the first gate to reduce the set of possible options to a manageable number, which is further evaluated using a multidisciplinary set of criteria representing the potential for risk mitigation and value creation associated with each retained alternative. The case study of the retrofit implementation of a lignin-based biorefinery within a pulp and paper company is used in this paper for illustrating the methodology.

Keywords

Biorefinery, Product design, New product development, Stage-and-gate, MCDM, Product portfolio, Lignin

INTRODUCTION

Being able to adapt to its environment in order to survive is a *Darwinian* theory that applies as much to industrial companies as to living species. Further, innovation is an essential in almost all sectors of the industry, as relying on surviving strategies might fail to ensure a sustainable competitive position. The pulp and paper sector in the northern hemisphere is a perfect scene to observe these facts. The evolution of Information Technologies and associated changes in social behavior have caused the demand for paper-related products to considerably decrease in the last decade [1], besides a combination of factors including high biomass and energy costs that have altered their leadership position compared with emerging countries [2]. As cost reduction strategies have shown to have a limited impact, a more profound transformation of forest products companies' business model, including product diversification through biorefinery implementation, is necessary to sustainably improve their competitiveness [3].

With product diversification comes numerous uncertainties and challenges. One of them consists in identifying the right biorefinery product(s) to add to their portfolio, which in fact is not dissociable from the selection of new technologies to implement. On one side companies need to consider technologies that are more or less mature, only a few being proven at commercial scale. On the product side, they need to achieve bio-products that technically at least as good as existing products on targeted markets, while remaining price-competitive. Further, business risk is considerable as such transformation requires the penetration of non-traditional markets, which is conditioned by their ability to create partnerships on related products value chains [4]. Thus, there is a multitude of biorefinery products-process combinations, and with each are associated with specific risks that must be considered in their evaluation.

Forest product companies need to make several non-obvious choices along the biorefinery development process. Considering how impactful early stage decisions can be on both the short- and longer-term outcome of the strategic transformation, there is a crucial need for them to consider a systematic approach to guide their efforts. The purpose of this paper is to introduce a methodological framework to guide forest product companies towards the identification of their preferred biorefinery strategies, considering risk mitigation and value creation from diverse perspectives. The case study of the retrofit implementation of a lignin-based biorefinery within a pulp and paper company is taken to illustrate the approach.

BUSINESS TRANSFORMATION THROUGH BIOREFINERY IMPLEMENTATION

Implementing a biorefinery implies more than treating additional volumes of biomass or constructing a new plant. The integration of new products within a forestry company portfolio requires a more profound remodeling of its business model, related to the need to penetrate markets outside of its core business sector. Besides, the conversion of wood biomass generally results in multiple products rather than a single one, which makes the selection of product opportunities non-obvious and inseparable from the selection of the manufacturing process. With each products-process combination are associated specific technical and market risks that must be identified and, more importantly, mitigated within the definition of the transformation strategy. Chambost et al. [5] suggest a generic risk mitigation approach in response to that problematic, which consists in determining the long-term vision for the biorefinery initiative in term of product portfolio and then defining near-term and mid-term strategic phases that would address specific sources of risk. Rather than focusing on a static composition of the portfolio, the strategy would evolve from a low-risk to a higher-risk (and higher revenues) variant of it, in association with a complementary evolution of the technology. That approach has been further used by Mansoornejad et al. [6] to combine product portfolio and supply chain designs in a forest biorefinery context and by Jaaidi et al. [7] for the techno-economic assessment of various biorefinery options to be implemented into mechanical pulp mills. Diffo Tégua et al. [8] presented an extended version of that approach, highlighting key drivers for the definition of the business model, as well as the evolution of its components within time considering a business disruption occurring at the corporate level and a technology disruption that results in changes at the mill level.

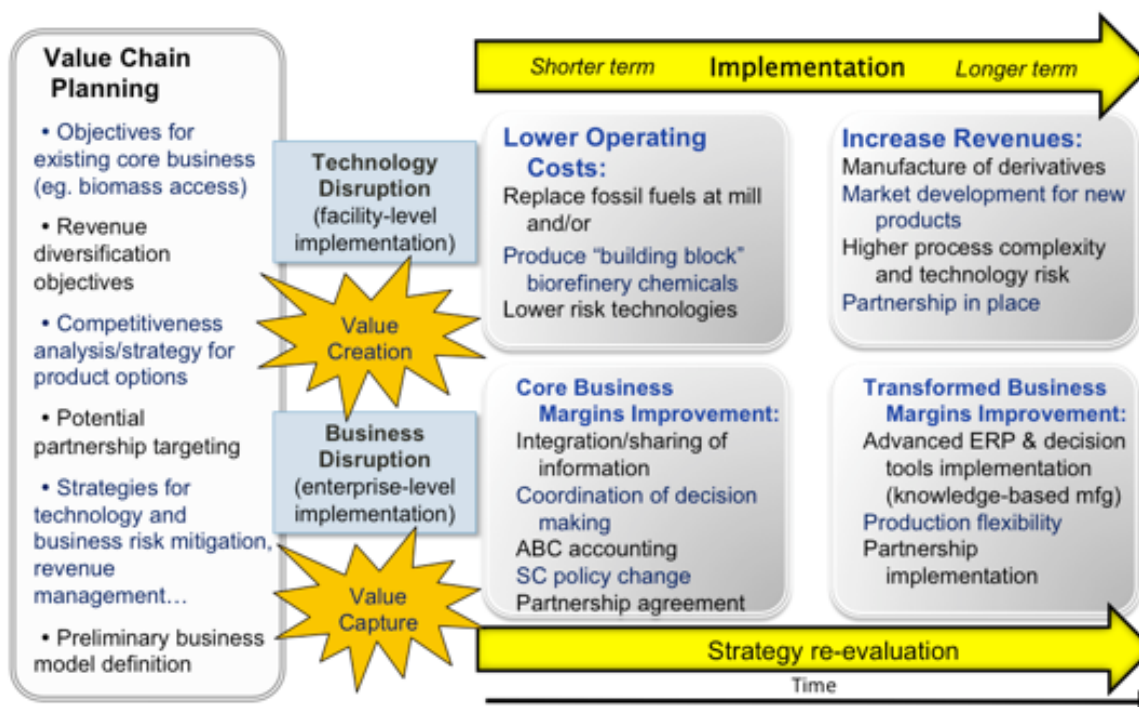


Fig. 1 - Phased-approach for the strategic implementation of biorefinery [8]

The application of that approach is case-specific, especially in a retrofit context. The deployment of the biorefinery strategy is expected to be dependent on the ability of the forest product company to establish partnerships, and to create unique competitive advantages on both technology and product sides.

PRODUCT DESIGN AND NEW PRODUCT DEVELOPMENT: STATE-OF-THE-ART

While exploring opportunities from which they can successfully transform their business model, it is essential that forest product companies use product design in a structured manner to evaluate them. Indeed, the development of new products is at the essence of the fields of product design and new product development (NPD), for which multiple approaches and methodologies have been developed. Cussler and Moggridge generalized the product design process into four generic steps in which market-driven and process-driven factors interact [9]. It consists of (1) the identification of customer needs, (2) the generation of product ideas that could fulfill identified needs, (3) the selection of the most promising ideas, and (4) the development of the product and the design of the associated manufacturing process. Numerous methodologies in the engineering field are variants or extensions of that generic one, generally including features or steps that are specific to a given design context [10-13]. The process has also been adapted to the type of product, which are generally classified as assembled or formulated [14]. Costa et al. provides a more detailed classification for chemical products and highlights the three pillars that impact their definition (see Fig. 2), which makes evident the need to conjointly consider the product and the manufacturing process through the design activities [12]. Some authors have represented the product design problem in the form of an optimization model that extrapolates functions that link the three pillars, and seek for a balance between specific variables in order to obtain a product that satisfies targeted performance indices [15-17].

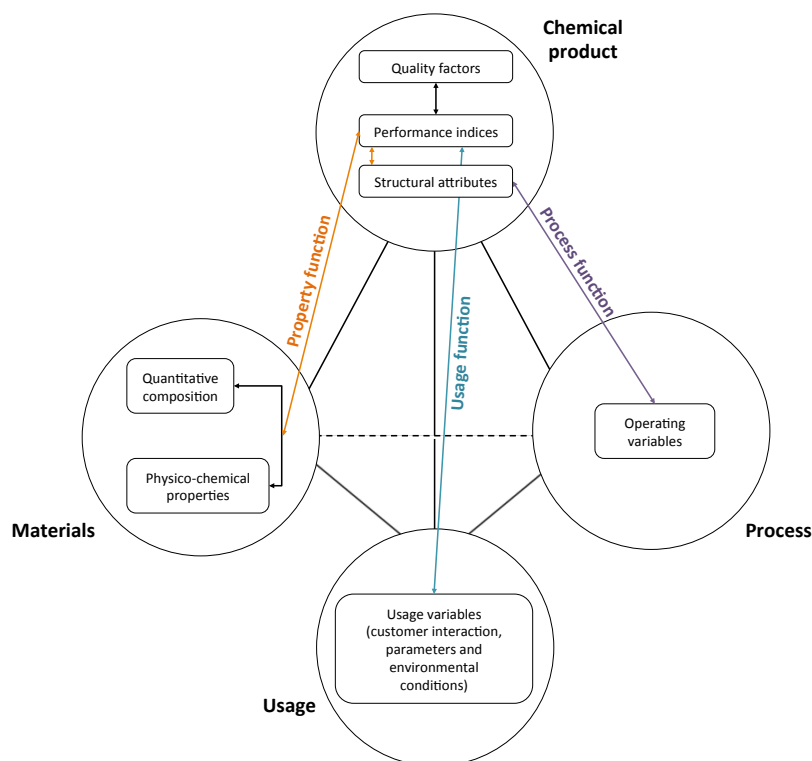


Fig. 2 - Pillars of the chemical product pyramid (adapted from [12])

The approaches cited above have the disadvantage of emphasizing on the technical perspective of product design, while developing a new product requires a more diversified set of competences. Indeed, prior to gathering customer needs and product requirements, the product itself has to be identified. The overall technical aspect is dependent on the corporate strategy defined upstream by the company, which includes the definition of targeted market segments and customers. Methodologies that consider a broader, multi-disciplinary perspective are recommended. Benchmarking studies conducted by the Product Development and Management Association (PDMA) reveal that 65% to 75% of US firms involved in NPD have adopted a stage-and-gate (or phase-gate) type of process to lead their product development efforts [18-20]; and among those identified as best-performing, that proportion increases to 90% [21].

Phase-gate processes consist in a sequence of blocks of activities separated by decision points that serve as quality checkpoints, as well as approval/rejection points [22]. First-generation processes initially considered a series of function-oriented activities in the 1960s, thus relaying the product development effort from a department to another within the organization [23]. Cooper introduced the multifunctional approach through second-generation processes, and trademarked it under the widely known Stage-Gate[®] nomenclature, in the 1980s. Second-generation processes improved speed by executing activities involving multiple departments within the organization in parallel, and ensuring the commitment of a multidisciplinary team throughout the development process [24]. Third-generation processes essentially consist in project-specific adaptations of second-generation ones, mainly for fluidity and flexibility purposes [25]. The typical second-generation process is constituted of 5 gates and 5 stages, as illustrated in Fig. 3.

The definition of the corporate strategy occurs in the Front-End section of the process and orients the identification of new product opportunities, as well as the generation of new product ideas. However, the application of the stage-and-gate methodology for the development of biorefinery initiatives is not straightforward. As highlighted by Cooper, the Stage-Gate process was not initially defined for fundamental science, research and platform projects, which appear to be broad in scope, for which the product is often not defined at the beginning of the project, and that might lead to a set of multiple products rather than a single one [25]. Modifications to the typical process have been implemented in different cases for research projects [26] and technology development [27,28]. An adaptation of the process to biorefinery development, which is analogous to a platform project as it involves a large set of possibilities and generally results in the generation of a multi-product portfolio, can also be envisioned.

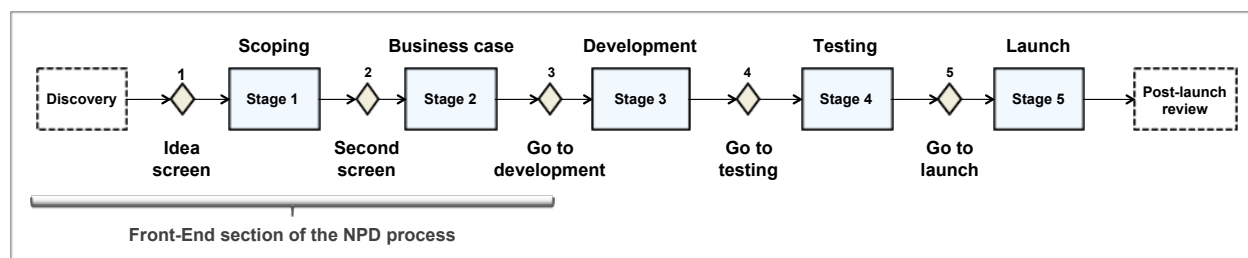


Fig. 3 - Typical second-generation stage-and-gate process

DECISION-MAKING FOR BIOREFINERY ALTERNATIVES

Decision-making occupies an important place in the design process in general, and in phase-gate processes in particular. Indeed, activities within stages are defined based on deliverables of the following gate, which are pre-established at the preceding gate. One can fairly consider that the overall NPD process is controlled by the gates, and more importantly, by the criteria that are employed at gates for projects approval. It is essential to adequately define the evaluation and selection process throughout the NPD in order to properly triage non-promising options. Numerous methods exist in the literature to address the project selection problem [29,30], seen as part of the firm project portfolio management [31], which is more global.

Regarding the evaluation of biorefinery alternatives, methods that are suitable to efficiently summarize information from several perspectives and aggregate preferences from a panel of decision-makers should be employed. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods have been successfully used for that purpose in different contexts involving the evaluation of biorefinery options [32-35]. The example can be taken of Papalexandrou et al. that evaluated diverse biofuels product-process combinations employing an Analytical Hierarchy Process (AHP) method [32], or of Posada et al. that used a Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) method (in that case a weighted sum) to compare a set of bioethanol derivatives [34]. Criteria that are commonly used represent technical and technological, economic, environmental, market, and social perspectives.

ADAPTED STAGE-AND-GATE METHODOLOGY FOR BIOREFINERY IMPLEMENTATION

Based on the critical analysis of the literature, we defined a stage-and-gate framework for the purpose of facilitating the early-stage identification and triaging of biorefinery alternatives, considering especially risk management challenges associated with multi-product portfolios. This has been done by systematically considering a phased-implementation approach for risk mitigation, and by adapting the decision-making process and criteria to specifics of the biorefinery context. An initial screening step consists in eliminating options that are evidently not attractive considering a set of showstopper criteria, followed by the establishment of preferences between retained options using MCDM methods. This approach can be summarized in a two-stage two-gate framework, as illustrated by Fig. 4.

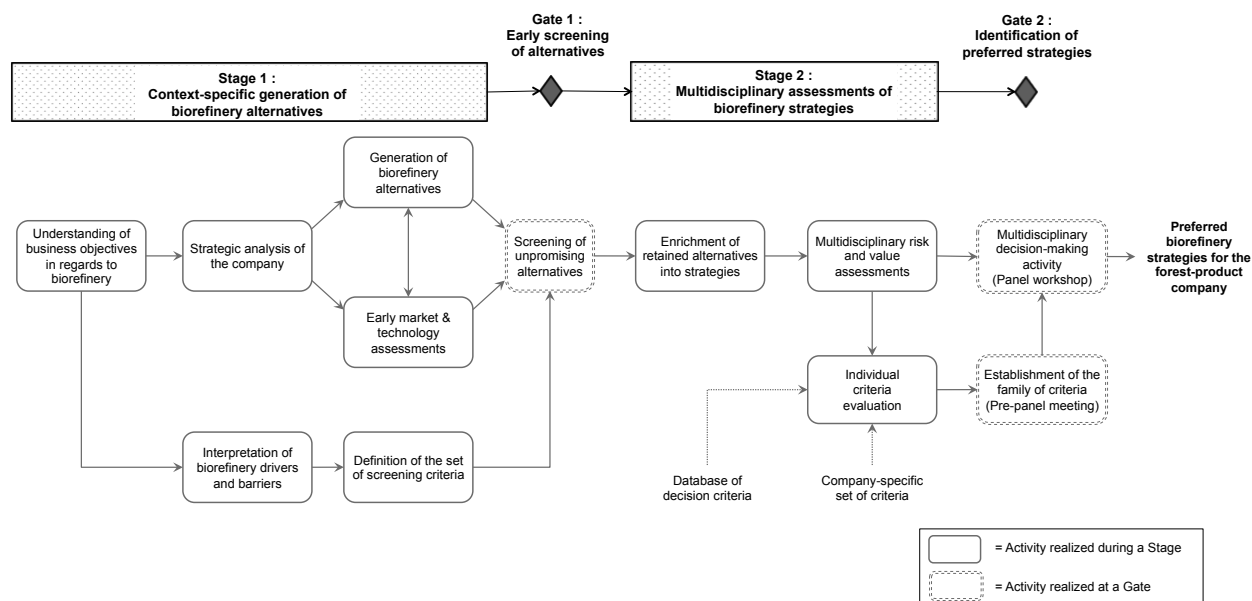


Fig. 4 - Stage-and-gate framework for the early-stage identification of preferred biorefinery strategies

Stage 1: Context-specific generation of biorefinery alternatives

The purpose of Stage 1 is to identify a set of pertinent alternatives to be considered for implementation in the forest product company. In order to explore those in an efficient manner, objectives of the company in regards to the biorefinery must be clarified. It is critical at such an early stage to make explicit company prerequisites for implementing biorefinery options in terms of risk acceptance and business transformation targets.

In the case the entity leading the design process is external to the forest product company (e.g. a consulting firm) it can initiate the Stage by holding a survey with company managers, focusing on the long-term strategic vision established by the company and the understanding of the biorefinery role, especially relatively to the core business activities. Biorefinery role must be clarified, since it is usually a reflection of the company's ambitions and expectations regarding its transformation, which have major implications regarding the scale of biorefinery processes to define, and the type of strategies that could be implemented.

Stage activities should also include:

- A strategic analysis of the company leading to an understanding of its competitive skills and advantages given its assets, as well as of its weaknesses. A tool such as the SWOT matrix is suitable for that matter;
- A preliminary value chain assessment to gather an overview of market opportunities and potential partnerships in the vicinity of the company mill(s); and
- A review of existing and emerging technologies for the isolation of biomass components, and pathways for their conversion into targeted derivative products.

Company drivers and barriers provide an orientation to the exploration of possible biorefinery options, besides establishing implicit boundaries. Barriers are external factors that limit the amount or the capacity of alternatives the company can consider (e.g. restrictions on biomass harvesting in the mill area), but also include internal constraints the company could define to coordinate its efforts.

Gate 1: Early screening of alternatives

There are generally an innumerable number of possibilities a company can consider, given the multitude of biomass species, of existing and emerging conversion technologies, and of different products that can compose associated product portfolios. Using company drivers and barriers as a basis, it is possible to define a set of criteria that represent the company culture, its strategic vision for the biorefinery, and to identify thresholds reflecting its expectations regarding biorefinery initiatives. The criteria are used as showstopper at Gate 1 in order to concretely eliminate options that do not fit with the overall strategy, and those for which it appears that they will not provide satisfying performances under all scenarios.

Showstoppers at this gate typically include the level of technology maturity, the estimated volume of biomass feedstock required to have attractive economies-of-scale, the order-of-magnitude of required capital expenses, the projected growth rate on targeted market segments, the substitution potential of existing products by biomass derivatives given the state-of-the-art, the order-of-magnitude of the return on investment, and the existence of potential partners to create synergies.

Stage 2: Multidisciplinary assessments of biorefinery strategies

Following the first triage step, preliminary business and technology plans are developed for each retained biorefinery alternative in order to adequately characterize their viability. A phased-implementation approach that targets market and technology risks associated with biorefinery development must be considered for that purpose. From that point, the term biorefinery *strategy* is preferably employed rather than *alternative* to reflect the association of a strategic plan to the initial product-process combination.

Typically the longer-term phase of the implementation plan is defined first and focuses on addressing market risks, then the near-term phase is retroactively developed to mitigate technology risks and facilitate the deployment of the strategy. Given the high level of uncertainty at such an early stage, in most of the cases two to three phases are sufficient to preliminarily express the evolution of the biorefinery strategy. The definition of each phase depends on the targeted market applications, but mostly on the point-of-entry on the value chains of the products to be replaced. In addition, the evolution from a phase to another must depict the horizontal or vertical type of development approach envisioned by the forest products company.

By systematically considering sequential phases for the implementation of the strategy, assessment studies that are further performed can effectively highlight short- and long-term uncertainties and risks specific to evolution variants of the product portfolios. At this Stage, techno-economic, environmental and competitiveness analyses are recommended for the assessment of biorefinery strategies. A “large block analysis” method is appropriate at this level for estimating process costs and economics, as it enables to obtain comparable values between a base case (usually the lowest-risk option among retained strategies) and its variants. A market analysis is also performed to estimate parameters such as future market prices, supply and demand, which would lead to understanding critical factors of the value proposal for each product, and how product portfolios can be uniquely impacted by the combination and the volume of products they are composed of.

As assessment of strategies is realized, major sources of risks given product-process combinations at different phases of the implementation plans can be identified and reflected into evaluation criteria that can be used to differentiate biorefinery strategies, and establish preferences among them.

Gate 2: Identification of preferred strategies

It is unlikely that one of the candidate strategies is superior to all others on the whole set of criteria. Moreover, the importance of decision-making factors can vary greatly from one context to another, and is closely related to the degree of risk acceptance specific to the vision of the company. An MCDM method is recommended at this Gate to define context-specific weights for the criteria, as they have shown to be practical to aggregate preferences from a panel of decision-makers over a set of indicators from different perspectives.

A first step of the decision-making process consists in having the panel review the outcome of assessment studies executed at the previous Stage, and establish the final set of criteria to be used for decision-making. This is achieved through the successive evaluation of the definition and metrics of individual criteria, followed by that of properties of the family of criteria taken as a whole. In the second step, panel members allocate weights to criteria based on their importance in the context, leading to the calculation of scores based on which candidate strategies can be compared. There is not a pre-established protocol for screening strategies; it is rather the process of interpreting the final ranking and the contribution of criteria to strategies' scores that lead panel members to identify the preferred strategies that are approved to the next Stage, those that can be put "on the shelf" and re-evaluated under certain circumstances (e.g. major breakthrough on a technology, drastic evolution of the business environment, new governmental incentives or regulations), and those that are less promising and should be eliminated.

As a result of this methodology, strategies identified as preferred would enter the NPD process already in place inside the forest product company. In a second-generation type of stage-and-gate process, the junction would be done with the business case development Stage.

CASE STUDY

The methodology defined above has been applied in the context of a North-American forest products company that aimed at diversifying its product offering through the implementation of biorefinery. The company is vertically integrated and owns several sawmills, pulp and paper mills and panel board mills, as well as a large forest management area (FMA) from which it feeds its facilities. One of the pulp mills has been selected to host the biorefinery, before eventually to extend the experience to other locations.

The host mill is a kraft pulp manufacturing facility producing approximately 1,500 admt (air-dried metric tons) per day of softwood pulp. Part of biomass feedstock is provided by sawmills nearby, including one company-owned adjacent to the pulp mill, and the other part is harvested directly from the company's FMA. Other characteristics of the mill situation include the following:

- The mill is auto-sufficient from the energy point-of-view. The energy island contains two recovery boilers and a hog fuel boiler, in addition to a spare power boiler normally shut down and used during maintenance of one of the other boilers. There is a reasonable margin for additional steam production at the hog fuel boiler. Two turbines are also in place for electricity production.
- The existing wastewater treatment unit is used at 85% of its capacity, and might need some improvements to treat effluents from the new biorefinery plant.
- Softwood biomass available in the FMA is entirely dedicated to sawmills and pulp mills operations. The company does not currently harvest hardwoods, and there is approximately 3,000 tonnes per day of hardwood biomass (~ 50% moisture) that it could use as feedstock into the new biorefinery.

Stage 1: Generation Of Biorefinery Alternatives

The launching activity in the study consisted in conducting interviews with department managers that are responsible of leading the company strategic transformation at the corporate level. The interpretation of information gathered during the interviews led the design team to understanding that:

- The main objective of the company is to diversify its revenues. No specific target has been explicitly established in terms of revenue growth by the corporation, however an implementation of the biorefinery within 2-3 years is expected;
- Current pulp production at the mill must remain unchanged, under all scenarios. The mill has not interest in increasing its pulp production capacity, and no biorefinery option that could impact the quality of pulp should be considered;
- The company welcomes options that build on its vertical integration culture by creating synergies with its other existing assets, as it would strengthen its cost structure;

- The company is reticent to follow capital-intensive technologies unless external funding sources are implicated in the project.

The first two points are the ones that most impact the identification of biorefinery alternatives to prospect for integration at the mill. The company is mainly driven by economic and strategic motivations for its biorefinery initiative, but its core business activity remains the absolute priority. The absence of revenue growth target stipulates that the maximum amount of available resources can be pursued the restriction relative to the pulp production is an important constraint. It implicitly eliminates biorefinery pre-treatment technologies that could have been incorporated prior to the digester, as they would change pulp composition. Black liquor is therefore the only process stream that can viably be used as a feedstock for the biorefinery, which orients the research towards the exploration of lignin-based biorefinery alternatives.

Regarding lignin extraction from black liquor, precipitation methods using acidification agents are the most advanced, and have recently been implemented at the commercial scale [36,37]. A broader range of biomass fractionation techniques can be identified from the literature, including steam explosion, solvent-based pulping, ammonia fiber expansion and dilute acid pretreatment [38]. The use of organic solvents is less damaging on the chemical structure of biomass components, and can be preferred for lignin isolation.

In order to anticipate the phase-approach for biorefinery implementation, market applications have been explored and systematically classified as nearor longer-term opportunities. The near-term category refers to the use of lignin for energy purposes (through black liquor combustion in pulp mills) and to the various usages of lignosulfonates such as cement and bitumen additive, as binder in animal feed, as carbon cracker, or as a precursor for vanillin production. A good level of substitution has also been proven for the replacement of phenol in phenol-formaldehyde (PF) resins production and of polyols in polyurethane (PU) foams. Other purposes such as the isolation of phenol derivatives (bisphenol A, caprolactam, BTX), the production of activated carbon, of carbon fibers, and of pharmaceuticals have been considered as more suitable for the longer-term, given the current level of advancement towards a commercial scale development.

Gate 1: Screening Of Non-Viable Alternatives

The interpretation of company's drivers and barriers led to defining two criteria for triaging the identified alternatives:

- (1) Maturity of lignin substitution: considering the timeline established by the company for a first biorefinery implementation, lignin extraction technologies considered for the first phase must be proven or at least in demonstration at the scale considered for implementation at the mill, and the substitution of existing products in targeted applications by lignin or its derivatives must be validated. For the group of alternatives classified as mid-/long-term opportunities, a horizon of five years following the first lignin implementation is considered.
- (2) Potential for differentiation: lignin is already well established in several market segments in the form of lignosulfonates, therefore the potential for market penetration can be considered limited unless benefits of using kraft lignin rather than other types is evident. This criterion would screen applications dominated by lignosulfonates lignin, and is considered as an indicator of the probability of success from a market perspective.

Among technology routes lignin precipitation was the evident choice for isolation from black liquor, while solvent-based fractionation processes have been selected for lignin extraction from additional forest biomass. Using also the maturity criterion, only the carbon fiber application has been retained among longer-term market applications given the state-of-the-art and the intensive efforts deployed by the research community in that sense. Pharmaceuticals and other phenol derivatives were screened out.

Besides screening out applications for which lignosulfonates are currently established, the differentiation criterion also eliminated the activated carbon application since kraft lignin is the most attractive carbon-rich feedstock, and it is not expected to provide major benefits compared to other materials. Thus, phenolic resins and PU foams applications have been kept among short-term options.

As a result of Gate 1 triaging, phenol replacement in PF resins and polyols replacement in PU foams are anticipated for Phase 1 of the biorefinery implementation plans, while polyacrylonitrile (PAN) replacement is anticipated for Phase 2.

Stage 2: Definition Of Strategies And Criteria Evaluation

Two-Phase implementation plans have been defined for all retained biorefinery alternatives, considering (1) specific positioning of derivative products' value chains for each phase, and (2) horizontal or vertical integration development approaches to shape the switch from Phase 1 to Phase 2. For each Phase, the design capacity is defined considering resource availability and constraints of integration at the mill on one side, and the potential market share given the substitution level of lignin for targeted applications on the other. To reflect the possible roles of the biorefinery activity within the company, two strategic orientations have been considered for the definition of candidate strategies, thus affecting the scale of processes involved in each case. The first orientation is mill-centric and aims at improving the mill competitive position given the process in place, while the latter is company-oriented and seeks greater impacts in terms of revenue growth and diversification.

Regarding positioning on existing value chains, the forest product company has two options, the first being to commercialize lignin as an intermediate product, thus replacing phenol, polyols or PAN. Another option is to convert extracted lignin into the final customer product and commercialize a lignin-based PF resin, PU foam, or even a certain grade of carbon fiber. In that case the availability of a mature lignin conversion technology is critical, but most importantly the familiarity of the company with such technologies is a determining risk mitigation factor. Considering these elements, only the option of manufacturing a lignin-based resin has been retained. It would represent an alternative development option following a vertical integration approach, while capacity increase of the biorefinery plant and product diversification can be considered in the case of a horizontal integration.

In the course of the execution of the case study, the implementation of a low-scale lignin precipitation unit was identified as the lowest-risk move for the forest product company given its timeline. Such a strategy would help the company (1) to address technology integration uncertainties in the existing process, (2) to develop know-how on lignin production, (3) to capture early market shares as a pioneer kraft lignin producer, and (4) to validate the suitability of kraft lignin for a gamut of applications besides the ones already targeted. Since a portion of the lignin produced can be used internally in panel board mills, the primary market application targeted is phenol replacement in resins. That strategy was set as the base case from which other scenarios would be derived. Due to recovery boilers operating requirements in terms of burning properties of the black liquor, a theoretical maximum of 30% can be by-passed to the precipitation unit. Therefore, the capacity of the base case unit has been set as equivalent to 5% of the black liquor entering the precipitation unit, which capacity could further be tripled in the mid-term to enhance market positioning. The first candidate strategy, Ligno 90□PF, represents that conservative capacity increase scenario.

In the first group of strategies, a horizontal integration approach has been represented through strategies Ligno 90□PF PU and Ligno 90□PF CFs that consider diversifying lignin market positioning, targeting respectively PU foams and carbon fibers applications in addition to PF resins. The vertical integration approach consisting of manufacturing a lignin-based PF resin on the mill site is also included in the first group, through the strategy Resin 90. Under that scenario the acquisition of an existing resin manufacturer is assumed, as it would facilitate the integration of resin production and provide the forest product company a more direct access to distribution channels. That strategy is therefore considered for Phase 2, as it implies a higher level of market risks.

In the second group of strategies, a solvent-based fractionation process is considered for treating all available hardwood biomass from the forest. This is considered as a stand-alone plant to prevent contaminating the softwood-exclusive pulp production at the mill with hardwoods, synergies with the existing process being considered only for energy optimization and wastewater treatment. As well, a joint venture scenario is assumed, that contributes to mitigating economic risk related to the high costs expected at that scale. Besides lignin derivatives, the portfolio of products contains isobutanol sold as fuel, and a hemicellulose-rich sugar syrup sold as animal feed. Candidate strategies in this group essentially consider a horizontal integration approach only. The strategy Ligno 90 + SP•PF represents the impact of capacity increase through the implementation of the solvent pulping plant, focusing on the PF resins application. The following two, Ligno 90 + SP•PF PU and Ligno 90 + SP•PF CFs, combine it with product diversification into PU foams and carbon fibers applications. Table 1 below provides a summary of the set of candidate strategies defined.

	Candidate strategies	Phase 0 Year 0 – Year 4	Phase 1 Year 5 – Year 9	Phase 2 Year 10 – Year 30
Strategic orientation	Base Case	Lignin production capacity: 30 bdmt/day • Year 0: 100% lignin burnt • Year 1-5: gradually increase lignin sales and internal use in board mills • Year 6+: 6 t/d to board mills, 24 t/d to PF resin market		
Early market positioning	Ligno 90•PF	Same as Base Case	Increase of lignin precipitation capacity to 90 t/d • Year 6+: 6 t/d to board mills, 84 t/d to PF resin market	
Group 1: Improve mill competitive position	Ligno 90•PF PU		Same as Ligno 90•PF • Year 6+: 54 t/d to PF resins, 30 t/d to PU foams	
	Ligno 90•PF CFs		Same as Ligno 90•PF • Year 6+: 54 t/d to PF resins, 30 t/d to Carbon fibers	
	Resin 90		Same as Ligno 90•PF	Acquisition of a resin producer 90 t/d of lignin → 435 t/d of resin produced
Group 2: Higher-scale revenue diversification	Ligno 90 + SP•PF		Same as Ligno 90•PF + Solvent pulping demo plant ¹	Increase of solvent pulping to full capacity ²
	Ligno 90 + SP•PF PU		Same as Ligno 90 + SP•PF, excepting lignin distribution: 6 t/d to board mills, 220 t/d to PF resins, 124 t/d to PU foams	
	Ligno 90 + SP•PF CFs		Same as Ligno 90 + SP•PF, excepting lignin distribution: 6 t/d to board mills, 220 t/d to PF resins, 124 t/d to Carbon fibers	

¹ The demo plant extracts 9 bdmt/day of lignin from 50 bdmt/day of hardwood.

² There is capacity ramp-up of the full-scale plant from Year 10-12, up to 350 bdmt/day of lignin extracted.

Table 1 - Description of candidate strategies in the case study

The defined strategies have been evaluated using a set of six criteria resulting from a two-step triage methodology. In the first step, a database of criteria was constituted from a wide review of the literature. The triage of criteria was then performed based on (1) the relevance and (2) importance of the criterion to the context, on (3) the representativeness of the metric relatively to the issue raised by the criterion, (4) on the expectation that metric calculations will result in values that are distinct enough to distinguish candidate strategies, and (5) on the reliability of data used for criteria evaluation. The set of remaining criteria was then evaluated as a whole, starting by conjointly examining if it was non-redundant and exhaustive. Prior to eliminating a criterion based on redundancy, it was critical to insure that the family of criteria would still exhaustively cover all issues important to the decision panel. The set of criteria was finally evaluated on being workable (with a manageable number of criteria) and operational (consensually approved by all panel members). Table 2 below summarizes the criteria and associated metrics, along with interpretations as agreed-on by the panel during MCDM activities.

Category	Criterion name	Interpretation	Metric
Economic risk	Internal Rate of Return (IRR)	Measure of project profitability under normal market conditions , considering all phases of the biorefinery strategy. The hurdle rate was set at 20%, considering the risk level expected in Year 5 of the project.	Discount rate at which NPV ¹ equals zero. $NPV = \sum_{t=0}^{25} \frac{\text{Cash flow}_t}{(1 + IRR)^t} = 0$
	Cash Flow on Capital Employed (CFCE)	Ability to generate cash flows from the capital investment over the life of the project, and thereby to improve the value of the company by lowering its debt .	<ul style="list-style-type: none"> • Discount rate for future EBITs²: 20% • Discount rate for capital investments: 6% $CFCE = \frac{\sum \text{present value of future EBITs}}{\sum \text{present value of capital investments}}$
Market risk and competitiveness	Revenue Diversification (RD)	Potential to meet revenue growth targets from new bioproducts, over the revenue from the mill in its current situation. It Indicates an ability to mitigate market risk by being less dependent on pulp sales , due to a more diversified source of revenues .	RD = Importance of new revenues x Importance of new products
	Competitiveness on Production Costs (CPC)	Robustness of the biorefinery strategy relative to an aggressive price-cutting strategy from the competition , based on assumptions of a low-end production price for the competition.	$CPC = \frac{(\text{Total portfolio revenue})_{\text{minimum market prices}} - \text{Operating costs}}{(\text{Total portfolio revenue})_{\text{minimum market prices}}}$
	Resistance to Energy and Chemicals Market Uncertainty (RECMU)	Vulnerability of the strategy to production cost volatility due to the volatility of feed material costs (product transportation and logistics not included).	$RECMU = 1 - \frac{\text{Costs of (energy + chemicals)}}{\text{Total variable costs}}$
	Robustness to Poor Market Conditions (RPMC)	Ability to afford process operation under poor market conditions for a 6-month period, expressed by EBITDA ³ as a percentage of the capital investment.	$RPMC = \frac{(\text{monthly EBITDA under poor market conditions}) \times 6}{\text{Total capital costs}}$

¹ NPV: Net Present Value.

² EBIT: Earnings Before Interest and Tax.

³ EBITDA: Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization.

Table 2 - Final set of criteria established by the decision panel

Values obtained through metrics calculations are presented in Table 3. It mainly showed that strategies from the mill-centric group are more profitable than those involving higher-scale plants, the latter being significantly weakened by high cost expenses. A better profitability could have been achieved by targeting higher-value co-products from sugars, however this was not the focus of the present study. Strategies from the second group exhibit better performance on market and competitiveness criteria, especially regarding revenue diversification and the resistance to feed materials volatility. One of the greatest contributors to solvent pulping operating costs is biomass delivery, however that parameter is under control of the company, which makes it less vulnerable to fluctuations of energy and chemicals costs. Considering the entire set of criteria, an early prediction of preferred strategies is not evident, as (1) no strategy performs better than all other candidates all criteria considered, and (2) the ranking of strategies from a criterion to another leads to contradictory conclusions.

Criterion	Ligno 90•PF	Ligno 90•PF PU	Ligno 90•PF CFs	Resin 90	Ligno 90 + SP•PF	Ligno 90 + SP•PF PU	Ligno 90 + SP•PF CFs
Internal Rate of Return (IRR)	31%	57%	43%	46%	21%	28%	26%
Cash Flow on Capital Employed (CFCE)	2.0	4.5	2.9	3.0	1.0	1.4	1.3
Revenue Diversification (RD)	2%	7%	7%	22%	29%	51%	48%
Competitiveness on Production Costs (CPC)	46%	65%	59%	58%	33%	45%	41%
Resistance to Energy and Chemicals Market Uncertainty (RECMU)	21%	30%	28%	14%	82%	83%	83%
Robustness to Poor Market Conditions (RPMC)	7%	22%	13%	4%	4%	11%	8%

Table 3 - Results of MCDM criteria evaluation

Gate 2: Identification of Preferred Strategies

The decision-making workshop was organized around three activities. First the panel reviewed the outcome of criteria evaluation in order to define a contextual interpretation of the criteria, and to identify the one that was the most important in the context of the lignin biorefinery implementation. They then successively performed trade-off comparisons between each criterion and the most important one, which led to determining criteria weights. The results of criteria evaluation for each candidate strategy were normalized using linear utility functions, and a weighted sum formula was employed to extrapolate overall scores that served for the final comparison of candidate strategies. The final activity of the panel consisted in interpreting strategies' scores and ranking in order to identify the preferred ones.

As an outcome of panel discussions, IRR was selected as the most important criterion, with a target value of 25%. Given the level of risk expected in the project and the uncertainty on IRR input parameters, the upper bound for indifference between strategies (used as the upper limit of the normalization range) was set at 75%. In consequence, utility values associated to IRR were minimized, and the trade-off range for IRR was wider, which led panel members to sacrifice more on profitability to improve other indicators. The resulting weights are presented in Fig. 5.

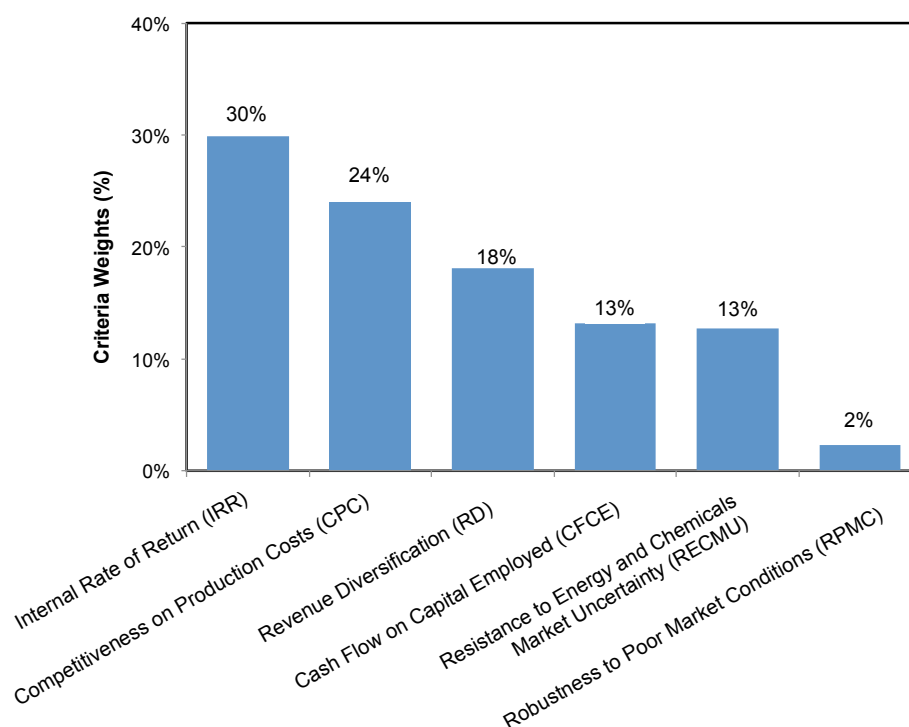


Fig. 5 - Criteria weights resulting from trade-off activities

The criterion on price competitiveness, CPC, is the one that mostly benefited from the moderate IRR weight. Panel members attributed it a critical importance due to its impact on the potential to penetrate and capture early shares on targeted lignin derivatives markets. There is a significant gap between its weight (24%) and the one of the RD criterion (18%), which is also fairly distinguished from the rest, as reflects the main motivation of the company in regards to the biorefinery implementation. At the far end, RPMC was allocated a low importance weight (2%) since all candidate strategies were able to generate positive margins under poor market conditions. Using these weights, strategies ranking and criteria contribution into strategies' scores are presented in Fig. 6.

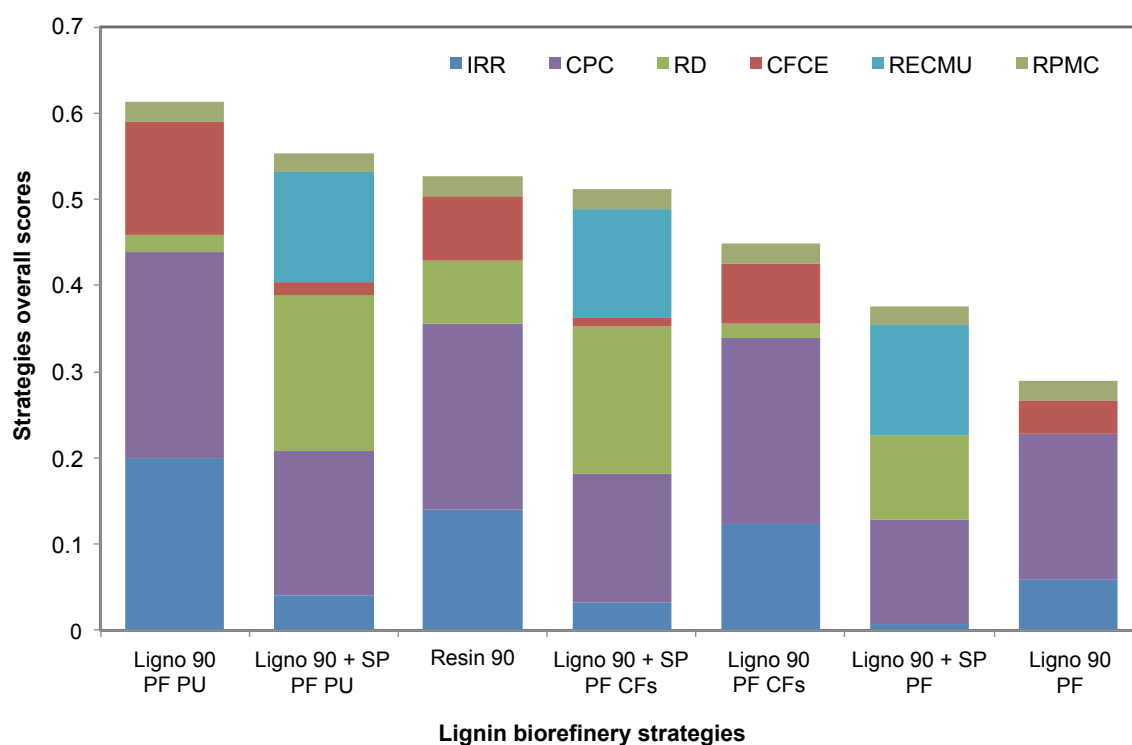


Fig. 6 - Ranking and scores of candidate strategies

There is a narrow gap between strategies scores, as all except Ligno 90□PF had scores between 0.38 and 0.61. Because candidates from the two distinct strategic orientations were driven by different factors, criteria weights emphasized those influences, rather than differentiating strategies. CPC is the most important contributor for five strategies out seven, and appears to be the most impactful in that perspective. From the perspective of distinguishing strategies, the role of IRR, RD, CFCE and RECMU should be looked closely. Group 1 strategies clearly benefit from IRR and CFCE while RD and RECMU support Group 2 strategies. The best candidate of each Group could be combined into a single strategy consisting in (1) increasing lignin precipitation capacity and diversifying the targeted lignin applications towards high-value derivatives in the near-term, prior to (2) adding a higher-scale plant that would convert extra biomass capacity into a diversified product portfolio to simultaneously improve market share and the overall strategy robustness.

The Resin 90 strategy exhibited a singular profile, as its fairly good score was due to a combination of good performances on both economic and robustness criteria. This confirmed the potential for such a strategy to generate unique competitive advantages by building on the vertical integration culture of the company. Because the company has the potential to absorb part of unsold lignin or lignin-based resin production by using it in its board mills, it has a greater ability to control product prices and to face market risks.

Based on these results, the panel decided that:

- Last two strategies should be rejected: results show that focusing relying only on capacity increase is unlikely to provide sufficient advantages when the lignin biorefinery sector will get more mature;
- The top three strategies are preferred and should be considered for further development: the strategy Ligno 90□PF PU that is ranked first adequately combines economic and strategic advantages, and can be easily be merged with one of the two others in the longer-term;
- Strategies involving carbon fibers should be kept under observation, as evolutions in the industry or the business environment might drastically improve their score and justify reconsidering them.

DISCUSSION

The application of the methodology introduced in Fig. 4 has helped to validate its suitability to accompany forest products companies to the identification of the biorefinery strategies they would consider as preferred according to their context. First, the interpretation of the company's drivers and barriers from the initial survey led to defining two showstopper criteria that narrowed the primary set of options from more than fifty down to four. Using a phased-implementation approach, two-Phase plans have been systematically developed considering the suitability of product options for the near or the longer-term, as well as value chain penetration and business deployment aspects, thus defining a set of seven strategies. The latter have been evaluated through an MCDM panel using risk and value potential criteria, which led to effectively establish preferences among the strategies.

The suggested methodology is not a revolution of the front-end section of the typical process, but rather an adaptation to the evaluation of biorefinery initiatives, considering especially specificities of multi-product portfolios. The consideration of sequential implementation approaches contributed in that sense as it enabled the company to intrinsically incorporate risk mitigation methods to the definition biorefinery strategies (technical risks addressed in Phase I and market risks addressed in Phase II). Further, it facilitated the identification of major sources of residual risk, which were reflected in decision criteria employed at the second gate. The appreciation of risks and of the value proposal associated with candidate strategies is critical as it is specific to each product portfolio composition, and to each product-process combination at different Phases of the implementation plan. Being able to adequately characterize candidate strategies according to diverse perspectives in the front-end section provides more focus downstream in the NPD process, as the company could better target weaknesses of preferred strategies, as well as maximize related competitive advantages. In addition, criteria that receive higher weights during the MCDM panel activity serve as a basis for the definition of approval criteria at subsequent gates of the NPD process, thus enabling the company to measure the improvement realized through stage activities in-between the gates.

The role of chemical engineers in the methodology defined in this paper deserves to be highlighted. The application of the methodology in a firm environment requires that a multidisciplinary team is constituted. The definition of biorefinery strategies as well as their assessment and evaluation from multiple perspectives need various talents, among which chemical engineers should not restraint themselves to the technical aspect of design. Indeed, they could also have a significant contribution to the definition of the value proposal given the expert perspective they could provide on the uniqueness of products-process combination, besides the creation of competitive advantages relative to product differentiation.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by a grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). The authors would like to thank industrial partners in the project, which provided access to operating facilities, process and technology data, and expertise for the validation of assumptions and results.

REFERENCES

- [1] K. Schaefer. (2015) Outlook for the World Paper Grade Pulp Market. [Online]. <http://www.cepi.org/system/files/public/documents/events/EuropeanPaperWeek2015/Schaefer%20-%20RISI.pdf>
- [2] P.R. Stuart, "The forest biorefinery: survival strategy of Canada's P&P sector?," *Pulp & Paper Canada*, vol. 107, no. 6, pp. 13-16, 2006.
- [3] V. Chambost, B. Earmer, and P. R. Stuart, "Systematic methodology for identifying promising forest biorefinery products," *Pulp & Paper Canada*, vol. 108, no. 6, pp. T114-118, 2007.
- [4] M. Janssen, V. Chambost, and P. Stuart, "Successful partnerships for the forest biorefinery," *Industrial Bioechnology*, vol. 4, no. 4, pp. 352-362, 2008.
- [5] V. Chambost, J. McNutt, and P.R. Stuart, "Guided tour: Implementing the forest biorefinery (FBR) at existing pulp and paper mills," *Pulp and Paper Canada*, vol. 109(7- 8), pp. 19-27 , 2008.
- [6] B. Mansoornejad, V. Chambost, and P. Stuart, "Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 34, no. 9, pp. 1497–1506, 2010.
- [7] J. Jeaidi and P. Stuart, "Techno-economic analysis of biorefinery process options for mechanical pulp mills," *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, vol. 1, no. 3, 2011.
- [8] C. Diffio Tegua, V. Chambost, S. Sanaei, S. D'Amours, and P. Stuart, "Strategic Transformation of the Forest Industry Value Chain," in *Forest Value Chain Optimization and Sustainability*.: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016, pp. 33-74.
- [9] E. L. Cussler and G. D. Moggridge, *Chemical Product Design*, 2nd ed. New-York: Cambridge University Press, 2011.
- [10] C. Wibowo and K.M. Ng, "Product-Centered Processing: Manufacture of Chemical-Based Consumer Products," *AIChE Journal*, vol. 48, no. 6, pp. 1212-1230, June 2002.

- [11] M Hill, "Product and Process Design for Structured Products," *AIChE Journal*, vol. 50, no. 8, pp. 1656-1661, August 2004.
- [12] R. Costa, G. D. Moggridge, and P. M. Saraiva, "Chemical Product Engineering: An Emerging Paradigm Within Chemical Engineering," *AIChE Journal*, vol. 52, no. 6, pp. 1976-1986, 2006.
- [13] M. Hill, "Chemical Product Engineering—The third paradigm," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 33, pp. 947-953, 2009.
- [14] E. L. Cussler and J. Wei, "Chemical product engineering," *AIChE Journal*, vol. 49, pp. 1072-1075, May 2003.
- [15] NV Sahinidis, M Tawarmalani, and M Yu, "Design of Alternative Refrigerants via Global Optimization," *AIChE Journal*, vol. 49, no. 7, pp. 1761-1775, July 2003.
- [16] R. Gani, "Chemical product design: challenges and opportunities," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 2441-2457, 2004.
- [17] S Hada, N Chemmangattuvalappil, CB Roberts, and M Eden, "Optimization of Product Formulation through Multivariate Statistical Analysis of Process Data," *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 31, pp. 1361–1365, 2012.
- [18] Booz-Allen and Hamilton, *New products management for the 1980s*. New York: Booz-Allen & Hamilton, Inc., 1982.
- [19] D Boike and M Adams, "PDMA Foundation CPAS Study reveals new trends: while the 'best-rest' gap in NPD widens," *Visions*, vol. 28, pp. 26-29, 2004.
- [20] KB Kahn, G Barczak, and R Moss, "PERSPECTIVE: Establishing an NPD Best Practices Framework," *The Journal of Product Innovation Management*, vol. 23, no. 2, pp. 106–116, March 2006.
- [21] R. G. Cooper and S. J. Edgett, "Best Practices in the Idea-to-Launch Process and Its Governance: A Study of New-Product Development Practices at 211 Businesses Provides Insights into Best Practices in Both the Idea-to-Launch Process and Its Governance," *Research Technology Management*, pp. 43-54, March-April 2012.

- [22] M. Crawford and A. Di Benedetto, "The Strategic Elements of Product Development," in *New Products Management, Tenth Edition*. New-York: McGraw-Hill, 2010, pp. 5-25.
- [23] S Valeri, M Santiago, A Campello, H Resende, and L Trabasso, "Implementation of the Phase Review Process in the NPD : A Successful Experience," in *International Conference on Engineering Design*, Stockholm, 2003.
- [24] R. G. Cooper, "The new product process: A decision guide for management," *Journal of Marketing Management*, vol. 3, no. 3, pp. 238-255, 1988.
- [25] R. G. Cooper, "The New Product Process: The Stage-Gate Game Plan," in *Winning at New Products*, 3rd ed. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2001, pp. 113-153.
- [26] L. Y. Cohen, P. W. Kamienski, and R. L. Espino, "Gate System Focuses Industrial Basic Research," *Research Technology Management*, vol. 41, no. 4, pp. 34-37, Jul/Aug 1998.
- [27] G. Ajamian and P. A. Koen, "Technology Stage Gate: A Structured Process for Managing High-Risk New Technology Projects," in *The PDMA Toolbox for New Product Development*. New-York: John Wiley & Sons, 2002, pp. 267–295.
- [28] U. Högman and H. Johannesson, "Applying stage-gate processes to technology development—Experience from six hardware-oriented companies," *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 30, pp. 264-287, 2013.
- [29] NP Archer and F Ghasemzadeh, "An integrated framework for project portfolio selection," *International Journal of Project Management*, vol. 17, no. 4, pp. 207-216, 1999.
- [30] C Verbano and A Nosella, "Addressing R&D investment decisions: a cross analysis of R&D project selection methods," *European Journal of Innovation Management*, vol. 13, no. 3, pp. 355-379, 2010.
- [31] C. P. Killen, R. A. Hunt, and E. J. Kleinschmidt, "Managing the New Product Development Project Portfolio: A Review of the Literature and Empirical Evidence," in *Portland International Center for Management of Engineering and Technology (PICMET)*, Portland, 2007, pp. 1864-1874.

- [32] MA Papalexandrou, PA Pilavachi, and AI Chatzimouratidis, "Evaluation of liquid bio-fuels using the Analytic Hierarchy Process," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 86, no. 5, pp. 360-374, 2008.
- [33] JC Sacramento-Rivero, "A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators," *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, vol. 6, pp. 32-44, 2012.
- [34] JA Posada et al., "Potential of bioethanol as a chemical building block for biorefineries: Preliminary sustainability assessment of 12 bioethanol-based products," *Bioresource Technology*, vol. 135, pp. 490-499, 2013.
- [35] S Niekamp, UR Bharadwaj, J Sadhukhan, and MK Chrysanthopoulos, "A multi-criteria decision support framework for sustainable asset management and challenges in its application," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 23-36, 2015.
- [36] C. Macdonald, "BIOREFINERIES COAST TO COAST," *Pulp & Paper Canada*, pp. 16-17, September/October 2016.
- [37] L Kouisni, A Gagné, K Maki, P Holt-Hindle, and M Paleologou, "LignoForce System for the Recovery of Lignin from Black Liquor: Feedstock Options, Odor Profile, and Product Characterization," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 4, pp. 5152-5159, 2016.
- [38] V.B. Agbor, N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, and D.B. Levin, "Biomass pretreatment: Fundamentals toward application," *Biotechnology Advances*, vol. 29, no. 6, pp. 675-685, 2011.

ANNEXE E – Article 5 – Chapitre de livre: Strategic Transformation of the Forest Industry Value Chain

Cédric Dikko Téguia, Virginie Chambost, Shabnam Sanaei, Sophie D'Amours et Paul Stuart

Publication complémentaire, chapitre de livre publié dans S. D'Amours, M. Ouhimmou, J. Audy, et Y. Feng (2016) *Forest Value Chain Optimization and Sustainability*, CRC Press/Taylor & Francis.

La version ici présentée correspond au manuscrit final soumis à l'éditeur du livre ; il pourrait donc y avoir quelques différences mineures entre son contenu et celui de la version publiée.

3.1 Part I: Key Concepts and Tools

3.1.1 Introduction

Over the past decade, the forest products industry in North America and Europe has been impacted by a decline in certain market segments, such as newsprint and printing and writing papers (Pöyry PLC 2015; Schaefer 2015), while other segments, such as tissue and board, continue to experience stable growth. Although there has been some recovery in recent years, the North-American housing market has been marked by a severe crisis between 2006 and 2010 that has caused a major reduction in demand for construction materials, leading to a difficult period for the entire forest industry (United Nations Economic Commission for Europe 2015). Coupled with low-cost competition from emerging countries in Asia and Latin America, these factors have been the driving forces that have led many forestry companies to consider revenue diversification and transforming of their business models.

Cost-cutting strategies have been employed in order to maintain the competitive position of forest-based products; however over the longer-term, a profound transformation of the business model is essential in order to guarantee a sustainable competitive position (Stuart 2006). Forest product companies should evolve from a commodity-centric culture that focuses on key performance indicators (KPI), to a margins-centric culture, as they diversify their traditional product portfolio to incorporate added-value products. This implies improving existing processes while new technologies are implemented, optimizing access to new biomass demands, and systematically developing new product supply chain strategies. In the manufacture of traditional pulp or paper products, for example, the fractionation of wood is accomplished by the kraft pulping process to recover cellulose. Residual streams including hemicellulose, lignin and other chemicals remain under-exploited, and are typically burned in the recovery boiler for steam and power generation. The biorefinery concept aims to integrate conversion routes into and alongside existing processes for the production of fuels, bioenergy and biochemicals from biomass (Axegård 2005). Today, opportunities to produce new bioproducts that compete economically with existing fossil-based products are being explored by forest product companies, examining the potential to create a competitive value proposal.

This chapter is divided into two parts that address the question of how forest products companies might consider strategic transformation and product diversification. Part I is a review of key concepts and tools for the assessment and evaluation of biorefinery business models. It highlights strategic planning concepts, specifics of market assessment, and decision-making from a multi-disciplinary perspective. Part II proposes a systematic approach for the identification of promising transformative business models and illustrates it through two case studies in the pulp and paper sector.

3.1.2 Strategic aspects of biorefinery implementation

Rapid changes in the business and technology environments are affecting the competitiveness of forest product companies. Historically, companies used operational effectiveness to create operating cost advantage. Nevertheless, Porter (2008) demonstrated that in turbulent economic, social and political environments, successful operational effectiveness strategy should be supported by efforts concerning the company strategic positioning. This approach includes synergies along the company value chain for creating *unique* competitive advantage.

Rather than targeting a first or second quartile position in market segments where they already compete, a better approach for forest product companies might be strategic (re) positioning, which implies enterprise transformation (ET). Two major ET approaches can be used: “inside-out” transformation, and “outside-in” transformation (Chambost, McNutt and Stuart 2009). The former relates to seeking bottom-line results improvement by considering synergies in terms of work and process focusing on cost-competitiveness achievements across the value chain. In contrast, “outside-in” ET involves a core transformation of the vision and mission of a company – a makeover from the top-down. For example, Georgia Pacific implemented an “inside-out” ET by focusing on improving its core business, while reworking how the company functions to deliver its product portfolio to the market. Another US-based forest products company, Potlatch, opted for an “outside-in” approach, transforming itself into a Real Estate Investment Trust or REIT to take advantage of favourable tax treatment and strengthen the company’s position in timberland ownership and management. One of the most successful examples of ET has been that of DuPont de Nemours, which combined both inside-out and outside-in approaches. DuPont has punctually reinvented itself by adapting its core business to market needs to ensure profitability and has grown its market share in profitable new businesses over the long term. The company recently again diversified its product portfolio and divided its business into five major areas to improve net sales consolidation. DuPont acquired bioproduct manufacturing competency through strategic mergers and acquisition, such as Danisco, in recent years. Dupont recently merged with Dow Chemical Company and has planned a 2017 spin-off into three companies that include the following: genetically modified seeds and pesticides, plastics and other commodity materials, and high-tech specialty products. Each of the three would be stitched together from Dow and DuPont. This undoubtedly is considered a high-risk transformation of Dupont.

If forest product companies are to remain competitive by implementing the biorefinery, then clear diversification targets and new product portfolio definitions must be set (“outside-in” ET), as well as unique operations and supply chain strategies (“inside-out” ET). Diversification of the product portfolio implies targeting new customers, from commodity-driven to specialty-driven markets, including proactivity, efficiency, responsiveness, and flexibility in the business model.

3.1.2.1 Phased implementation of the biorefinery

Chambost, McNutt, and Stuart (2009) recommended a phased approach for the retrofit implementation of the biorefinery into and alongside existing mills for risk mitigation and incremental transformation of the business model taking into account short-, mid-, and long-term goals (summarized in Figure 3.1).

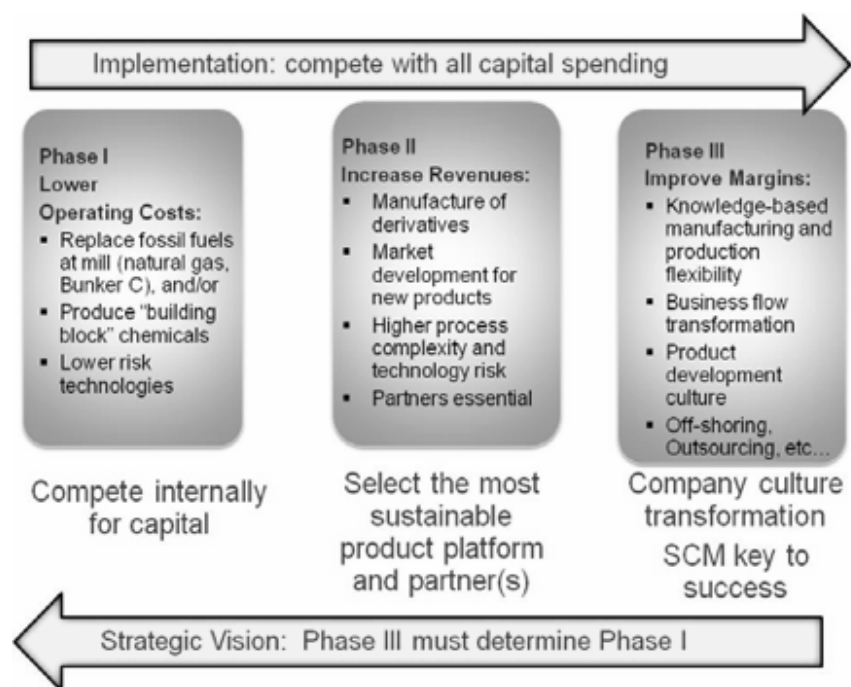


Figure 3.1 Phased implementation of the forest biorefinery. (Adapted from Chambost, V., J. McNutt and P.R. Stuart, Partnership for successful enterprise transformation of forest industry companies implementing the forest biorefinery. Pulp and Paper Canada, May/June 2009.)

Phase I of biorefinery implementation focuses on reducing risks related to the implementation of new processes and products in the shorter-term, and sets the path for a longer-term vision defined by the corporation. It typically involves products having lower market risk such as bioenergy and biofuels that often can be used internally to displace fossil fuels and lower operating costs, or sold on the market to generate early cash flow. The production of building block chemicals might be envisaged in order to create the opportunity for early access to market for value-added derivatives in subsequent implementation phases. The latter typically involves higher technology risk, as well as specific market penetration strategies. The preliminary phase must be supported by the long-term access to a large volume of low-cost biomass.

Phase II (and its subphases) aims to create improved margins through the manufacture of added-value bioproducts as part of the expanded product portfolio. Once operational effectiveness is achieved, the forest product company should build competitive advantage through the strategic positioning of the product portfolio on the market. Definition of process/product combinations coupled with product delivery and market penetration strategies are key drivers for the new business model definition. Gradual development of the product portfolio is essential in order to reduce risk and accommodate market price volatility in a robust business model. As part of risk mitigation, collaborations and partnerships will be critical to minimize technical, commercial, and financial risks.

Phase III targets margins maximization and improvement of bottom line results through the reengineering of supply chains, advanced information systems, manufacturing systems that exploit production flexibility, and new delivery mechanisms. In a sense, Phase III is the consolidation of the outside-in transformation. Creating a unique product portfolio and associated supply chain is essential to the long-term competitive position of the forest products company.

The phased implementation of the biorefinery implies having clear short- and long-term objectives along with an incremental technology implementation strategy to build a flexible and diversified product portfolio. Figure 3.2 summarizes some key drivers for implementing a biorefinery strategy at an existing pulp and paper mill. The box entitled “value chain planning” presents an overview of the biorefinery business strategy definition using a step-by-step approach. Both technology and business disruptions are implied with the definition and the implementation of the biorefinery strategy. The *technology strategy* at the *facility level* should be supported by the definition of the *business strategy* at the *corporate level*. For an effective “outside-in” transformation, it is critical that the mission and vision of the company are adapted to reflect transformational objectives.

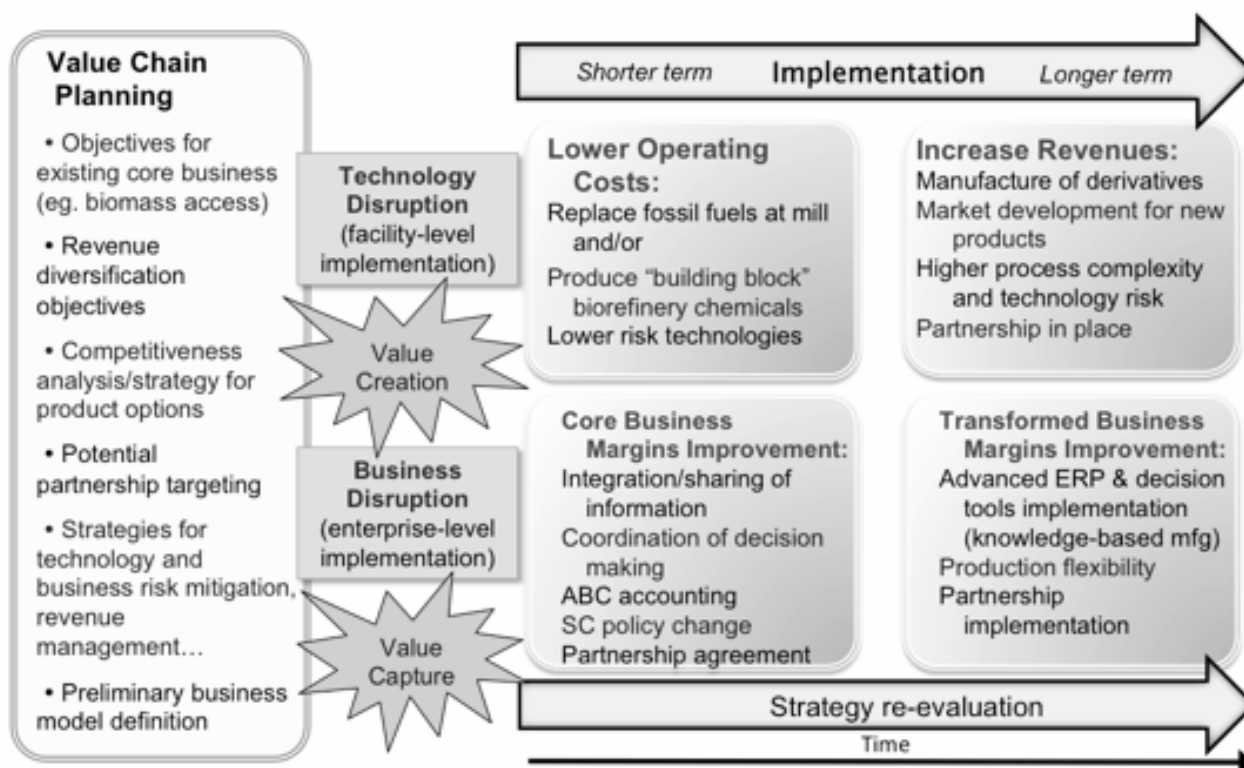


Figure 3.2 Transformation planning and implementation using a phased approach

3.1.2.2 Strategic interaction between business and technology plans

3.1.2.2.1 Process- and product-centric approaches for biorefinery strategy definition

Defining successful biorefinery strategies requires interaction between the product-market-business strategy and technology-process strategy, coupling process and product design methods.

Process design is a well-known field for the definition of technically- and economically-feasible processes for the manufacture of products, including the assessment of technological, environmental and economic risks at different production scales. Product design for the biorefinery is critical and perhaps less-recognized. Methods have been developed for identifying promising biorefinery product platforms using a process-centric approach for product selection. For example, the National Renewable Energy Laboratory or NREL (Werpy and Petersen 2004) and Pacific Northwest National Laboratory or PNNL (Holladay, Bozell and al. 2007) have presented process-centric methodologies in order to identify promising bio-based and lignin-based products. The methodologies are driven by the review of preliminary economic and technical potential, a screening based on chemical functionality, the determination of technical barriers based on best practices, and the potential for each building block chemical to produce a range of derivatives. In another example, a roadmap of the most promising value chains in Canada was developed by Penner (2007) using a product-centric approach, mainly based on market drivers and product feasibility. This approach considered national and regional analyses characterizing opportunities from product and market perspectives, supporting the potential to develop company-specific supply chain strategies.

More recently Forest Products Association of Canada, in collaboration with Canada's national forestry research centre FPInnovations, led a project (entitled *The Bio-Pathways Project*) to investigate opportunities for producing a range of bio-products from wood fibre (Forest Products Association of Canada 2010). The methodology involved (1) examining the potential economic, social and environmental benefits of a set of technologies, (2) defining a set of promising bio-pathways considering their potential to create employment and enhance sector competitiveness, (3) considering the global market potential of emerging bio-energy, bio-chemical and bio-products - key drivers for establishing market value, fostering innovation and deploying technology were examined.

Forest product companies that are considering biorefinery implementation should employ both market-driven and process-driven approaches within the strategy-building framework (Chambost and Stuart 2007). Specific elements such as the potential to penetrate markets, to create synergies in existing supply chains, the selection of partners for market risk minimization, and the definition of a value proposal are as important as technology identification, process design and implementation when it comes to shaping business models at the corporate level (Chambost, McNutt, and Stuart 2009).

3.1.2.2.2 Product portfolio definition

Figure 3.3 illustrates the complexity of defining a product architecture based on the interaction between product functionalities (what the market expects), technology constraints (capacity limitations, yield, etc.), and product strategies (single product versus multiple product strategies) (Batsy, et al. 2012). The challenges are associated with the definition of a multi-product strategy that ensures profit maximization considering product and process design limitations, for example, by technology pathways (Sanderson and Uzumeri 1995).

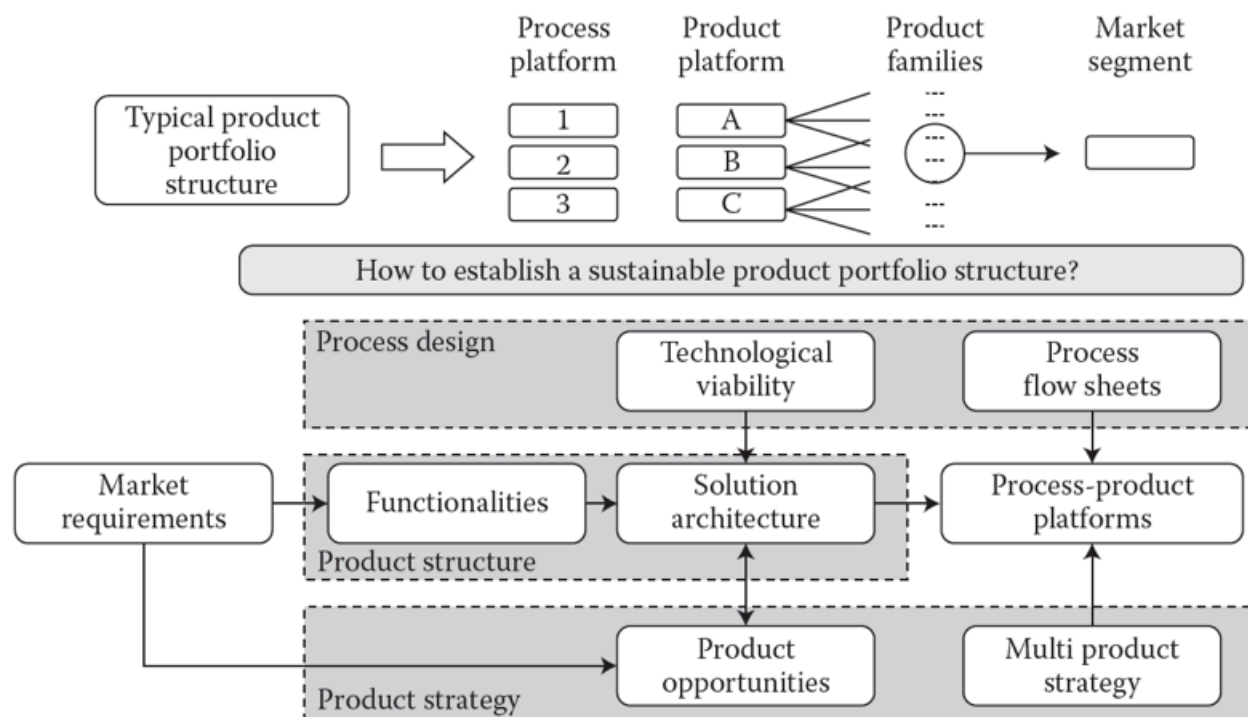


Figure 3.3 Drivers of product portfolio definition. (From Batsy, D.R. et al., Product portfolio selection and process design for the forest biorefinery. In M.M. El-Halwagi and Stuart, P.R. [eds], *Integrated Biorefineries: Design, Analysis, and Optimization*, CRC Press, 2012.)

When commodity products such as biofuels are targeted, limitations in production volume, price volatility, and uncertain energy policy may endanger the viability of the business model. A driver for the success of the biorefinery implementation is the development and management of a robust product platform (Chambost, McNutt and Stuart 2009). Inspiring from the experience of conventional refineries that yield a good deal of their margin through the sale of a relatively small amount of product, the biorefinery product family should include the production of building block chemicals as well as the production of added-value derivatives (Figure 3.4). The systematic development of the biorefinery product portfolio should enable margins maximization, margins stabilization through production flexibility, and risk mitigation considering the phased implementation of the biorefinery.

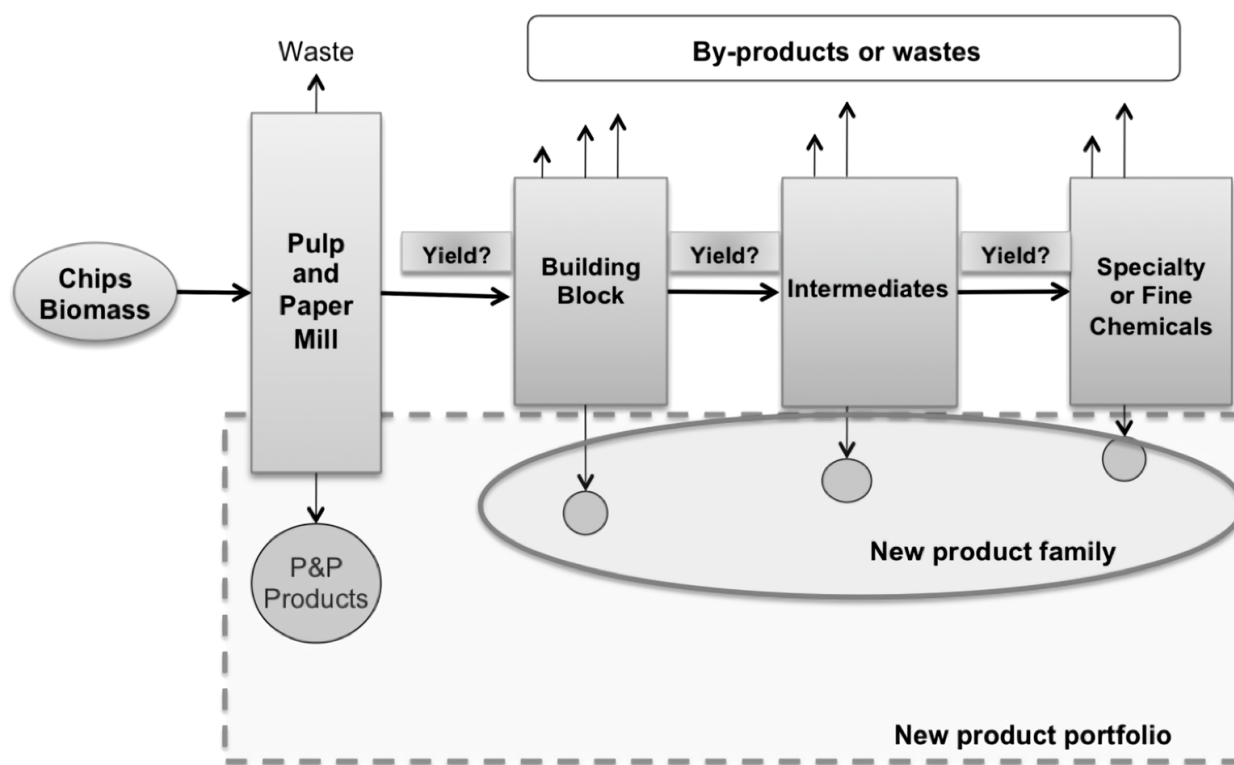


Figure 3.4 Generic representation of product portfolio resulting from biorefinery implementation. (Adapted from Chambost, V., J. McNutt and P.R. Stuart, Partnership for successful enterprise transformation of forest industry companies implementing the forest biorefinery. Pulp and Paper Canada, May/June 2009.)

3.1.2.2.3 *Some critical elements of transformational biorefinery business models*

Business models for successful biorefinery implementation should consider external factors for attracting potential investors:

- Transformational strategies that imply minimum technology risk, mitigated through the systematic appraisal of technology and process maturity.
- A technology plan that explicitly serves a strong business plan, which is implemented in a phased manner through the development of the product portfolio.
- Transformational strategies that rely on a secure and long-term plan for fibre supply agreements based on volume and price.
- Market strategies that support the gradual development of product portfolio profitability, including long-term off-take agreements for the products or partnership definition for value chain penetration.
- The financial situation of the proponent company needs to be robust, relative to the risk implied by the strategy.

Internal success factors should be defined in order to minimize the likelihood that the new business model becomes obsolete over the longer term. Even if technology selection may lead to *short-term competitive advantage* in terms of first-of-kind implementation and production costs, *over the longer term*, competitive advantages will be driven by the market and supply chain synergies that enable value chain penetration for each product of the biorefinery portfolio.

For building robust transformative business models that take into account external and internal success factors, an interaction between technology and business plan development is essential (Figure 3.5).

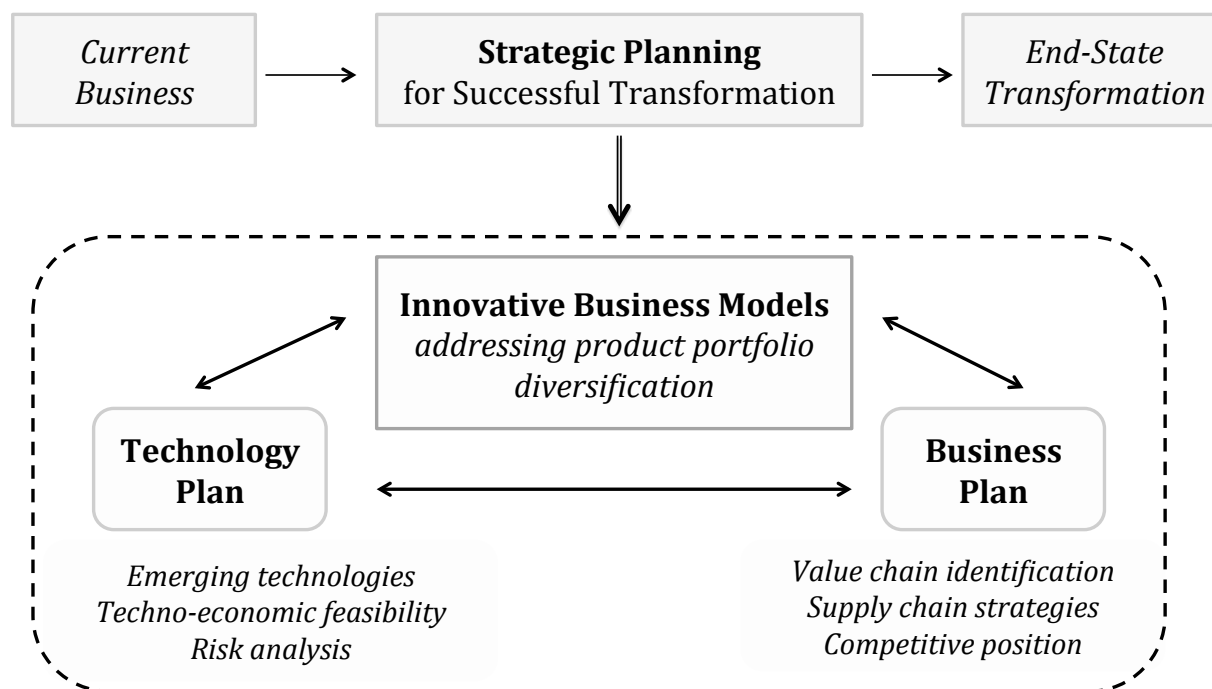


Figure 3.5 Concept of integrated business and technology plan development for innovative transformative business models

3.1.3 Market and competitive assessment of transformative biorefinery strategies

3.1.3.1 Market value potential

The primary objective of a market assessment is to identify product/market combinations that will potentially lead to value creation over the longer term. The success of new product development relies on the fine-tuning of the market assessment accomplished through an iterative process. It involves reevaluation of the strategy as the product is developed over time in order to ensure (1) functionality and fit on the market, (2) optimum pricing and distribution strategy, and (3) the ongoing recognition and mitigation of market risks and uncertainties.

3.1.3.1.1 Strategic Corporate Planning as a Driver

Strategic planning is essentially driven by the objective of targeting a corporate vision and mission, setting specific benchmarks for success in specific time frames. Ranging from low-risk objectives to higher-risk diversification targets, product/market strategies associated with long-term business growth can be presented in the Ansoff Matrix (Ansoff 1980) (Figure 3.6). This matrix is used as a marketing tool and characterizes four ways of business growth while considering the level of risk associated with each strategy – low-risk strategies are associated with business-as-usual while higher-risk strategies involve market expansion and/or new product development.

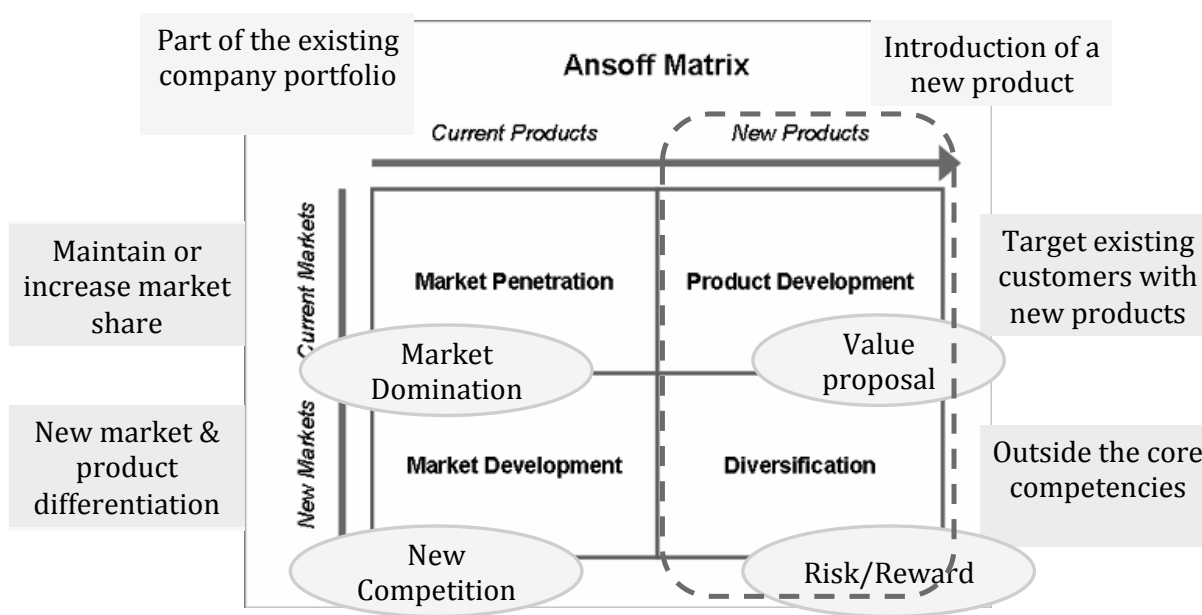


Figure 3.6 Ansoff Matrix for product/market strategies for targeted corporate growth objectives

In the case of forest company transformation through biorefinery implementation, corporate drivers can be difficult to define. The culture in place in the forest products industry must emphasize short-term objectives that have a positive impact on the core business, and it is difficult to justify riskier transformational strategies seeking revenue increase and improved returns over the longer term. Since transformation to the biorefinery is not yet considered as an essential strategy for many forest companies, biorefinery projects are in competition with core business improvement projects involving less risk and having competitive returns.

As introduced in Figure 3.2, the business model for the biorefinery should be supported by a robust market strategy. Identifying and developing the market strategy relies on two major activities: (1) value creation through the assessment of market potential over the short and longer-term, and (2) value retention through the definition and maximization of competitive advantages associated with the product and/or process strategy (Figure 3.7) (Forest Products Association of Canada 2011).

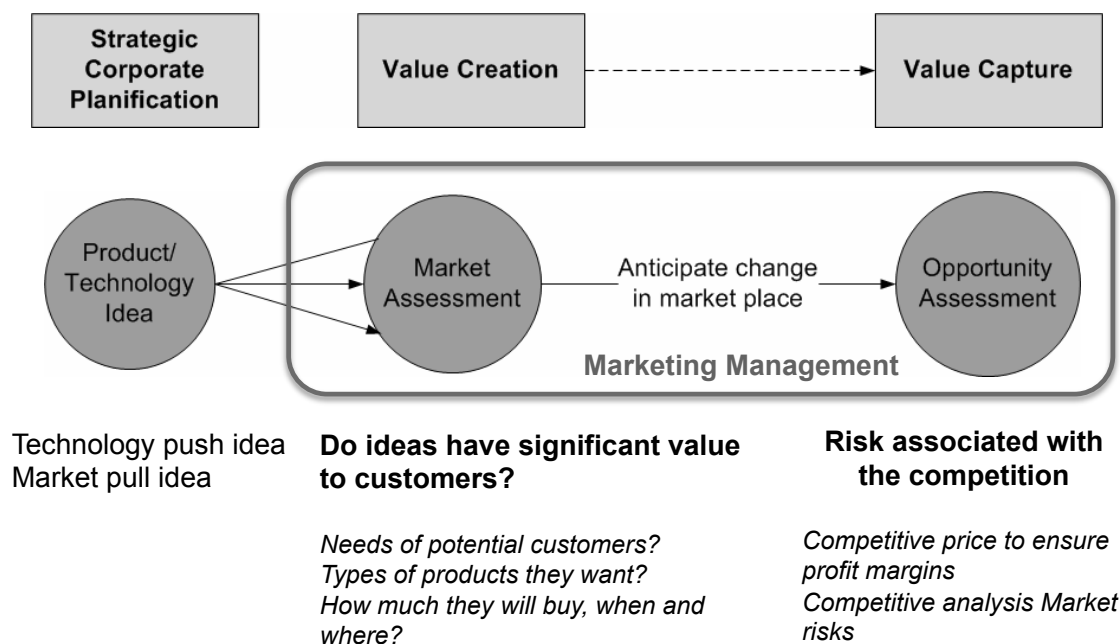


Figure 3.7 Value creation and capture through market management

3.1.3.1.2 Types of bioproducts and associated market strategies

As part of the business model, the marketing plan should be the expression of the market strategy over the short, mid and long-terms - and should identify risks and mitigation strategies. The methodology for the development of a marketing plan includes (1) characterizing potentially promising market segments, (2) identifying the potential for creating value on those segments, (3) determining the competitive position and associated competitive advantages that may enhance market positioning, (4) defining and selecting the best approach to penetrate identified market segments considering long-term viability and market uncertainty, and (5) expressing the chosen market strategy in terms of value proposal, pricing and distribution strategies.

In addition to pulp and paper products, non-traditional biorefinery products that comprise the new product portfolio will have different market potential and market strategies. Products can be characterized as *commodity*, *specialty*, or *niche* products in regards to the type of markets that are targeted, mainly in terms of differentiation potential and market volume (Figure 3.8). Competitive advantages that a company may build are typically the result of the following factors: (1) existing value chain drivers that affect the value proposition for each product, and determine the potential of targeting commodity versus specialty markets, (2) the potential to create barriers-to-entry for prospective competitors in specialty markets considering that their presence will ultimately turn today's specialties into a commodities in the future, (3) 'cost leadership' for commodities and 'unique differentiation' for specialties and niches, allowing for an enhanced influence on the market (Chambost, McNutt, and Stuart 2009).

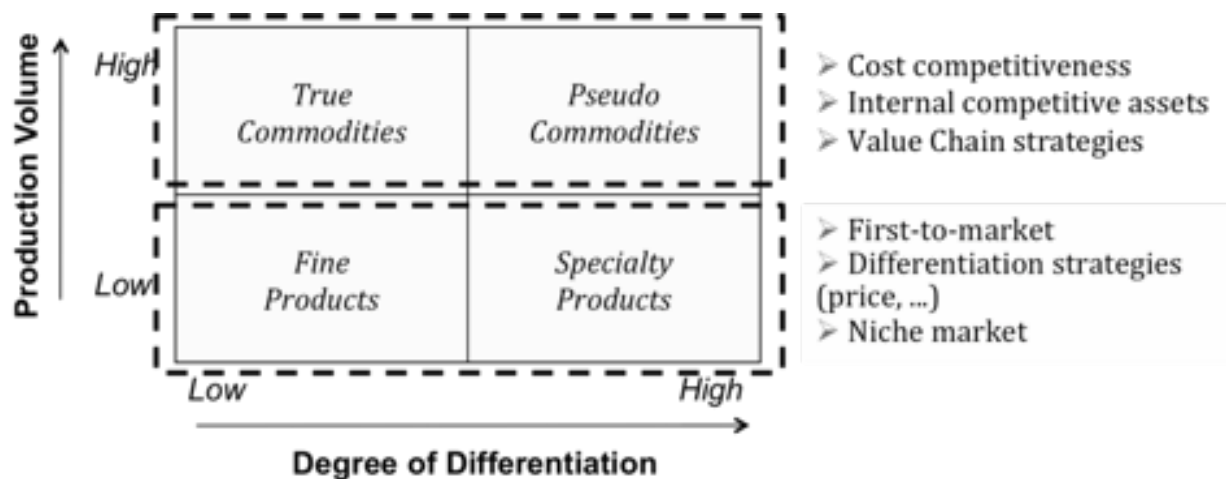


Figure 3.8 Market strategies for different product types

Biorefinery products can also be characterized as being *replacement*, *substitution* or *breakthrough* products in regards to what they replace on targeted markets. Replacement products have identical chemical composition and target existing mature supply chains, such as biopolyethylene. Products are considered substitution products if they have similar or enhanced functionality/performance compared with products currently in the market, while having a different chemical composition, such as polylactic acid as a substitution for polyethylene terephthalate. Breakthrough products target enhanced performance or new functionality compared to existing products, such as it is the case for biocomposites compared to existing composite materials. Regardless of the type of new product, existing value chains must be assessed in order to evaluate new product positioning on the market, possible point-of-entry on the value chain, and the potential for competitive advantage.

3.1.3.1.3 Product portfolio considerations during market assessments

Using a market-centric approach, Chambost and Stuart (2009) defined a step-by-step methodology for the systematic assessment of potentially promising biorefinery product portfolios (Figure 3.9). It consists of four main activities: (1) assessment and characterization of markets for individual products comprising the product portfolio, (2) assessment of potential value creation through the development of a “product family” of bioproducts, (3) definition of a company-specific supply chain for the sale of the product portfolio including the core business product portfolio, and (4) identification of possible partnerships that mitigate market risk and facilitate product positioning.

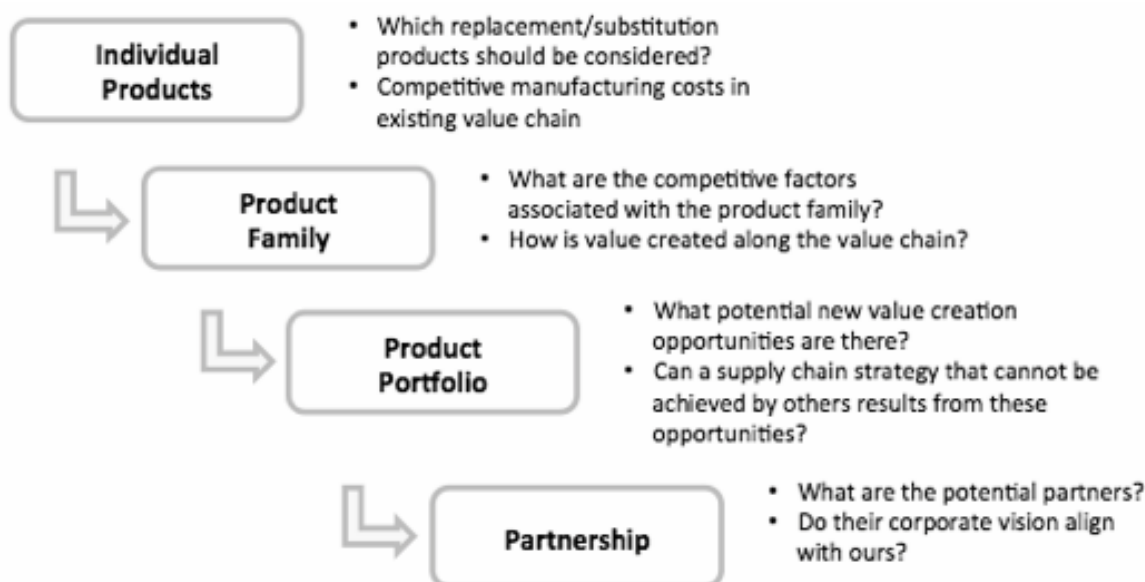


Figure 3.9 Systematic methodology for biorefinery product portfolio assessment.

Classical indicators needed to assess the market potential associated with a product include the following: (1) market volume, value, and potential growth; (2) price volatility associated with the substituted product on the market; (3) market penetration options including potential for partnership; (4) “green” market potential and associated penetration potential in terms of market share and revenues; and (5) market risks.

The identification of potential competitive advantage is a prerequisite for the adequate definition of market strategies for new bioproducts. This can be achieved through the assessment of different points-of-entry in existing value chains, along with an understanding of competitive positioning.

Assessing the life cycle of a product from a market perspective can be a practical tool that helps to better understand market segments, potential market value and the arena of competitors. It consists in identifying the stage of development achieved by the product on a given market segment – introduction, growth, maturity, or decline. Stages are characterized by different levels of competition and risk due to market volume, barriers-to-entry for new competitors, price rivalry - implying different strategies depending on the maturity of the value chain.

Given that product families resulting from biorefinery processes are comprised of combinations of commodity and specialty products, approaches for mitigating market price volatility risks are different from one product to the other. Commodity markets are characterized by high volume and low margins, and prices tend to rise or fall with business cycle due to fluctuations of raw material prices in a highly competitive environment (Regnier 2007). Specialty products however, are subject to less volatility and lead to more stable and higher margins (PricewaterhouseCoopers 2009).

Developing a biorefinery product portfolio that combines commodity and specialty products should be considered as an opportunity for developing certain transformation strategies that mitigate market price volatility risk, and stabilize margins.

- *Manufacturing flexibility* should allow change from one manufacturing regime to another, adapting the product portfolio yields with market volatility. This strategy might require higher capital and operating costs, however it should lead to substantially higher margins under all market price volatility scenarios (Mansoornejad, Chambost and Stuart 2010).
- *Combining contract and spot sales strategies* should enable enhanced price control and margins generation. Supply chain operating strategy taking into account spot/contract sales strategy and manufacturing flexibility should be part of the value proposal representing the potential for competitiveness improvement (Dansereau, El-Halwagi and Stuart 2009).

Besides optimizing operational effectiveness and flexibility, the supply chain strategy should in many cases involve the creation of quality partnerships that help to retain value, mitigate supply and distribution risks, facilitate value chain penetration, and create competitive advantages.

Important drivers to be considered for creating viable and sustainable partnerships should include (1) the strategic compatibility of business models and visions between the two partner companies. It is not obvious to identify a balanced business model serving both interests, each company having different level of risk acceptance, financial capacity, objectives over the short, mid and long term. (2) Access to the long-term capital resources required for developing and sustaining the biorefinery strategy. (3) Manufacturing flexibility needed to respond or anticipate market and/or technology disruption, allowing the product portfolio to evolve with time and achieve higher competitive advantages (Chambost and Stuart 2007).

3.1.3.2 Competitive analysis

As it is essential to identify the value that a product can bring and how the combination of several products within a portfolio can generate more value, it is also crucial to define the potential of a company to retain this value through its unique competitive position. Performing a competitive analysis requires that the company characterize the drivers for profitability within the targeted value chain, and provides a framework for securing its profitability over time relative to the marketplace (Porter 2008). In order to characterize potential competitive advantages, it is necessary to understand such factors as (1) the competitive environment associated with the targeted value chains, (2) the drivers that impact the value chains and product price, and (3) the risks and mitigation strategies associated with penetrating the value chains.

An approach commonly used for analyzing the competition is the one defined by Porter (2008) based on the identification of Five Forces that shape the competitive landscape: (1) direct competitors, (2) new entrants, (3) power of suppliers, (4) power of buyers, and (5) substitute products.

An analysis of the direct competitors provides an understanding of the market share potential, which is also an indicator of the value achievable by targeting a specific market segment. The intensity of the competition is assessed considering the number, relative size of competitors, market growth, and the presence of high barriers to enter. The type of product also plays a major role in identifying the drivers of the competition – generally being cost driven for commodity products and performance/quality driven for specialty products.

The threat of new entrants comes from competition drivers such as market price relative to production costs, and investment rate. The level of threat depends on barriers-to-entry created by existing players on the market including for example unique supply chain access, production economies of scale, capital requirements, or regulations. Besides barriers-to-entry, cost reduction strategies will likely be a deterrent to potential new entrants to the market. The ability to moderate production levels or even cease production when market conditions are not favourable, should also be considered as a competitive advantage (Oster 1999). This latter factor will be especially critical for substitution and breakthrough bioproducts.

The bargaining powers of suppliers and buyers have a similar impact on the potential competitive position of a company in a new market, especially if companies are vertically-integrated. For example, forestry companies who have retained their cutting rights and who manufacture wood-based as well as pulp and paper products have a considerable competitive advantage when transforming to the bioeconomy. Further along the value chain, the concentration of suppliers to a targeted market segment, as well as the switching costs to change suppliers for market intermediates, enables the definition of value chain dynamics and associated competitive factors. From a buyer perspective, concentration as well as the potential to switch from one supplier to another due to standardization of the product may lead to a strong pricing negotiation position. Since any player on a value chain is successively a buyer or a supplier depending on its position on the value chain, the *supplier matrix* (Figure 3.10) can be developed in order to assess the company's competitive position relative to other actors upstream and downstream, where a monopsony is essentially where the buyer drives a monopoly.

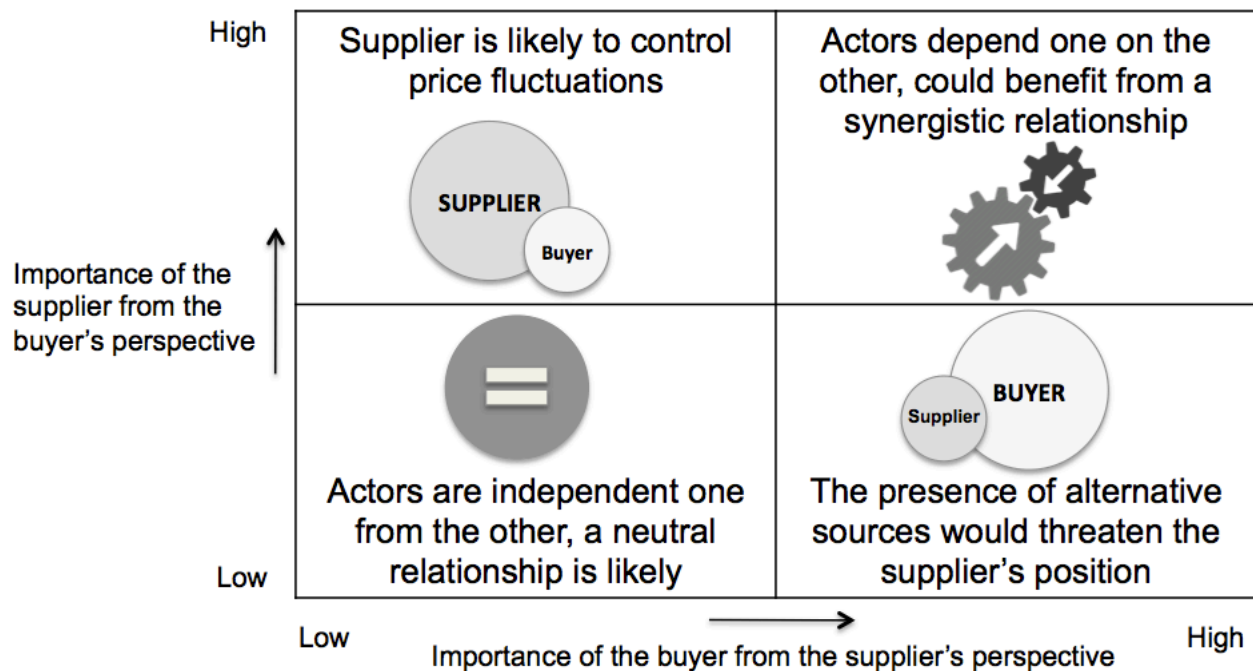


Figure 3.10 Supplier matrix to help assess competitive position in the supply chain. (Adapted from Oster, A.M., *Modern Competitive Analysis*, 3rd Edition, New York, Oxford University Press, 1999.)

The last competitive force is associated with substitute products, i.e. the threat of a larger offering fulfilling partially or completely the same needs on the market. The threat is high if a substitute product offers an attractive price-performance trade-off, coupled with low switching costs for the buyers (Porter 2008). An example of this may be that of biodiesels made from different second generation biomass feedstocks such as algae having different performance. Whether buyers actually switch to substitute products or not, the presence of many substitutes reduces profitability by implicitly imposing a ceiling on prices. A parameter that represents this limitation is the cross-elasticity of demand, represented by the ratio of the percentage change in demand for one product, in response to an increase of one percent of another product's price. Cross-elasticity generally has positive values for substitute products implying a competitive environment (Oster 1999), leading to lower profitability.

Based on the competitive assessment using the Five Forces framework, a set of key variables should be defined and used in order to evaluate the value proposal against the competition, and to position the biorefinery product portfolio over the long term. From this analysis, forestry companies can assess barriers to entry via production cost advantages, unique product attributes/quality, unique value chain potential, etc. Different price scenarios considering the competitive landscape should be defined. Most importantly the competitive assessment leads to the definition of certain market and business risks associated with the biorefinery implementation.

Market potential analysis combined with competitiveness analysis should lead to the determination of adapted strategies for the penetration of value chains. For each potential biorefinery option that a forestry company may be considering, a systematic evaluation of the Strengths and Weaknesses, along with potential Opportunities and Threats from the external environment – widely known as SWOT analysis – is an important complementary tool to understand the competitive position of the company and shape a strategy from there. Through the creation of additional advantages that balance identified weaknesses, the SWOT analysis should lead to the definition of a more robust transformative strategy.

3.1.4 Practical approach for the evaluation of biorefinery strategies

Evaluating the gamut of potential biorefinery strategies available to forest product companies in order to determine which of these can offer the greatest competitive advantage, can be a daunting task. Product design involves the screening of less viable ideas among the set of possible alternatives, with the aim of identifying the few that can potentially be converted into successful products (Cussler and Moggridge 2011). It is critical that forestry companies use product design in a structured manner to evaluate the set of promising transformation strategies, in conjunction with opportunistically testing technologies and their business and economic advantages one-at-a-time.

Three main product evaluation approaches can be identified from the literature [(Killen, Hunt and Kleinschmidt 2007) and (Cooper 2001)] namely, (1) benefit measurement techniques, (2) economic models, and (3) project portfolio optimization methods.

The first approach recognizes the lack of accurate data at the early stage of the design process, and is often based on the usage of subjective criteria such as the alignment of the project with the corporate global strategy, the order-of-magnitude capital cost associated with the project, the attractiveness of potential markets, or the potential competitive advantages the project could provide to the corporation. This approach typically includes methods such as checklists and scoring models, which allow a preliminary and quick screening of possible options.

Economic models consider each project as an investment for which economic targets can be estimated. The decision is based on indicators such as Net Present Value (NPV), Discounted Cash Flow analysis (DCF), or Internal Rate of Return (IRR). The availability of uncertain data at the early design stage is the main limitation of these methods, and statistical methods such as Monte-Carlo analysis can be coupled with economic models in order to support economic estimations under uncertainty.

The third class considers that projects are not evaluated individually but rather as part of an overall project portfolio of the company. Constraints such as budget might be applied, thus turning the decision-making problem into a mathematical problem, where a parameter (IRR for example) should be optimized using a set of constraints. The complexity of these methods has limited its applicability in practice [(Enea and Piazza 2004) and (Kornfeld and Kara 2011)]. The main advantages and disadvantages of some commonly used methods are summarized in Figure 3.11.

Type of Method	Subtypes Presented Here	Basic Purpose	Major Advantage	Major Disadvantage
Numerical, Ranking Methods	Scoring Models	Rank candidate projects in order of desirability. Managers fund projects in order, until resources are exhausted.	Completely transparent, easy to use, readily understandable	May give impression of false precision. Requires significant input from higher management.
	Analytic Hierarchy Process		Allows criteria to be disaggregated into several levels.	Requires extensive input from functional and higher management.
Numerical, Economic Methods	Payback Period	Evaluate economic payoff.	Simple to use and understand; very robust against uncertainties. Direct comparison with capital budgeting.	Does not account for time value of money. Required data may not be available for some projects such as basic research.
	Net Present Value	Evaluate economic payoff, including time value of money.	Easy to calculate using spreadsheet; direct comparison with capital budgeting.	Required data may not be available for some projects such as basic research.
	Internal Rate of Return			
Numerical, Optimization Methods	Portfolio Selection	Choose portfolio of projects that maximizes some measure of payoff.	Allows use of multiple criteria for selecting an entire portfolio of projects.	Extensive computations required for large project portfolios.
Real Options	Projects as Options	Reduce risk by selecting best combination of alternatives.	Reduces both downside and upside risk associated with projects.	Requires extensive data and analysis.

Figure 3.11 Summary of project selection approaches. (From Martino, J.P., Project selection. In D.Z. Milosevic [ed.], *Project Management Toolbox: Tools and Techniques for the Practicing Project Manager*, 19-66, 2003.)

3.1.4.1 Multicriteria decision-making

Transformational projects are distinct to investments in the core business. They represent a higher-risk investment, sacrifice capital that could otherwise be available for strengthening the core business, and a dilution of focus. On the other hand transformation is essential for every company in the longer-term, especially when disruption occurs in the marketplace such as the case in the forest products industry today.

For transformation decision-making, a multidisciplinary approach is needed considering a wide range of market, technology, environment and other factors. There exists risk in each of these decision-making elements due to scarcity and uncertainty of data. Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) is an increasingly-used, appropriate tool to assist in making well-informed and balanced decisions considering this environment. The MCDM approach requires that a series of multidisciplinary analyses be conducted on each transformational product/process option, including for example (1) competitive assessment of each product portfolio, (2) techno-economic assessment, (3) environmental analysis, i.e. Life Cycle Assessment (LCA). The MCDM consists of two phases, as illustrated in Figure 3.12: (1) the pre-panel activity and (2) the panel activity. Pre-panel activities include definition of decision-making objectives, presentation of candidate biorefinery strategies, and introduction of the set of decision criteria. The MCDM panel itself is a one-day activity during which the meaning and significance of each criterion is discussed leading to the elicitation of panel member preferences, and assessing a weighting factor for each criterion. The process of gathering panel member preferences and the mathematical method to calculate weighting factors differs with the type of criteria that might be used. Most common MCDM methods include the “multi-attribute utility theory” (MAUT) and the “analytical hierarchy process” (AHP) (Wang, et al. 2009).

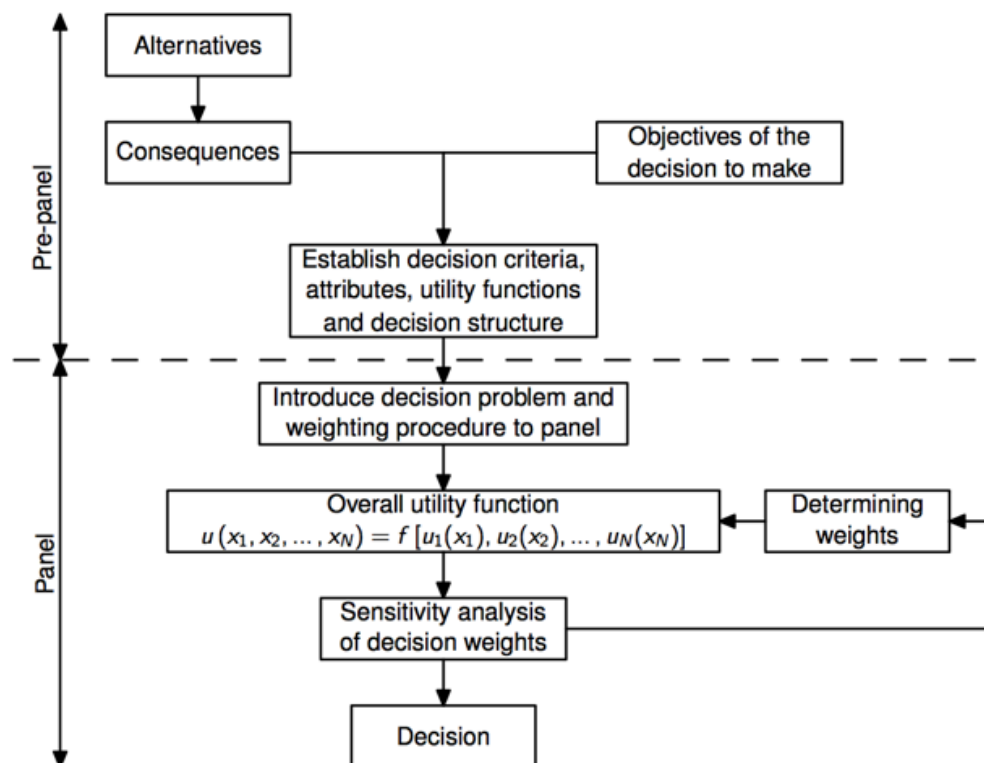


Figure 3.12 Overview of multicriteria decision-making (MCDM) methodology. (From Janssen, M. et al., MCDM methodology for the selection of forest biorefinery products and product families, International Biorefinery Conference, 2009.)

The MCDM panel session is conducted with a multidisciplinary panel, ideally of 6-8 participants including a wide range of company perspective (business, technology, financial, environmental). The outcome of the MCDM activity is to allocate a score to each biorefinery strategy, calculated based upon two parameters: (1) utility value (the normalized value of each criterion), and (2) weighting factor (a value between 0 & 1 that represents the preference of decision-makers). Utility values are calculated using the results of techno-economic, market and environmental analyses, while weighting factors are estimated through values expressed and justified by MCDM panel members. Figure 3.13 summarizes how criteria are organized for different biorefinery alternatives.

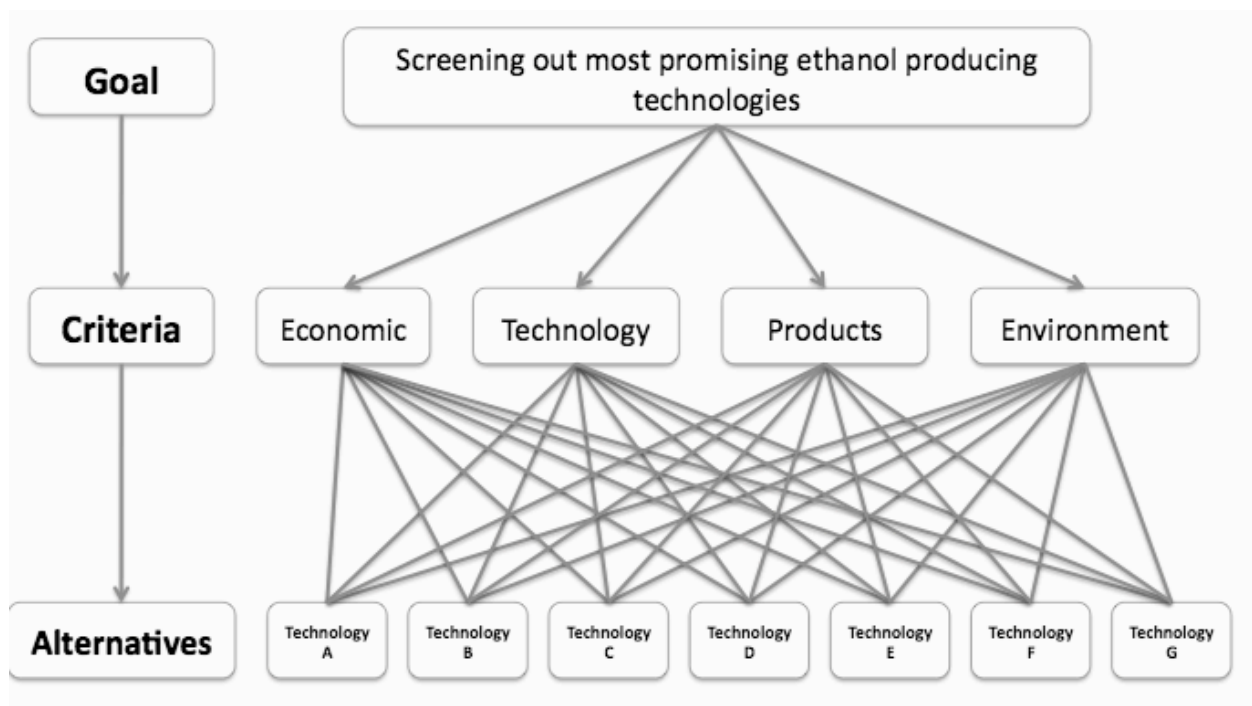


Figure 3.13 Summary of MCDM criteria organization

Sanaei (2014) presents a review of cases in which the MCDM tool has been employed for decision-making in the biorefinery context. In occurrence, Cohen et al. (2010) and Quintero-Bermudez et al. (2012) used it for analyzing emerging ethanol production technologies. As well, Sanaei, Chambost, and Stuart (2014) used it for assessing alternatives for the development of greenfield triticale biorefinery.

Financial and capital performance metrics are typically used for capital spending decisions but have limitations when considering the unique strategic biorefinery investment. Competitive and environmental metrics should also be considered in order to ensure the sustainability of the decision-making (Batsy et al. 2012). A social aspect could also be incorporated in the definition of decision criteria in some cases; however, this perspective has not yet been widely covered in the literature and remains an area for future development.

3.1.4.2 Techno-economic criteria

Besides financial and capital performance metrics such as return on investment or internal rate of return (IRR), Hytönen et al. emphasized the importance of a better analysis of the process and economic risk associated with a specific technology along with the business transformation potential that the project may imply. More than one profitability metric is typically considered to accurately express the underlying risks and uncertainties of different capital spending scenarios.

In this regards, Sanaei and Stuart (2014) suggested dividing techno-economic indicators into two categories, where profit-oriented and strategy-oriented criteria are distinguished (Figure 3.14). A subset of these six criteria is typically used to reflect downside return or whether the strategy can be substantive enough to reach revenue diversification objectives.

Criteria		Interpretation
Profitability Oriented Criteria	Internal Rate of Return	Profit/risk ratio associated to the business model, estimated under normal market conditions.
	Downside Internal Rate of Return	Viability of the business model under the worst predicted market conditions.
	Return On Capital Employed	Value the project generates from the capital invested.
Strategy Oriented Criteria	Revenue Diversification	Ability of the project to improve its margin, to mitigate volatility on a specific product, and to provide a back up for the core business product.
	Ability to Respond to Unknown Changes	Capability of a project to maintain a positive free cash flow under unpredictable changes in the business environment.
	Resistance to Supply Market Uncertainty	Robustness of the strategy in regards to highly volatile raw materials, especially petroleum-based raw materials and energy cost.

Figure 3.14 Profitability- and strategy-oriented techno-economic criteria. (Adapted from Sanaei, S. and Stuart, P., *Biofuel. Bioprod. Biorefin.*, DOI: 10.1002/bbb.1499, 2014.)

3.1.4.3 Market and competitiveness criteria

Besides economic risks that are inherent to every transformation and investment project, issues related to transforming the company business model over the longer term in terms of impact on the core business, portfolio diversification, market penetration and partnership options should be considered as part of the decision-making framework. For example from the financial point-of-view, access to capital can represent a major limitation for a project appropriation. Several indicators can be defined to illustrate this, such as (1) the amount of capital required for the investment, (2) the potential to attract investors or to involve stakeholders in the project, (3) the potential to secure financial support from the government in the form of subsidy or grant to lower the investment risk, or (4) the possibility to divide the project into phases of lower investment and risk.

Important issues to be considered on the market side concern mainly the interaction with actors upstream and downstream on the value chain, and the potential to capture or enhance competitive advantages. Both types of issues should be addressed regarding the chances of success in the implementation of the project, and the potential to retain value over the long-term. Performing a competitive analysis helps to identify issues specific to the targeted market, and to determine drivers for competitive advantage. An example of market-oriented decision metrics was presented by Diffo and Stuart (2012) for assessing triticales biorefinery alternatives (Table 3.1) including short- and long-term interpretation of each criterion.

Table 3.1 Some Market-Oriented Decision Metrics

Criteria	Competitiveness issue	Interpretation
Competitive Access to Biomass	Is there a long-term biomass strategy in place?	Potential (1) to provide a competitive value proposal to suppliers, and (2) to secure economically viable and long-term access to the feedstock
Product Portfolio Positioning	Is there good potential to secure a competitive position on the market and keep it over the long-term?	Potential (1) to capture market share on existing markets ,and (2) to implement first-to-market strategy on growing future markets
Competitiveness on Production Costs	Do production costs provide competitive advantages?	Potential (1) to compete on a market-price basis, and (2) to create margins for mitigating price volatility
Margins Under Price Volatility	Is there a potential to remain competitive under price volatility?	Potential (1) to survive under unfavorable conditions, and (2) to generate high margins under favorable conditions
Technology Strategy Related to Market Competitiveness	Is there a potential for a clear and incremental technology strategy that serves the business strategy?	Potential (1) to face short-term capital investment constraints, and (2) to easily adapt the strategy when required

Source: Diffo, C., and Stuart, P., Market competitiveness assessment for forest biorefinery product portfolios selection. Presentation at the BIOFOR Conference, Thunder Bay, ON, May 14, 2012.

3.1.4.4 Environmental metrics

Reasons to consider environmental decision criteria are numerous; however, these are not always been central in the decision-making process. The rise of environmental concerns in response to global warming issues and the predicted shortage of fossil resources is resulting in (1) higher expectations in terms of green standards from customers, and (2) in development of governmental policies. It is unlikely that a project having a relatively poor environmental performance will be selected against other alternatives.

Environmental impacts of a product or a project are commonly evaluated using Life-Cycle Assessment (LCA) (Mu, et al. 2010). LCA considers the inputs and outputs implied across the life cycle of the product from raw material extraction to end-of-life, and evaluates their potential impact (International Standard Organization 2006). LCA provides an understandable vision of the environmental trade-offs occurring at different steps of the product life cycle, and should be suitable to generate decision metrics to differentiate between prospective transformation strategies. Gaudreault, Samson and Stuart (2009) developed a set of criteria adapted to the biorefinery context using end-point impacts of the IMPACT 2002+ software (namely human health, ecosystem quality, climate change and resources) and additional indicators including aquatic acidification, fresh-water input and cropland occupation.

However environmental indicators present the challenge of being complex, and in the case of MCDM panels, not easy to interpret for decision-makers who are not familiar with LCA. Liard et al. (2011) highlighted the importance of normalization and the definition of normalization factors specific to the context, in order to have a better perspective of spatial scales of the impact categories in MCDM, as summarized in Table 3.2.

Table 3.2 Description and scale of environmental criteria

Criteria	Description	Scale
Human health	Damages on human health that any substance can have due to its toxic and respiratory effects, as well as ionizing radiation and ozone layer depletion it creates.	Local
Ecosystem quality	Degradation of ecosystems relative to ecotoxicity, acidification and nutrification of terrestrial systems, land occupation, ecotoxicity, acidification and eutrophication of aquatic systems, ozone layer depletion, photochemical oxidation, and land occupation.	Regional
Green house gas emissions	Amount of green house gases emitted at each step of the life cycle accounted in the analysis for a given product, in CO ₂ equivalent.	Global
Non-renewable resources	Energy used at each step of the life cycle accounted in the analysis for a given product and generated by primary non-renewable resources and minerals.	Global
Aquatic acidification	Amount of acidifying substances emitted in aquatic systems at each step of the life cycle accounted in the analysis for a given product, in SO ₂ equivalent	Regional
Fresh-water input	Amount of fresh water used at each step of the life cycle accounted in the analysis for a given product. It excludes water that is used and recycled within process loops.	Regional
Cropland occupation	Area used by the biorefinery activities that would normally be used for crops culture, or advantages associated to growing biorefinery feedstock on marginal lands.	Regional

Source: Liard, G. et al., Selection of LCA-based environmental criteria for multi-criteria decision support in a biorefinery context. Presentation at the SETAC Europe 21st Annual Meeting, Milano, Italy, May 2011.

3.1.5 Conclusions

Many forest product companies seek to define long-term strategies for improving their competitive position, while considering diversification and new business model definitions including outside-in transformation models. There have been many lessons learned, even as the forest sector begins to transform. Biorefinery strategies are identified, defined, and assessed considering a phased approach to identify and mitigate risks inherent to the transformation. The phases accomplish the short- and long-term corporate goals for the transformative strategy and imply both technology and business disruptions that have good potential to capture, create, and retain value.

The success of a biorefinery strategy is highly dependent on the targeted product portfolio strategy and its development over the short and long term. The definition and selection of the product portfolio involves both product and process design tools and requires systematic market and process evaluations. The market-driven analysis evaluates the strategic positioning of the new product portfolio considering market potential and uncertainties, while process design tools support product portfolio development and optimization through scale-up phases and incorporating manufacturing flexibility. Decision-making strategy to identify the most preferred biorefinery strategies based on preliminary technology and business plans uses a set of sustainable criteria considering economic, competitive, and environmental criteria.

Part II of this chapter presents biorefinery case studies, considering the fundamental concepts presented here.

3.2 Part II: Transformation methodology and case studies

3.2.1 Introduction

Since the early 2000s, first generation biorefineries (based on sugar, starch and oil feedstocks) have been implemented. Second generation biorefineries (based on lignocellulosic feedstocks) are more recent (Demirbas 2010). As a result, the interest in transformation via the manufacture of bioproducts from wood has increased significantly in recent years on the part of forest product companies. Success is not obvious. Recent examples of failed ethanol projects highlight the difficulties that will be encountered to overcome technology challenges and to penetrate commodity-driven markets while relying on capital subsidy.

However, the biorefinery offers a plethora of technology pathways and product-process combinations, implying different risk levels (Agbor et al. 2011; Maity 2015a, b). These are expressed in terms of a range of characteristics such as maturity of the selected process pathways, product portfolio options over the short- and longer-terms, market positioning and competitiveness of the product portfolio. From the investor perspective, it is essential that the risks and uncertainties associated with the biorefinery be identified and mitigated as part of the development of transformational strategies. There is surprisingly little information in the literature offering a clear pathway for the definition of such strategies in the context of the biorefinery.

Part I of this chapter introduced a set of fundamental concepts critical for the evaluation of transformative strategies. For example, forest product companies should implement transformative business models considering a phased-approach in order to mitigate risks (Chambost, McNutt, and Stuart 2009). Product design tools can be used which consider a market-driven approach to build a successful business plan through market analysis, product life cycle assessment, value chain assessment, and competitive analysis (Ansoff 1980; Chambost and Stuart 2007; Porter 2008). The Ansoff matrix, the SWOT analysis, and the Porter's Five Forces model are among some of the recommended tools critical to gather and critically analyze market and business-driven information. The outcome of this assessment is a clearer understanding of the value proposal of products within the biorefinery portfolio, with the objective of defining a robust product portfolio. Product design tools are supported by process design tools for the definition of a technology plan.

MCDM is increasingly employed in order to guide decision-makers in selecting promising strategies (Janssen, Chambost, and Stuart 2009). MCDM implicates a range of stakeholders relative to the decision, and is supported by (1) a systematic decision-making procedure, and (2) the use of multidisciplinary set of criteria. Evaluation metrics are calculated for each transformation option in order (1) to obtain a contextualized weighting of the criteria, and (2) to calculate overall scores for each of the options. These scores are used to rank the strategies, and to identify the most promising ones for further investigation. Part I of this chapter also provided examples of environmental, techno-economic, and market and competitiveness criteria that could be used in an MCDM.

This second Part of this chapter aims to introduce a systematic methodology for defining a forest product company's business model for the implementation of the biorefinery, considering both technology and market drivers. Many different approaches can be, and indeed are being used by forest product companies to determine preferred transformation options. This chapter presents a systematic methodology based on extensive work in this domain that is proving successful with forest product companies.

The methodology considers the entire design process starting with the identification of possible product-process combinations, through to the implementation of the business model. It integrates a phased-implementation approach, the interaction between business and technology plans, the product design and process design assessment tools, as well as the MCDM tool. First, a stage-and-gate model is introduced in order to capture the vision that brings these elements together into a single methodology. Two case studies treating (1) the early-stage evaluation and decision-making of lignin-based biorefinery options, and (2) the value proposal definition for torrefied pellets production, are used to illustrate certain critical steps of the methodology, for the context of biorefinery implementation in retrofit to forestry companies. We have not elaborated on critical elements of market assessment in this chapter including for example the Ansoff matrix, SWOT analysis, and Porter's Five Forces.

3.2.2 Framework for new product development

In the context of an outside-in enterprise transformation, product diversification implies novelty and risk at several levels of the corporation. The introduction of biorefinery products into the existing company product portfolio requires (1) new technologies and processes to be implemented, (2) penetration/creation of value chains new to the company, and probably (3) new partnerships required to penetrate non-traditional market segments with the new products. Cussler and Moggridge (2011) developed a methodology involving the interaction between market-driven and process-driven factors for new product development. An important distinction was made between industrial and chemical product designs, considering different approaches to product development and structure of the value chain. Industrial product design focuses on *assembled* products which consist in a combination of solid-state components such as razors, bicycles, and computers (Favre, Marchal-Heusler and Kind 2002), whereas chemical product design focuses on *formulated* products, which can be represented by a single chemical or a mixture of chemicals resulting in a set formulation or a microstructure (Hill 2009). Considering the context of the biorefinery, a focus is made on chemical product design.

Several approaches have been presented in the literature to discuss chemical product design process through a logical sequence of key steps (Costa, Moggridge, and Saraiva 2006; Cussler and Moggridge 2011) generally including (1) the identification of new customer needs, (2) the generation of ideas to fill these needs, (3) the selection of the most promising ideas, and (4) the development of the product and the associated manufacturing process. Most of these approaches do not systematically consider the simultaneous development of the product from a technology and a business perspective. In this regard, Seider, et al. (2009) proposed a stage-and-gate approach incorporating the conventional chemical product design approach with the Stage-Gate[®] Product Development Process developed by Cooper (2001a) summarized in Figure 3.15.

The Stage-Gate[®] process consists in a combination of blocks of activities – called *stages* – separated by decision points where the evaluation and approval whether to pursue a given project is made – called *gates*. It is traditionally constituted of five stages and five gates, as illustrated on the top-arrow in Figure 3.15. Projects are run by multidisciplinary teams within the organization including product and technology development, manufacturing, and marketing divisions. Activities within stages (see more detail below) lead to specific deliverables used to support decision-making regarding the continuation of the project. The evaluation of deliverables through a specific set of criteria is performed at each gate, and the decision is either made to (1) continue the project development, (2) kill/abandon/reject the project, or (3) put the project “on the shelf” until gate criteria are satisfied. This decision is usually based on showstopper criteria, while flexible or preference criteria are used to prioritize projects. Several evolutions to the traditional process have emerged with time to make it more flexible to the type and risk-level of the development projects, and to accelerate its time-to-market by overlapping stages and activities (Cooper 2014). Specific activities performed in the stages generally include the following:

- *Scoping*: The objective of this first step is to determine the value of the project from both a technology and business perspective. It consists mainly of a rapid analysis, and gathering key data relative to market and technical feasibility such as market size and forecast, likely acceptance of the product by targeted customers, possible technology pathways, as well as market and technology risk.

- *Business Case*: This point in the process is critical for the identification of a product concept, and the definition of a business plan to support it. Besides verifying the attractiveness of the project, it is critical at this stage to gather the “voice-of-customer” – market needs, desires and preferences – and to convert these into product specifications in order (1) to freeze benefits that will be specific to the new product, and (2) to define the value proposal and the product positioning strategy. This work, coupled with a detailed business and financial analysis, leads to the definition of the business case. At the end of this step a clear definition of the product concept, as well as a roadmap for subsequent development activities should be achieved.
- *Development*: Once product specifications are determined, further activities include the technical work necessary to convert the concept idea into a product that achieves expected performance, and to perform preliminary testing for securing a competitive value proposal. The development stage is considered completed when there is assurance that the product can meet technical and market requirements under controlled conditions.
- *Testing*: Besides product testing, the production process must be designed and the associated economics refined to a greater degree of accuracy. A negative or marginal outcome at this stage is considered as a showstopper, and implies a refinement of the project at the development stage. Typical activities might include (1) extended “in-house” tests to validate product quality, (2) testing of the product under functional use conditions to validate performance, (3) operation of the manufacturing process at the demonstration scale in order to identify and correct potential limitations, and estimate production costs more precisely, (4) validation of market penetration strategy, and (5) refinement of business and financial analysis to determine the project economic viability.
- *Launch*: The marketing and production plans are implemented at the desired industrial scale during this stage. Efforts regarding market penetration should be supported by a supply chain strategy in order to enable manufacturing flexibility.

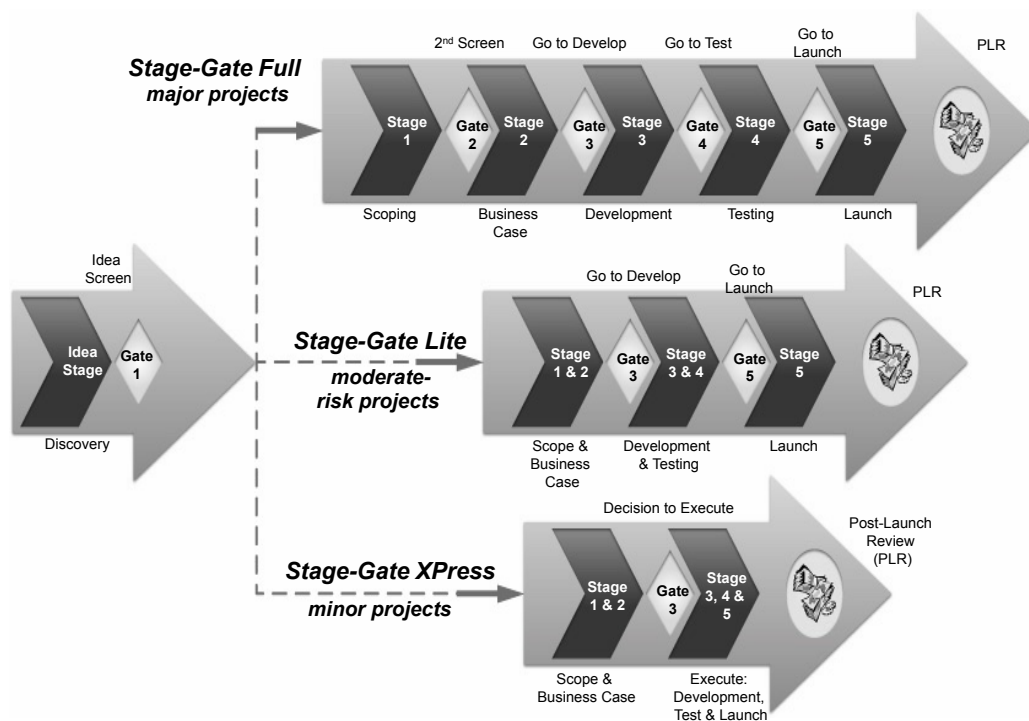


Figure 3.15 Traditional Stage-Gate® Product Development Process and variants. (From Cooper, R.G., *Research-Technology Management* 157, 2014.)

The Stage-Gate® process proposes a systematic approach for new product development; however, it is not obvious how it should be applied for the bioproducts portfolio, in the case of a forest products company implementing biorefinery processes. For instance, time-to-market and supply chain considerations are critical to capture early market share and achieve a competitive position for specialty products – but this is not the case for commodity products. Considering as well (1) risks related to market penetration, (2) the relative lack of investment in new products research and development by forest products companies, and (3) the limited access to capital - a partnership strategy may be critical in the modified stage-and-gate process.

3.2.3 Systematic methodology for transformation through biorefinery implementation

The methodology proposed here follows a stage-and-gate approach and targets the development of innovative business models for the transformation of forest industry companies: (1) an iterative approach combining product and process designs is used for identifying, selecting, and designing robust product portfolios; (2) the technology plan supports the business plan to mitigate risk, to enhance margin creation, and to create long-term competitive advantages; and (3) the product portfolio market positioning should be defined through a systematic assessment of the existing value chains, market potential, and competitive position.

Three main steps are considered in the methodology as summarized in Figure 3.16, where P-P-P refers to product-process-partner combinations.

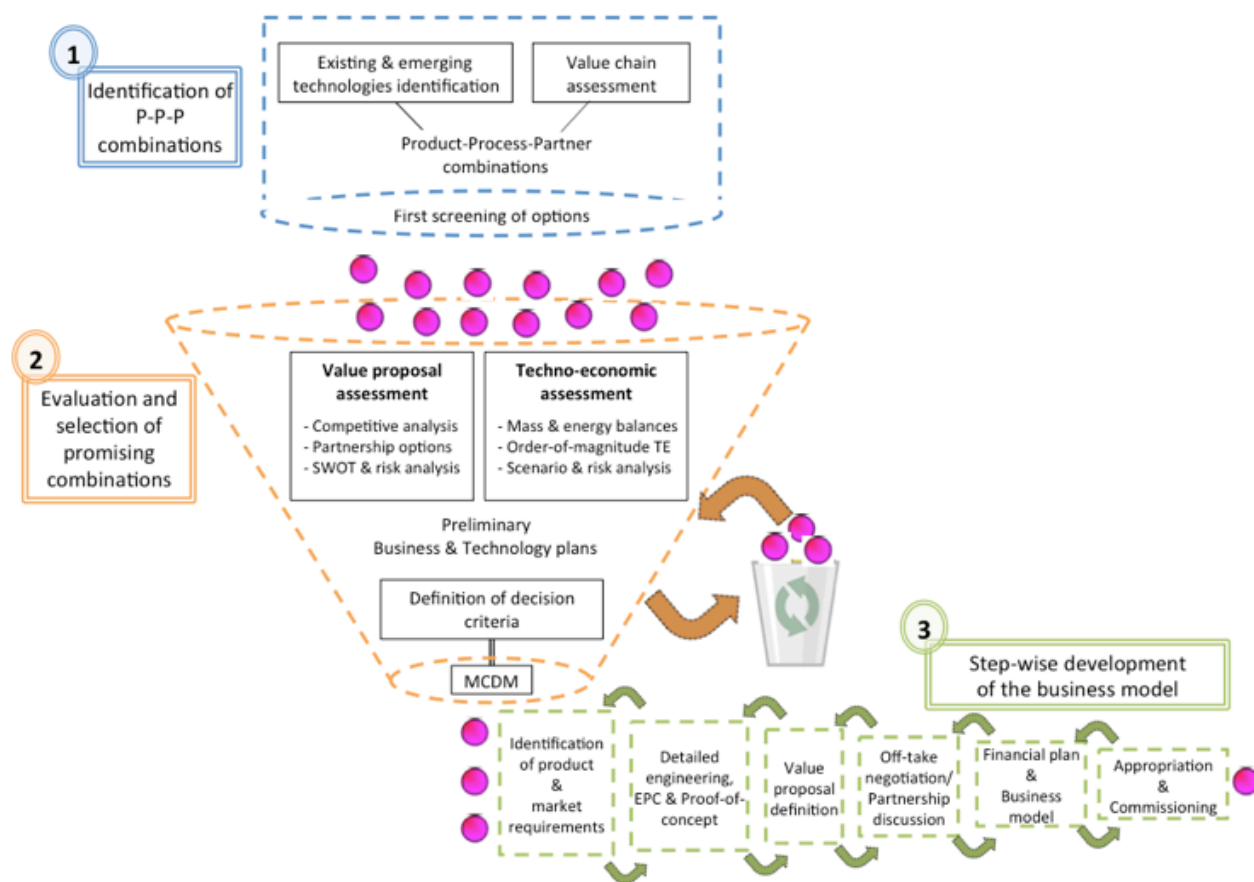


Figure 3.16 Systematic methodology for the definition of biorefinery business models

3.2.3.1 Step 1: Identification of product-process-partner combinations

A set of promising biorefinery product-process options should be identified, defined and evaluated by the forest products company considering the following activities:

- Definition of the company prerequisites for implementing biorefinery options in terms of risk acceptance, existing assets and core business, and business diversification targets
- Identification of a set of biorefinery technologies that meet the company's prerequisites
- Identification of value chains in the vicinity of the mill(s) considered for the biorefinery strategy that can support the development of product portfolios

A set of “showstoppers” should be defined based upon process and market perspectives, in order to narrow the number of options and focus on company-adapted strategies that meet corporate needs over the short and longer terms. For the first screening of biorefinery options, typical showstoppers include the level of technology maturity, the order-of-magnitude of capital investment required, the volume of biomass feedstock required to have attractive economies-of-scale, the magnitude of expected growth for targeted market segments, the order-of-magnitude of the return on investment, and the existence of potential partners to create synergies with.

3.2.3.2 Step 2: Evaluation and selection of promising combinations

Preliminary business and technology plans are developed during this step in order to characterize the economic viability of each product-process-partner combination while identifying preliminary business strategies. The identification of market and technology uncertainties and risks, along with the characterization of the competitive environment are critical activities.

At such an early stage of the design process, there remains significant uncertainty in cost estimates. A “Large block analysis” cost estimating method can be employed, i.e. a base case product-process combination is agreed-on for which costs are developed, and alternatives are compared to the greatest extent possible to this in order to obtain relative cost estimate for the different options. By using this approach, the costs between processes are rendered comparable for decision-making.

A rapid market analysis is performed for the products defined within the portfolio, considering especially the local and regional value chains potential. Market parameters are estimated, including uncertainties in terms of future pricing, future supply and demand for each product. Sensitivity analyses are performed for technology and market uncertain parameters, and the potential impact on profitability. Multiple criteria can be calculated to express the techno-economic, technology, market, and environmental risks, issues and challenges identified along the phased implementation process, considering short and longer-term perspectives.

An MCDM panel with project stakeholders can then be organized in order (1) to fix a set of criteria that would be considered practical and complete enough in the context of the decision to be made, (2) to appreciate biorefinery options in regards to the set of criteria defined, (3) to weight criteria based on their relative importance in the context, and (4) to compare biorefinery option scoring and relative ranking, and elaborate on the most promising ones.

3.2.3.3 Step 3: Stepwise development of the business model

A limited number of biorefinery options – typically not more than 3 – should be retained at the outcome of the MCDM panel. A systematic process including business and technical milestones such as (1) the negotiation of a Letter Of Intent (LOI) for the off-take of bioproduct(s), (2) initiation of potential partnership discussions, if appropriate, (3) feasibility engineering for capital and operating costs, and (4) pilot and demonstration trials, if needed.

The business model is the formal statement of the business goals associated with the biorefinery strategy, along with the plan to implement the project considering the associated risks. The business model for the biorefinery transformation should take into account the following elements:

- *Executive summary*: key business plan elements and summary of risks and key project economics.
- *Business overview*: critical analysis of the current situation and unique value proposal of the project.
- *Market analysis*: market potential and future product positioning on the market as well as competitive analysis.

- *Sales and marketing plan*: market strategy for penetrating value chains while focusing on the off-take agreement/partnership, pricing strategy and distribution strategy, i.e. supply chain policy.
- *Operational plan*: operating strategy focusing on a review of the technology and the associated risk.
- *Project management plan*: project team, and organizational structure.
- *Action plan*: project development schedule through to completion of the project highlighting key milestones.
- *Financial plan*: historical and projected financial performances through balance sheet and bottom line analysis, cash flow projection, scenario and sensitivity analyses including identification of potential funding sources.

An emphasis should be put on the definition of a value proposal supporting the creation of competitive advantages over the longer term. This value proposal should result in the negotiation of a memorandum of understanding and/or a letter of intent with potential off-takers and/or partners, establishing the basis for future terms and conditions for the sale of the biorefinery product(s). It is also critical to consider that the financial plan of the project be well-defined involving (or not) governmental subsidies, bank loans, or private investment.

The following case studies underline the (1) assessment and decision-making and (2) value proposal definition steps of the methodology. These two steps are of particular importance for the definition of successful biorefinery business models. Biorefinery project selection is sometimes done opportunistically or on an *ad hoc* basis by forest product companies, evaluating one transformation possibility at a time, without a consistent process to systematically identify the set of possible options and to aggregate results of their assessments from different perspectives. Another emphasis in the case studies concerns the value proposal definition step to highlight its importance on the creation of competitive advantages and the generation of possible partnerships.

3.2.4 Case studies

3.2.4.1 Case study 1: Evaluation and decision-making of lignin biorefinery options

The context of this case study is a pulp manufacturing facility, manufacturing softwood kraft pulp. The objectives of the case study were (1) to identify opportunities suitable for product diversification in the context of the company considering its current assets (process and unused feedstock), (2) to identify potential partners for implementing the technology and business strategies, and (3) to determine under which conditions each biorefinery alternative would be economically preferred. For this purpose, the company identified promising product-process-partner combinations internally, and then assessed the value proposal associated with each strategy.

3.2.4.1.1 Identification of biorefinery process alternatives

The preliminary analysis consisted of (1) identifying process streams within the existing facility from which value from lignin products could potentially be created without negatively impacting the quality and quantity of pulp, and (2) determining the quality and quantity of biomass potentially available for the transformed site. Process considerations are not the central point of this chapter, and are presented only in a general context.

Possible feedstock-process transformation combinations were triaged based on two drivers:

- The biorefinery project must not impact the quality nor the quantity of market pulp produced.
- The technology risk related to the project should be mitigated via a strategic alliance with the technology provider.

Potential biorefinery feedstocks included hardwood chips, and the black liquor stream produced and recovered by the kraft pulping process. Several pre-treatment processes exist to extract hemicellulose and/or lignin from chips prior to pulping, however the pre-treatment processes generally degrade wood components including cellulose to a certain extent depending on operating conditions, and were considered likely to impact pulp quality. Extracting lignin in black liquor on the other hand has less direct impact on pulp quality, since it affects primarily energy requirements at the mill and amounts of make-up chemicals needed for cooking in the kraft process digester. Lignin precipitation technologies can be used to extract lignin from black liquor in order to target potentially interesting bioproducts. It was estimated that up to 2000 tons per day of hardwood was potentially available. In order to exploit this, a biomass fractionation plant could be built in parallel to the existing pulping process based on this feedstock supply, from which lignin could be isolated and hemicellulose- and cellulose-based bioproducts sold.

Two commercial lignin precipitation processes were retained for further analysis: (1) black liquor acidification using carbon dioxide in order to precipitate lignin, which is separated from the remaining liquid by filtration and washing; (2) black liquor oxidation prior to acidification, in order to facilitate the filtration and washing steps. Principles of operation of the oxidation and acidification process and its integration with the existing pulp producing process are presented in Figure 3.17. The de-lignified black liquor and the washing liquor used to purify lignin are recycled in the chemicals recovery unit in the kraft process.

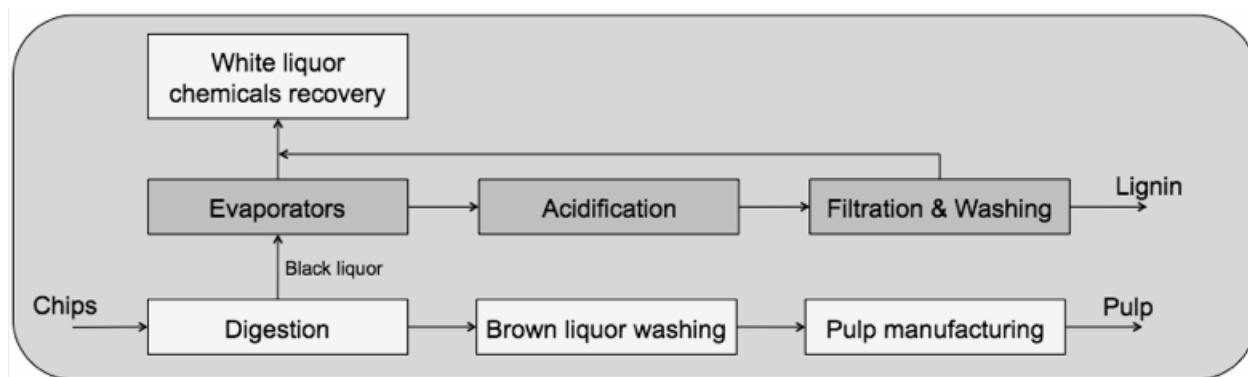


Figure 3.17 Simplified lignin precipitation process

Among other potential technology pathways, a solvent fractionation process was considered that separates wood components into a cellulose-rich stream, and a mixed stream containing lignin and hemicelluloses solubilised in an organic solvent. From these streams, modules of the process include (1) an ethanol production line from the cellulose-rich stream, (2) a solvent recovery unit, and (3) a separation/purification unit that isolates a hemicellulose-rich syrup and extracts lignin of distinctive grades (Figure 3.18).

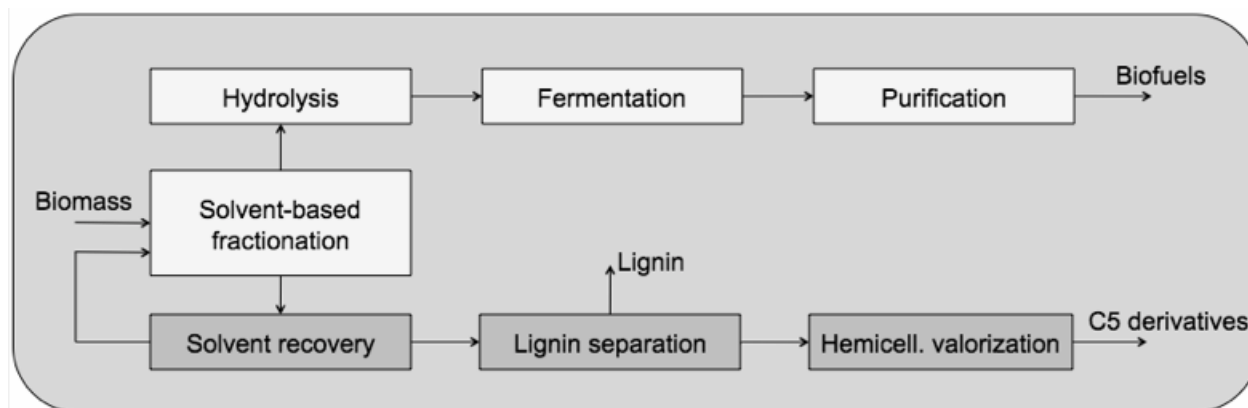


Figure 3.18 Simplified solvent-based biomass fractionation process

3.2.4.1.2 Definition of product portfolios

Either from cellulose, hemicellulose or lignin, a gamut of bioproducts ranging from commodities to added-value products can be manufactured from wood-based feedstocks. Product-process combinations are defined using a phased-implementation strategy: Phase II portfolios including added-value products are initially targeted, then Phase I intermediates are identified in order to mitigate short-term technology and economic risks.

In the case of the solvent pulping process, ethanol is considered was the cellulose derivative for Phases I and II, while, and for the hemicellulose stream, a pentose-rich product sold as animal feed was considered during Phase I, prior to being converted into furfurals during Phase II. Formic and acetic acids are obtained as co-products of sugar conversion into furfurals (Xing, Qi, and Huber 2011). Lignin was to be sold as polyacrylonitrile replacement in carbon fibre or as phenol replacement in resin production during Phase I. In Phase II, lignin was to be converted into carbon fibres or phenolic resins on site. Figure 3.19 below summarizes the biorefinery options under considered.

Lignin Precipitation options		
Option #	Process	Products
1	Lignin Precipitation	PF resin
2		Carbon fibre
3	Black liquor oxidation + Lignin precipitation	PF resin
4		Carbon fibre

Solvent Pulping options		
Option #	Process	Products
5	Solvent Pulping	PF resin Ethanol Furfurals
6		Carbon fibre Acetic acid Formic acid

Figure 3.19 Summary of product-process options of the lignin biorefinery case study.

Certain technical differences characterize the conversion of lignin into added-value products from (1) kraft softwood lignin, and from (2) solvent pulping of hardwood. In the case of phenolic resins production, the reactivity of depolymerized lignin is critical and determines the degree of substitution of phenol that can be attained by lignin (Wang, Leitch, and Xu 2009). Although solvent pulping lignin is relatively more reactive than precipitated lignin, the lignin extracted from both precipitation and solvent pulping processes would be chemically modified in order to increase its reactivity before being used in resin formulations. Among possible pre-treatment techniques, phenolation was selected in order to meet required resin specifications related to processing (eg curing time and strength of resulting particleboards) while maintaining a low amount of free phenol and free formaldehyde (Çetin and Özmen 2002). The resin precursor to be commercialized in Phase I was thus phenolated lignin.

Regarding carbon fibre production, the process considered includes (1) spinning for turning lignin into lignin fibres, (2) stabilization to give thermoset properties to the fibres and prevent fusing at high temperatures, (3) carbonization to form tightly bonded carbon crystals that are aligned more or less parallel to the long axis of the fiber, and optionally (4) graphitization to improve fibre properties depending on the targeted application (Figure 3.20). Due to its highly branched structure, softwood lignin is difficult to spin, and usually chars instead of spinning (Kadla et al. 2002) unless it is acetylated (Eckert and Abdullah 2008). On the other hand, hardwood lignin is less reactive and therefore has a much longer stabilization step than softwood lignin (Nordström et al. 2013). Whether lignin is extracted from black liquor precipitation or biomass solvent pulping, it is essential to add a plasticizer to obtain final properties closer to existing carbon fibres. Pellets of lignin mixed with plasticizer are commercialized in Phase I as a carbon fibre precursor.

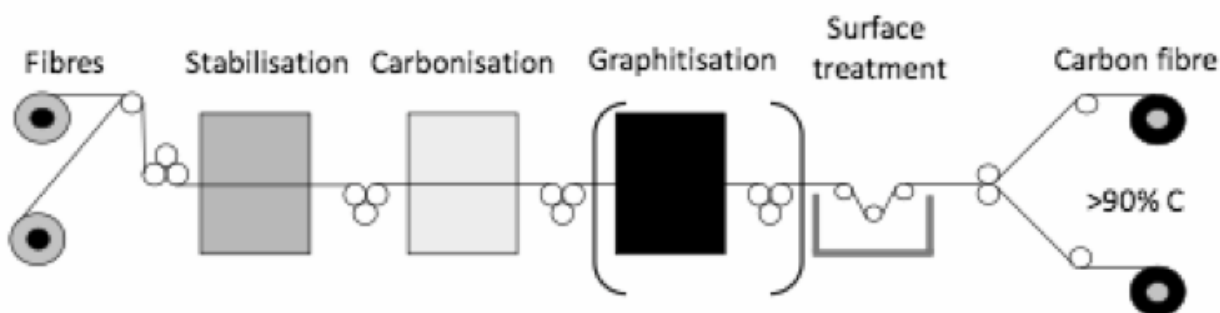


Figure 3.20 Carbon fibre manufacturing process. (From Axegård, P. et al., *Road Map 2014 till 2025: Swedish Lignin-Based Carbon Fibre in Composite Materials of the Future*. Sweden: Swerea SICOMP, 2014.)

3.2.4.1.3 Sustainability assessment and decision-making

Using the perspective of conducting a sustainable assessment of biorefinery options, a multidisciplinary approach has been applied to this case-study (Sanaei, Chambost, and Stuart 2014).

From an economic/competitiveness perspective, the following criteria were considered:

- *IRR* representing project profitability under expected market conditions.
- *Competitiveness on production costs (CPC)* measuring the potential to penetrate the existing market while facing price competition, and to create margins when facing market volatility. This criterion is calculated based on the difference between the product portfolio market price, adding 10% discount on the minimum available market price, and the production cost of a given product family.
- *Phase I implementation capability (PIC)* representing the implementation capability of the technology at full-scale while considering (1) level of technology maturity, (2) process scalability and (3) ability of implementing Phase I over a two years construction period.
- *Downside economic performance (DEP)* measuring the ability to sustain cash flow for a finite period of time under poor market conditions. This criterion is calculated as EBIT considering minimum market price for a finite period of time (Sanaei and Stuart 2014).
- *Return on capital employed (ROCE)* measuring the value the business gains from its investment. This criterion is critical for evaluating economic risk associated with capital-intensive investments.

From an environmental perspective, the following three top-ranked criteria were considered:

- *Greenhouse gas emissions (GHG)* representing the carbon footprint of each biorefinery option measured as CO₂-equivalent compared to the competing processes to manufacture the functionally-equivalent product portfolio.
- *Non-renewable energy consumption (NRE)* representing the level of dependency of the biorefinery option on fossil-based fuel/energy.
- *Respiratory organics (RO)* measuring the potential impact of contaminant emissions into the air affecting human health considering the relative amount of equivalent ethylene emitted into the air, compared to the competing processes to manufacture the functionally-equivalent product portfolio.

MCDM considering this set of criteria was conducted in order to evaluate the sustainability associated with each lignin-based biorefinery option. Based on the weighting factors obtained during the MCDM, IRR, GHG, PIC and CPC were considered as the most important criteria for the decision-making. Applying the criteria utility values, a score was determined for each biorefinery option leading to the identification of the most promising options (Figure 3.21).

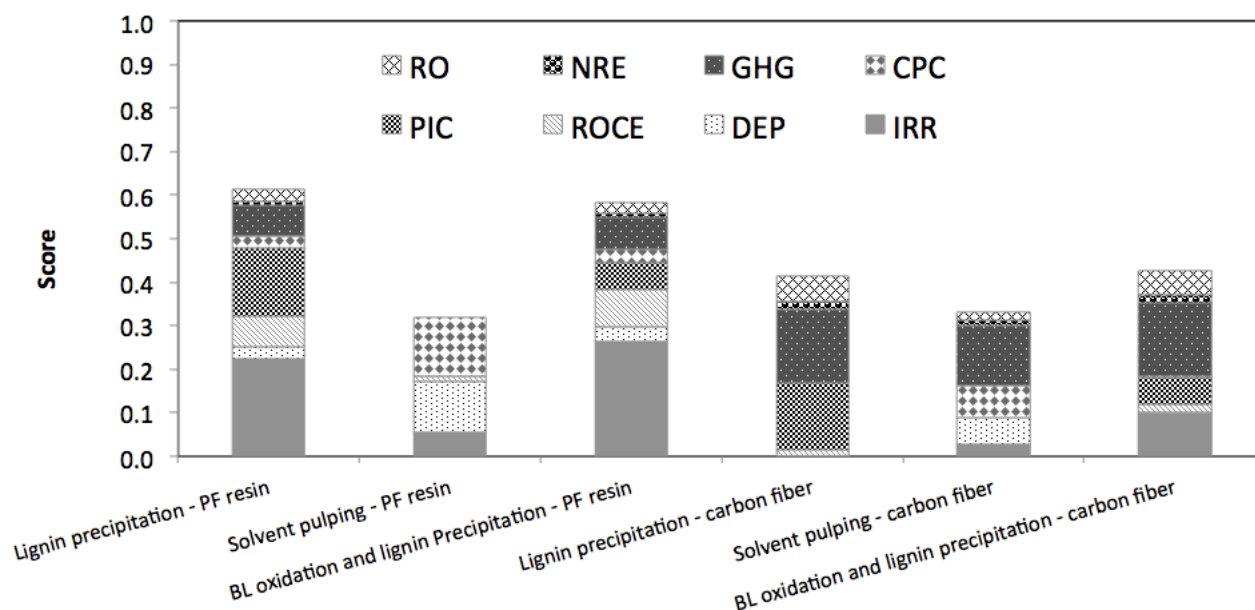


Figure 3.21 Lignin-based biorefinery options scoring, resulting from MCDM panel.

Lignin precipitation processes for the production of phenolic resins were the most preferred biorefinery options by the stakeholder group participating in the MCDM. The MCDM result is similar for all solvent pulping options, regardless of the lignin derivatives. Based on the results, recommendations were made to consider several alternatives at the next level of the business model definition, emphasizing (1) seeking to differentiate lignin product specifications between lignin precipitation processes and solvent pulping, especially for carbon fibre and (2) risk assessment to examine ways to reduce capital and operating costs for the solvent pulping options.

This case study underlines (1) the importance of considering the set of possible conversion routes and product combinations that can be considered for the biorefinery objectives, (2) the importance of using restrictive showstoppers at the early stages in process design considering company/mill business requirements/constraints, (3) the role of decision-making criteria through the MCDM process to guide decision-makers regarding the selection of the most preferred options, and (4) the importance of the context in the MCDM results, since criteria weights and trade-off between options depend on the decision-making objective function.

3.2.4.2 Case study 2: Value proposal definition for torrefied pellets

The case study considers the implementation of a torrefaction process in retrofit to an existing forest products company. As part of the definition of the most promising strategies considering short, mid and longer term objectives, the forest products company identified several potential biorefinery pathways involving a range of emerging biorefinery technologies targeting commodity biofuels and bioenergy production. Based on economic, market and technology-driven criteria, decision-making was made at the corporate level to identify the most preferred option, which was the production of torrefied pellets to be sold in Europe for electricity production. The criteria considered included (1) DEP reflecting how unfavourable market conditions may impact the financial situation of the company over the longer-term, (2) technology and project risks measuring the maturity of the technology, its scalability, and the ability to execute the project over a short-term period, (3) IRR determining whether the project should go ahead considering the relative potential financial return, (4) total capital investment costs representing the capital spending required for the project and (5) Competitive Access to Biomass (CAB) representing the margin gained for each ton of biomass.

Business and technology plans were developed for the production and sale of torrefied pellets in the European market. Key elements covered within the business plan are presented below, focusing on the definition of the value proposal and the determination of key drivers for off-take agreement in order to build a viable business model.

3.2.4.2.1 Overview of market potential assessment

Several market segments can be targeted for the sale of torrefied pellets on local and international value chains:

- Electricity and heat generation in Europe, considering co-firing torrefied pellets with coal in existing power facilities or dedicated biomass plants. Regulations in Europe are (currently) favourable for such projects, and create the opportunity for competitive advantages against other sources of energy such as conventional wood pellets.
- Coal replacement for industrial thermal needs, and as reducing agents in the metallurgical industry. However challenges associated with quality issues and cost competitiveness against coal made this segment less attractive.

The former market opportunity was targeted. The use of pellets as coal replacement in existing power facilities is increasing and demand is growing more rapidly than production. In 2010, Europe consumed 11.5 million tons of wood pellets (International Energy Agency 2011), representing 45% growth in 2 years. Growth in wood pellets demand is expected to remain strong (Figure 3.22) (RISI 2015). European markets are expected to benefit from the renewable energy directive (European Commission 2009) to reach 20% renewable energy by 2020, supporting renewable sources in the global European energy mix. Each member state is required to reach legally binding targets depending on their energy profile. The United Kingdom has set aggressive targets and has developed a system of renewable obligation certificates (Office of the Gas and Electricity Markets 2013) to reach 15% renewable energy by 2020 and up to 45% by 2030.

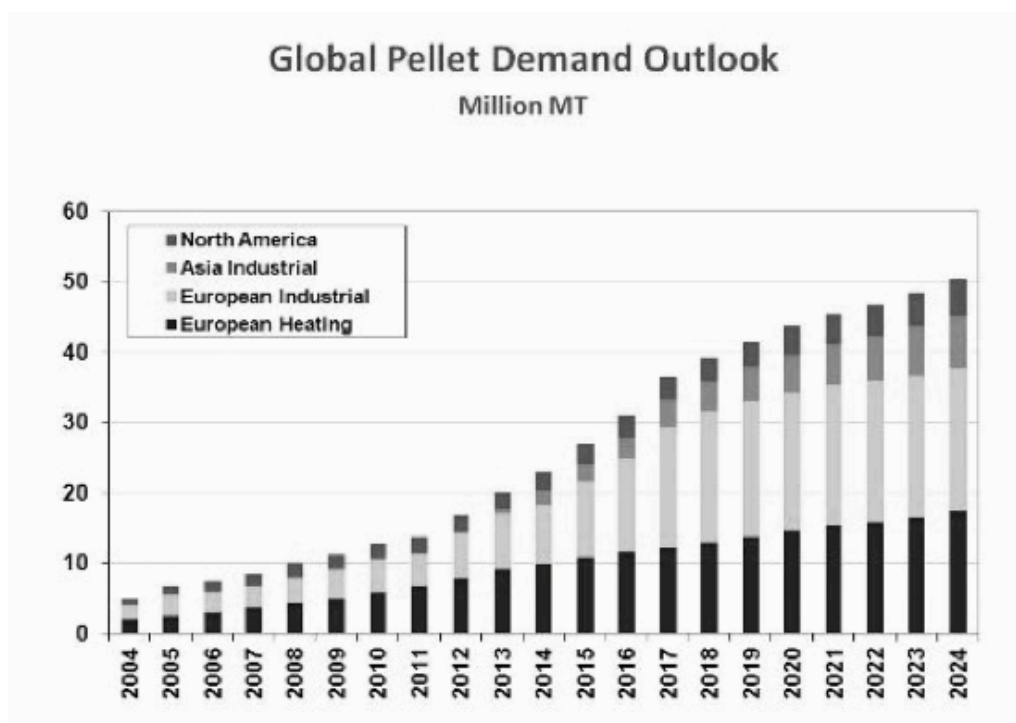


Figure 3.22 Historic and anticipated wood pellet demand, in millions of ton. (From RISI Inc., 2015 Global Pellet Demand Outlook Study, <http://www.risiinfo.com/risi-store/do/product/detail/global-pellet-demand-outlook.html>, 2015.)

Torrefied pellets are new entrants to the wood pellet market. They could well be the next generation of wood pellets, offering better fuel characteristics and cost savings on transportation, storage, and handling. The production of torrefied pellets at a large scale has not yet been reached, with small volumes being tested at demonstration plants.

3.2.4.2.2 Overview of competitiveness assessment for product positioning

It was essential that the value proposal of torrefied pellets manufacture be built on competitive advantages against existing and substitute energy sources, considering (1) quality and functionality-driven advantages and (2) cost competitiveness. Table 3.3 illustrates the competitive positioning of torrefied pellets in terms of quality and functionality considering major drivers for energy production.

Table 3.3 Competitive positioning of torrefied pellets against substitutes

Main fuel properties	Wood	Wood pellets	Torrefied pellets	Coal
Water content (% wt)	30 - 45	7-10	1-5	10-15
Calorific value (MJ/kg)	9 - 12	15-16	20-24	23-28
Bulk density (kg/l)	0.2-0.25	0.55-0.75	0.75-0.85	0.8-0.85
Energy density (GJ/m ³)	2-3	8-11	18-20	18-24
Hydroscopic properties	Hydrophilic	Hydrophilic	Hydrophobic	Hydrophobic
Biological degradation	Yes	Yes	No	No
Transport cost	High	Medium	Low	Low

Source: Kleinschmidt, C.P., Overview of international developments in torrefaction. Presentation at the Bioenergy Trade Torrefaction Workshop. Graz, Austria, 2011.

Fuel characteristics associated with torrefied pellets should lead to a price premium relative to conventional wood pellets. Major savings can be achieved due to lower cost transportation and storage, and handling on site since torrefied pellets handling don't require the same level of investment when used in existing coal-based power plants (Roberts 2012).

When considering the replacement of part of the existing coal supply to an existing power facility, limitations on co-firing rate should be considered. Tests made in Europe by leaders in the domain demonstrated that co-firing have reached 80% without requiring capital investment in new boilers, compared to a cofiring rate of 20% with conventional wood pellets.

3.2.4.2.3 Value proposal definition

The value proposal associated with torrefied pellets was built based on (1) existing market dynamics and the consideration of regulations in place, (2) intrinsic advantages of the torrefied pellets against other sources, and (3) cost-competitiveness.

Existing coal prices coupled with government incentives dictate the price of pellets. In order to build the proposal value and define a room for negotiation, the following elements were considered:

- Analysis of wood pellet and coal market prices and trends
- Identification of possible subsidies and financial incentives, including their sunset dates, resulting from policies for cost-competitiveness compared to coal
- Determination of potential cost savings on the part of the off-taker
- Evaluation of the production costs for torrefied pellets
- Definition of economic threshold for the company in terms of targeted IRR

At another level, the potential cost-competitiveness of torrefied pellets compared to traditional wood pellets was evaluated, and is presented in Figure 3.23. The case of two plants located in southeastern United States were taken into account, presenting the same constraints in terms of production volumes for delivery to Rotterdam. The feedstock considerations included (1) the delivered chipped cost of whole logs for wood pellets, and (2) whole logs and residues for torrefied pellets assuming 50% moisture content. Based on this analysis interesting savings can be achieved considering avoided cost at the utility site since torrefied pellets can be handled with the existing coal utilities. Additional savings can be achieved on landed costs associated with transportation due to higher energy density of the torrefied pellets as well as, in this scenario, cheaper biomass cost due to the unprepared feedstock and access to residues. Thus a room for negotiation of 3.7 \$/GJ, that is, potential margin to be created, could be targeted during preliminary discussions with potential off-takers.

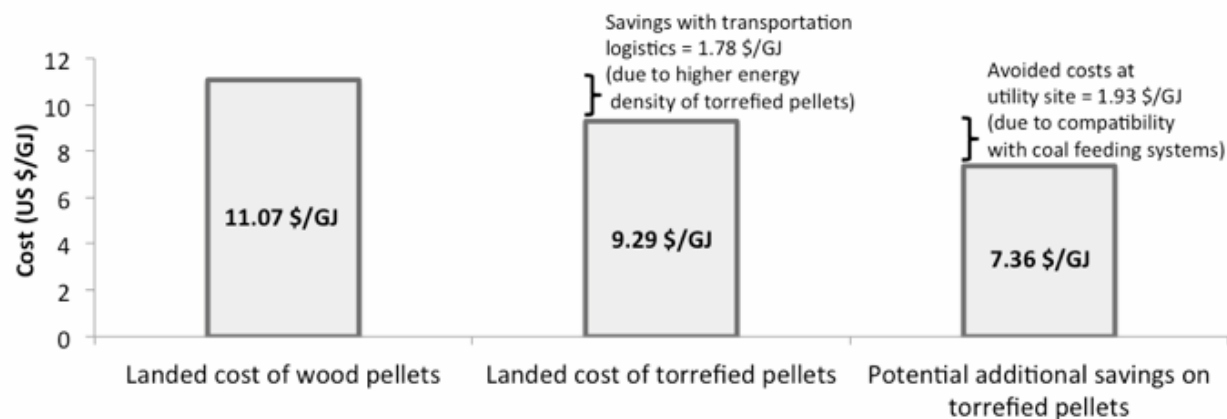


Figure 3.23 Cost comparison between wood pellets and torrefied wood pellets. (Adapted from Roberts, D., The forest sector's status and opportunities from the perspective of an investor (and what it takes to do more). Presentation at The Transformation of the Canadian Forest Sector and Swedish Experiences, Seminar, Stockholm, May 28, 2012.)

Some lessons learned from this case study included (1) a sound business plan to be served by the technology plan, (2) the value proposal to be identified early in the design of the biorefinery strategy, and (3) competitive advantages to be determined and maximized by robust market penetration strategies and partnership strategies.

3.2.5 Conclusions

This chapter has addressed the broad range of market- and technology-based assessments that need to be considered in a systematic manner by forest product companies to identify preferred transformation strategies.

To the extent possible, the many sources of risk must be identified and quantified. The magnitude of the impact of these risks on the economic, environmental, and competitive viability of the project requires a systematic methodology to guide decision-makers. The methodology presented in this chapter is founded on the combination of product design and process design tools and an effective interaction between business plan and technology plan development, considering a phased-implementation approach for transformation strategies. An approach inspired by the stage-and-gate model is employed to assemble these concepts. Stages are suitable to perform the analyses and assessments relevant to gather information on prospective biorefinery candidates prior to evaluating them. This is done during gate reviews incorporating proper milestones, such as MCDM activities.

The focus of this chapter was on value identification and capture in defining transformational business strategies. A practical approach based on value chain considerations has been developed. Whether it is via biomass procurement strategies, manufacturing flexibility, or optimization of the warehousing and product delivery network, supply chain management is crucial to take advantage of the uniqueness of biorefinery product portfolios and maintain a competitive position over the long term. These subjects are covered in greater detail in subsequent chapters of this book.

References

- Agbor, V.B., N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, and D.B. Levin. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances* 29, no. 6 (2011): 675-685.
- Ansoff, H.I. Strategic issue management. *Strategic Management Journal* 1.2, 1980: 131-148.
- Axegård, P. The future pulp mill - a biorefinery? Presentation at the First International Biorefinery Workshop, July 20-21, Washington, DC, 2005.
- Axegård, P., P. Tomani, Innventia, and H. Hansson. *Road map 2014 till 2025: Swedish lignin-based carbon fibre in composite materials of the future*. Sweden: Swerea SICOMP, 2014.
- Batsy, D.R., et al. Product Portfolio Selection and Process Design for the Forest Biorefinery. In *Integrated Biorefineries: Design, Analysis, and Optimization*, by M. M. El-Halwagi and P. R. Stuart. CRC Press, 2012.
- Çetin, N. S., and N. Özmen. Use of organosolv lignin in phenol–formaldehyde resins for particleboard production I. Organosolv lignin modified resins. *International Journal of Adhesion & Adhesives* (Elsevier) 22 (2002): 477-486.
- Chambost, V., J. McNutt, and P.R. Stuart. Partnership for Successful Enterprise Transformation of Forest Industry Companies Implementing the Forest Biorefinery. *Pulp and Paper Canada*, May/June 2009: 19-24.
- Chambost, V., and P. R. Stuart. Selecting the most appropriate products for the forest biorefinery. *Industrial Biotechnology* 3, no. 2 (2007): 112-119.
- Chambost, V., and P. Stuart. Product Portfolio Design for Forest Biorefinery Implementation at an Existing Pulp and Paper Mill. Presentation at the Seventh Foundations of Computer-Aided Process Design (FOCAPD) Conference. Breckenridge, CO, June 7-12, 2009.
- Cocchi, M. Global Wood Pellet Industry Market and Trade Study. 2011. http://www.bioenergytrade.org/downloads/t40-global-wood-pellet-market-study_final_R.pdf, Accessed April 22, 2016.
- Cohen, J., M. Janssen, V. Chambost, and P. Stuart. Critical Analysis of Emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies for Ethanol Production. *Pulp & Paper Canada* 111, 2010: 24-30.

Cooper, R. G. The New Product Process: The Stage-Gate Game Plan. In *Winning at New Products: Accelerating the Process from Idea to Launch*, by R. G. Cooper, 113-153. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2001a.

Cooper, R. G. Picking the Winners: Effective Gates and Portfolio Management. In *Winning at New Products: Accelerating the Process from Idea to Launch*, by R. G. Cooper, 213-251. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2001b.

Cooper, R. G. What's next? After Stage-Gate. *Research-Technology Management* 157, 2014: 20-31.

Costa, R., G. D. Moggridge, and P. M. Saraiva. Chemical Product Engineering: An Emerging Paradigm Within Chemical Engineering. *AIChE Journal* 52, no. 6, 2006: 1976-1986.

Cussler, E. L., and G. D. Moggridge. *Chemical Product Design*. 2nd Edition. New-York: Cambridge University Press, 2011.

Dansereau, L.-P., M.M. El-Halwagi, and P.R. Stuart. Sustainable Supply Chain Planning for the Forest Biorefinery. Presentation at the Seventh Foundations of Computer-Aided Process Design (FOCAPD) Conference. Breckenridge, CO, June 7-12, 2009.

Demirbas, A. *Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities*. London, United Kingdom, Springer, 2010.

Diffo, C., and P. Stuart. Market competitiveness assessment for forest biorefinery product portfolios selection. Presentation at the BIOFOR Conference, Thunder Bay, ON, May 14, 2012.

Eckert, R. C., and Z. Abdullah. Carbon Fibers From Kraft Softwood Lignin. US Patent 0317661, 2008.

Enea, M., and T. Piazza. Project Selection by Constrained Fuzzy AHP. *Fuzzy Optimization and Decision Making* (Kluwer Academic Publishers) 3 (2004): 39-62.

European Commission. Renewable energy directive. 2009. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive> Link to official legislation document: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>, Accessed April 22, 2016.

Favre, E., L. Marchal-Heusler, and M. Kind. Chemical product engineering: Research and educational challenges. *Transactions of IChemE* 80A (2002): 65-74.

Forest Products Association of Canada. Transforming Canada's Forest Products Industry: Summary of findings from the Future Bio-pathways Project. www.fpac.ca. 2010. <http://www.fpac.ca/wp-content/uploads/Biopathways-ENG.pdf>, Accessed April 22, 2016.

Forest Products Association of Canada. The New Face of the Canadian Forest Industry - The Emerging Bio-Revolution. www.fpac.ca. 2011. <http://www.fpac.ca/wp-content/uploads/BIOPATHWAYS-II-web.pdf>, Accessed April 22, 2016.

Gaudreault, C., R. Samson, and P. Stuart. Implications of choices and interpretation in LCA for multi-criteria process design: de-linked pulp capacity and cogeneration at a paper mill case study. *Journal of Cleaner Production* 17 (2009): 1535-1546.

Hill, M. "Chemical Product Engineering—The third paradigm." *Computers and Chemical Engineering* 33 (2009): 947-953.

Holladay, J. E., J.J. Bozell, and al. "Top value- added chemicals from biomass – Volume II: Results of screening for potential candidates from biorefinery lignin." PNNL for US Department of Energy, 2007.

International Standard Organization. "ISO 14040: Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre." Geneva, Switzerland: ISO, 2006.

Janssen, M., V. Chambost, and P. Stuart. "MCDM methodology for the selection of forest biorefinery products and product families." *International Biorefinery Conference*. 2009.

Jolliet, O., et al. "IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8, no. 6 (2003): 324-330.

Kadla, J.F., S. Kubo, R. A. Venditti, R. D. Gilbert, A.L. Compere, and W. Griffith. "Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications." *Carbon* (Pergamon) 40 (2002): 2913–2920.

Killen, C. P., R. A. Hunt, and E. J. Kleinschmidt. "Managing the New Product Development Project Portfolio: A Review of the Literature and Empirical Evidence." *Portland International Center for Management of Engineering and Technology (PICMET)*. Portland, 2007. 1864-1874.

- Kleinschmidt, C. P. "Overview of international developments in torrefaction." *Bio-energy Trade, Torrefaction workshop*. Graz (Austria), 2011.
- Kornfeld, B. J., and S. Kara. "Project portfolio selection in continuous improvement." *International Journal of Operations & Production Management* (Emerald Group Publishing Limited) 31, no. 10 (2011): 1071-1088.
- Liard, G., B. Amor, P. Lesage, P. Stuart, and R. Samson. "Selection of LCA-based environmental criteria for Multi-criteria decision support in a biorefinery context." *SETAC Europe 21st Annual Meeting*. Milano, 2011.
- Maity, S.K. "Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015): 1427-1445.
- Maity, S.K. "Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part II." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015): 1446-1466.
- Mansoornejad, B., V. Chambost, and P. Stuart. "Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery." *Computers and Chemical Engineering* 34, no. 9 (2010): 1497–1506.
- Martino, J. P. "Project Selection." In *Project Management ToolBox: Tools and Techniques for the Practicing Project Manager*, by D. Z. Milosevic (Ed.), Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 19-66, 2003.
- Mu, D., T. Seager, P. Rao, and F. Zhao. "Comparative Life Cycle Assessment of Lignocellulosic Ethanol Production: Biochemical Versus Thermochemical Conversion." *Environmental Management*, no. 4 (2010): 565-578.
- Nordström, Y., I. Norberg, E. Sjöholm, and R. Drougge. "A New Softening Agent for Melt Spinning of Softwood Kraft Lignin." *Journal of Applied Polymer Science*, 2013: 1274-1279.
- Office of the Gas and Electricity Markets. *Renewable Obligation Annual Report 2011-2012*. 2013.
- Oster, A. M. *Modern Competitive Analysis*. 3rd Edition. New York: Oxford University Press, 1999.

Penner, G. “The future for bioproducts.” *BlueWater Sustainability Initiative Conference*. Sarnia, 2007.

Porter, M. E. *On Competition*. Harvard Business Review, 2008.

Pöyry P.L.C. Paper and paperboard market: Demand is forecast to grow by nearly a fifth by 2030. 2015. <http://www.poyry.com/news/paper-and-paperboard-market-demand-forecast-grow-nearly-fifth-2030>, Accessed April 22, 2016.

PriceWaterhouseCoopers. *Managing commodity risk through market uncertainty*. 2009.

Quintero-Bermudez, M. A., N. Janssen, J. Cohen, and P. R. Stuart. “Early design-stage biorefinery process selection.” *TAPPI JOURNAL* 11, no. 11 (November 2012): 9-16.

Regnier, E. “Oil and energy price volatility.” *Energy Economics* 29 (2007): 405-427.

RISI Inc. *2015 Global Pellet Demand Outlook Study*. 2015. <http://www.risiinfo.com/risi-store/do/product/detail/global-pellet-demand-outlook.html>, Accessed April 22, 2016.

Roberts, D. “The Forest Sector’s Status & Opportunities from the Perspective of an Investor (and What it Takes To Do More).” Presentation at The Transformation of the Canadian Forest Sector and Swedish Experiences Seminar. Stockholm, May 28, 2012.

Sanaei, S. Sustainability Assessment of Biorefinery Strategies Under Uncertainty and Risk using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Approach. PhD diss., École Polytechnique de Montréal, 2014.

Sanaei, S., V. Chambost, and P. Stuart. “Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Sustainability Assessment Using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM).” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining (accepted for publication)* DOI: 10.1002/bbb.1482, 2014.

Sanaei, S., and P. Stuart. “Systematic Assessment of Triticale-based Biorefinery Strategies: Techno-economic Analysis to Identify Investment Opportunities.” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining (accepted for publication)* DOI: 10.1002/bbb.1499, 2014.

Sanderson, S., and M. Uzumeri. “Managing product families: the case of the Sony Walkman.” *Research Policy* 24, no. 5 (1995): 761-782.

Schaefer, K. Outlook for the World Paper Grade Pulp Market. 2015. <http://www.cepi.org/system/files/public/documents/events/EuropeanPaperWeek2015/Schaeffer%20-%20RISI.pdf>, Accessed April 22, 2016.

Seider, W. D., J.D. Seader, D. R. Lewin, and S. Widagdo. *Product and Process Design Principles*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

Stuart, P.R. “The forest biorefinery: survival strategy of Canada's P&P sector?” *Pulp & Paper Canada*, 2006: 13-16.

United Nations Economic Commission for Europe. “Forest Products Annual Market Review, 2014-2015.” 2015. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/2015-FPAMR-E.pdf>.

Wang, J. J., Y. Y. Jing, Z. F. Zhang, and J. H. Zhao. “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009): 2263-2278.

Wang, M., M. Leitch, and C. Xu. “Synthesis of phenol–formaldehyde resol resins using organosolv pine lignins.” *European Polymer Journal* (Elsevier) 45 (2009): 3380–3388.

Werpy, T., and G. Petersen. “Top value-added chemicals from biomass feedstock – Volume I: Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas.” NREL for US Department of Energy, 2004.

Xing, R., W. Qi, and G. W. Huber. “Production of furfural and carboxylic acids from waste aqueous hemicellulose solutions from the pulp and paper and cellulosic ethanol industries.” *Energy & Environmental Science*, no. 4 (2011): 2193–2205.