



# **Planification soutenable des investissements bioénergétiques : Intégration des bioraffineries aux pâtes et papiers**

**Thèse**

**Bechir Ben Daya**

**Doctorat en génie mécanique**

Philosophiae doctor (Ph.D.)

Québec, Canada  
© Bechir Ben Daya, 2018

**Planification soutenable des investissements  
bioénergétiques : Intégration des bioraffineries aux  
pâtes et papiers**

**Thèse**

**Bechir Ben Daya**

**Sous la direction de :**

**Mustapha Nour El Fath, directeur de recherche**

# Résumé

Le secteur canadien des pâtes et papiers (P&P) a joué un rôle socioéconomique majeur durant les deux derniers siècles. Ces compagnies, en plus de l'avantage de leur positionnement géographique, ont accumulé une expérience confirmée en matière d'industrie forestière, dont notamment le traitement de la biomasse ligneuse. Au cours des trois dernières décennies, ces entités ont encouru des contraintes environnementales difficiles, auxquelles vient s'ajouter une crise chronique du marché. Cette dernière crise a eu des retombées sans précédent sur le côté social, ce qui a amené à qualifier le contexte difficile du secteur comme une crise de soutenabilité. Au cours de la dernière décennie, l'industrie de l'énergie verte est devenue une composante basique des stratégies de transition énergétique pour les pays développés. La biomasse a toujours été au cœur de cette stratégie pour le Canada. Pour les P&P, cette orientation constitue une opportunité pour résoudre la crise environnementale et économique accrue du secteur. Les preneurs de décision ont besoin d'une feuille de route pour transformer les usines de P&P en Bioraffinerie Forestière Intégrée (BRFI). Le choix des technologies, le dimensionnement de la capacité de production et le choix des voies d'investissement bioénergétique constituent des préoccupations majeures pour les preneurs de décision. Toutefois l'évaluation de la soutenabilité de cette transformation demeure un défi de taille.

Notre contribution vise à développer des approches et des outils d'aide à la décision pour supporter une transformation efficace, robuste et durable de l'industrie des P&P au Canada. L'objectif est d'évaluer la soutenabilité de l'intégration des BRFI et de communiquer un nouveau modèle d'affaires aux preneurs de décision, tout en renforçant leur capacité de négocier une politique incitative propice en matière des investissements bioénergétiques dans le cadre du partenariat public-privé. La méthodologie utilisée pour atteindre cet objectif se place à l'intersection de l'aide à la décision, de l'optimisation mathématique et de l'analyse financière et économique.

Notre première contribution propose la conception et l'application d'une méthode d'évaluation de la soutenabilité intégrant l'approche cycle de vie à l'optimisation du réseau

de création de valeur dans le cadre d'un modèle mathématique multiobjectif. Ce dernier modèle fournira une feuille de route pour les investissements soutenables en bioénergie, minimisant les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et maximisant la valeur financière de la bioraffinerie sur un horizon de planification à long terme tout en assurant une gestion optimale de l'activité incubatrice.

Au niveau de la deuxième contribution, nous présentons une analyse de sensibilité du modèle mathématique proposé selon des scénarios plausibles, et ce, avec l'élaboration d'un canevas pour bien communiquer le modèle aux preneurs de décision. Le but de cette partie est d'évaluer la robustesse du modèle, de bien communiquer aux parties prenantes les implications des choix d'investissement dans la production de bioénergie dans un environnement incertain et d'identifier les perspectives pour améliorer l'efficacité du modèle proposé.

Dans la troisième contribution, nous proposons une analyse fiscale approfondie des modes de dépréciations dérogatoires appliqués aux investissements en bioénergie. Cette analyse traite l'impact des types d'amortissements dérogatoires sur le choix d'investissement bioénergétique et sur la soutenabilité. Notre objectif est de fournir aux preneurs de décision un ensemble d'outils d'aide à la décision tout en renforçant leur pouvoir de négocier une politique fiscale favorable à l'investissement bioénergétique. Dans cette partie, on a mis en évidence le fait que le choix de l'investissement couplé avec le choix de sa façon de dépréciation offre à l'investisseur une visibilité plus complète sur les conséquences pratiques de l'investissement dans le domaine bioénergétique en connivence avec la législation fiscale en vigueur. Ce qui conforte le partenariat public-privé et détermine le niveau d'interventionnisme public dans la réussite des transformations escomptées du secteur de P&P. L'analyse d'impacts sociaux et les approches de programmation stochastique pour l'étude de robustesse n'ont pas été abordées par ce travail, elles ont été présentées comme perspectives de recherche.

# Abstract

The Canadian pulp and paper sector has played a major socio-economic role in the last two centuries. In addition to the advantage of their geographical position, P&P companies have accumulated proven experience in the forest industry, including the treatment of wood biomass. Over the last three decades, these entities have faced difficult environmental constraints, compounded by a chronic market crisis. This latest crisis has had unprecedented social consequences leading to a crisis of sustainability. Over the last decade, the green energy industry has become a basic component of the energy transition strategies for developed countries. Biomass has always been at the heart of such a strategy for Canada. For the P&P, this orientation is an opportunity to solve the growing environmental and economic crisis of the sector. Decision-makers need a road map to transform P&P's factories into an Integrated Forest Biorefinery (IFBR). The choice of technologies, the sizing of production capacity and the choice of bioenergy investment are major concerns for decision-makers. However, assessing the sustainability of this transformation remains a major challenge.

Our contribution is focused on developing decision support approaches and tools to support an effective, robust and sustainable transformation of Canada's P&P industry. The objective is to assess the sustainability of the IFBR integration and to present a new business model to decision-makers, which can strengthen their ability to negotiate a favorable incentive policy for bioenergy investments within the framework of the public-private partnership. To achieve this goal, our methodology combines decision support tools, mathematical optimization models, along with financial and economic analysis.

Our first contribution proposes the design and application of a sustainability evaluation method integrating the life cycle approach and the optimization of the value creation network as part of a multi-objective mathematical model. The proposed model provides a roadmap for sustainable bioenergy investments, minimizing GHG emissions and maximizing the financial value of the biorefinery over a long-term planning horizon while ensuring optimal management of the incubator activity.

In the second contribution, we present a sensitivity analysis of the proposed mathematical model according to well selected scenarios, with the development of a framework for communicating the model to the decision-makers. The purpose of this analysis is to assess the robustness of the model, to communicate to stakeholders the implications of investment choices in bioenergy production in an uncertain environment, and to identify opportunities for improving the effectiveness of the proposed model.

In the third contribution, we propose an in-depth tax analysis using accelerated depreciation methods applied to investments in bioenergy. This analysis deals with the impact of the types of depreciations on the choice of bioenergy investment and on sustainability. Our goal is to provide decision makers with a set of decision support tools while strengthening their power to negotiate a tax policy favorable to bioenergy investment. In this part, it was highlighted that the choice of the investment coupled with the choice of its depreciation way offers the investor a more complete visibility on the practical consequences of the investment in the bioenergetics field with respect to prevalent tax legislation. This reinforces the public-private partnership and determines the level of public interventionism needed for the success of the expected transformation of the P&P sector. The social impact analysis and stochastic programming approaches for the robust study were not addressed by this work, they were presented as research perspectives.

# Table des matières

<i>Résumé</i> .....	<i>iii</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>v</i>
<i>Table des matières</i> .....	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>x</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>xi</i>
<i>Acronymes</i> .....	<i>xii</i>
<i>Remerciements</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Chapitre 1 : Introduction générale</i> .....	<i>1</i>
1.1. Introduction.....	1
1.2. Évolution du concept de la soutenabilité et ses déclinaisons forestières.....	3
1.2.1. Évolution du concept de la soutenabilité.....	4
1.2.2. Principes et signification pratique de la soutenabilité .....	5
1.2.3. Déclinaisons forestières de la soutenabilité.....	8
1.2.4. Stratégie régionale du développement durable .....	9
1.3. Crise de soutenabilité et intégration de la production bioénergétique dans les P&P	12
1.3.1. Ère de l'émergence de la notion de soutenabilité (1991-2002).....	14
1.3.2. Standardisation de l'aménagement environnemental (2003-2008).....	15
1.3.3. Crise économique du secteur de P&P et émergence des BRFI comme solution à la crise de soutenabilité (2009-2017) .....	16
1.4. Émergence des BRFI et leur intégration aux P&P.....	18
1.4.1. Émergence des BRFI pour la valorisation énergétique de la biomasse .....	18
1.4.2. Conception des bioraffineries de deuxième génération .....	19
1.4.3. Opportunité d'intégration des BRFI dans les P&P.....	20
1.4.4. Implémentation des bioraffineries.....	22
1.5. Évaluation de la soutenabilité des bioraffineries.....	24
1.5.1. Évaluation de la soutenabilité.....	24
1.5.2. Chaîne logistique verte .....	28
1.5.3. Évaluation de la soutenabilité des bioraffineries intégrées .....	29
1.6. Contributions de la thèse .....	36
1.7. Conclusion .....	41
<i>Chapitre 2 : Évaluation de la soutenabilité des bioraffineries de deuxième génération implémentées dans le secteur canadien des P&amp;P</i> .....	<i>42</i>
2.1. Introduction.....	42
2.2. Modèle conceptuel pour l'évaluation de la soutenabilité .....	44
2.2.1. Exposée du problème et définition de l'objectif et de la portée de l'étude.....	47
2.2.1.1. Exposée du problème.....	47
2.2.1.2. Objectif de l'étude .....	50
2.2.1.3. Portée de l'étude.....	51
- Unité fonctionnelle.....	51
- Les catégories d'impacts .....	52
- Les méthodes d'allocation .....	53
2.2.2. Analyse de l'inventaire.....	54
2.2.2.1. Inventaire relatif à l'aspect environnemental.....	54
2.2.2.2. Inventaire relatif à l'aspect économique .....	57
2.2.3. Évaluation de l'impact.....	57
2.2.3.1. Modélisation multiobjectif.....	57
2.2.3.2. Formulation du modèle mathématique .....	58

2.2.3.3.	Définition de la frontière de Pareto .....	67
2.2.3.4.	Critères d'analyse.....	68
2.2.4.	Interprétation de l'impact .....	68
2.3.	Étude de cas .....	69
2.3.1.	Évaluation de l'impact.....	69
2.3.1.1.	Génération de la frontière de Pareto.....	69
2.3.1.2.	Analyse des solutions.....	71
-	Planification et rentabilité des investissements.....	71
-	Émissions générées par les technologies implémentées.....	75
-	Performance relative des investissements.....	76
-	Autres indicateurs analysés.....	77
-	Classement des solutions.....	79
2.3.2.	Interprétation d'impacts.....	79
2.3.2.1.	Intégration verticale et synergie avec l'activité incubatrice.....	80
2.3.2.2.	Étude comparative des émissions unitaires par produit.....	80
2.3.2.3.	Recommandations générales.....	81
2.4.	Conclusion .....	82
<i>Chapitre 3 : Conception des scénarios et analyse de sensibilité .....</i>		<i>84</i>
3.1.	Introduction.....	84
3.2.	Méthodologie.....	86
3.2.1.	Choix des critères pour la conception des scénarios.....	88
3.2.2.	Identification de la solution optimale .....	88
3.2.2.1.	Frontière de Pareto .....	88
3.2.2.2.	Solution optimale pour chaque scénario.....	88
3.2.3.	Analyse de sensibilité et interprétations.....	89
3.3.	Analyse de sensibilité .....	89
3.3.1.	Motivations du choix des scénarios .....	90
3.3.1.1.	Détérioration du marché de papiers et de pâtes commerciales .....	90
3.3.1.2.	Soutien et incitations gouvernementales à la production bioénergétique .....	91
3.3.1.3.	Stratégie canadienne pour la demande en biogaz.....	92
3.3.1.4.	Incitation à la production et à la vente d'électricité verte .....	93
3.3.1.5.	Autres critères considérés pour le choix des scénarios.....	94
3.3.2.	Identification des solutions optimales.....	95
3.3.2.1.	Solutions basées sur la performance de l'investissement .....	95
3.3.2.2.	Solutions basées sur le taux global d'émission.....	97
3.3.2.3.	Solutions basées sur le ratio de la performance relative .....	99
3.3.3.	Résultats et discussion de l'analyse de sensibilité.....	101
3.3.3.1.	Impact des différents scénarios sur la planification de l'investissement .....	101
3.3.3.2.	Impact sur la structure du Cash-Flow Actualisé (CFA) .....	103
3.3.3.3.	Impact sur l'intégration interne et le recyclage.....	104
3.3.3.4.	Impacts sur les indicateurs de performance.....	105
3.3.4.	Interprétations de l'analyse de sensibilité.....	106
3.3.4.1.	Analyse de robustesse.....	107
-	Pertinence du choix des investissements .....	107
-	Sécurité d'approvisionnement de l'unité de cogénération.....	109
3.3.4.2.	Canevas à communiquer aux preneurs de décision .....	111
3.3.4.3.	Perspectives d'amélioration du modèle.....	112
3.4.	Conclusion .....	113
<i>Chapitre 4 : Impact des amortissements dérogatoires sur la planification soutenable des investissements bioénergétiques .....</i>		<i>114</i>
4.1.	Introduction.....	114
4.2.	Le régime fiscal des amortissements au Canada.....	117
4.3.	Méthodologie.....	120

4.3.1.	Impact de l'amortissement linéaire.....	120
4.3.2.	Recensement et application des amortissements dérogatoires.....	121
4.4.	Étude d'impact : résultats et interprétations.....	123
4.4.1.	Impact de l'application de l'amortissement linéaire .....	124
4.4.1.1.	Planification des investissements.....	124
4.4.1.2.	Analyse économique-environnementale.....	125
4.4.2.	Impacts de l'application des modes d'amortissements dérogatoires.....	126
4.4.2.1.	Impact sur le capital investi .....	127
4.4.2.2.	Impact sur la performance économique.....	128
4.4.2.3.	Impact sur le taux d'émission.....	129
4.4.2.4.	Impacts sur la performance relative .....	131
4.4.2.5.	Impact financier.....	131
4.4.2.6.	Autres impacts à analyser .....	134
4.4.3.	Interprétation.....	135
-	Choix des solutions soutenables et planification des investissements.....	135
-	Outil pour le choix d'investissement soutenable en fonction du mode d'amortissement et du ratio de la performance relative.....	136
4.5.	Conclusion .....	140
<i>Chapitre 5 : Conclusion générale.....</i>		<i>142</i>
5.1.	Résumé des contributions .....	142
5.2.	Idées à retenir pour repenser l'évaluation de la soutenabilité des BRFI .....	147
5.3.	Perspectives de recherche.....	149
<i>Annexes.....</i>		<i>166</i>
Annexe 1.A : Cadre commenté de la réglementation internationale relative aux changements climatiques et à la couche d'ozone .....		167
Annexe 1.B : Les dix principes du Pacte Mondial .....		171
Annexes 2.A : Notations relatives à la formulation mathématique du modèle .....		172
Annexe 4.A : Les différents types et modes d'amortissements.....		176
Annexe 4.B : détail du calcul de la perte du trésor par rapport au scénario de référence ..		179
Annexe 4.C : Planification des investissements par mode d'amortissement, technologie, cycle, capacité et capital pour les dix premières solutions de Pareto.....		180

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Cadre de la méthode LCSA confectionné d'après (UNEP-SETAK initiative life cycle) reporté par Valdivia et al., (2013) .....	26
<b>Tableau 1.2</b> : Consistance des contributions .....	39
<b>Tableau 2.1</b> : Inventaire environnemental .....	56
<b>Tableau 2.2</b> : Planification de l'investissement (technologie sélectionnée, capacité de production, période d'implémentation et capital total investi pour chaque technologie) au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto. ....	72
<b>Tableau 2.3</b> : Comportement de la voie éthanol au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto .....	73
<b>Tableau 2.4</b> : Classement des différentes solutions à la frontière de Pareto selon les indicateurs adoptés ....	79
<b>Tableau 3.1</b> : Conception des scénarios .....	94
<b>Tableau 3.2</b> : TRI de tous les scénarios pour les dix premières solutions de Pareto.....	95
<b>Tableau 3.3</b> : Capital total investi pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto concernant tous les scénarios .....	96
<b>Tableau 3.4</b> : Taux d'Émission (TE) pour les dix premières solutions de Pareto concernant tous les scénarios .....	98
<b>Tableau 3.5</b> : Ratio de la performance relative (TRI/TE) pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto concernant tous les scénarios.....	99
<b>Tableau 3.6</b> : Classement des différentes solutions selon les indicateurs retenus .....	101
<b>Tableau 3.7</b> : Capacité d'investissement par technologie et par cycle d'implémentation et évolution du capital investi par rapport au scénario de référence pour tous les scénarios.....	102
<b>Tableau 3.8</b> : Évolution de la structure du CFA par produit pour tous les scénarios .....	103
<b>Tableau 3.9</b> : Évolution des indicateurs de performance, du taux d'intégration interne et du taux de recyclage pour tous les scénarios .....	106
<b>Tableau 4.1</b> : Taux effectif pour les différents modes d'amortissements dérogatoires (le calcul des taux effectifs découle des règles comptables et fiscales prévues par la réglementation pour chaque discipline)..	121
<b>Tableau 4.2</b> : Valeur résiduelle des différents modes d'amortissements d'après les taux du tableau 4.1 .....	122
<b>Tableau 4.3</b> : Planification de l'investissement (technologie sélectionnée, capacité de production, période d'implémentation et capital investi pour chaque technologie) pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto selon le scénario de référence.....	125
<b>Tableau 4.4</b> : Capital total investi et capital relatif à l'horizon de planification pour les différents scénarios .....	128
<b>Tableau 4.5</b> : TRI, TE, TRI-TRI_SC0 et TE-TE_SC0 pour les différents scénarios au niveau des dix premières solutions de la frontière de Pareto (la couleur change pour indiquer les zones favorables (couleur verte) ou défavorables (couleur rouge) selon l'indicateur).....	130
<b>Tableau 4.6</b> : Perte du trésor, par rapport au scénario de référence, au titre de toutes les solutions de la frontière de Pareto et pour tous les scénarios (Détail de calcul à l'annexe 4.B).....	132
<b>Tableau 4.7</b> : Impacts des différents modes d'amortissements .....	133
<b>Tableau 4.8</b> : Perte du trésor et impacts sur le capital investi et sur la performance économique-environnementale en matière d'investissement .....	133
<b>Tableau 4.9</b> : Taux d'intégration interne et taux de recyclage des déchets selon les différents scénarios (les valeurs correspondent à la moyenne des dix premières solutions de la frontières de Pareto).....	134
<b>Tableau 4.10</b> : Frontière de Pareto (objectif économique et environnemental par solution et par mode d'amortissement).....	137
<b>Tableau 4.11</b> : Matrice TRI/TE pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto par mode d'amortissement .....	138
<b>Tableau 4.12</b> : Matrice TRI/TE avec les préférences de choix de la solution optimale.....	138
<b>Tableau 4.13</b> : Schéma d'investissement par solution et par mode d'amortissement.....	139

# Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Gouvernance mondiale et régionale du développement durable et leurs déclinaisons sur le secteur des P&P .....	18
<b>Figure 1.2</b> : Schéma du cheminement des indicateurs d'impacts entre aspects locaux et globaux .....	25
<b>Figure 1.3</b> : Concept de mise en œuvre par étapes d'une hiérarchie d'indicateurs de soutenabilité .....	27
<b>Figure 1.4</b> : Insuffisances constatées et contributions proposée .....	39
<b>Figure 2.1</b> : Méthodologie d'évaluation de la soutenabilité.....	46
<b>Figure 2.2</b> : Cycles d'investissement .....	50
<b>Figure 2.3</b> : BRFI intégrée au P&P (corriger scierie en sciage).....	53
<b>Figure 2.4</b> : Frontière de Pareto.....	70
<b>Figure 2.5</b> : Allure des deux objectifs à la frontière de Pareto.....	70
<b>Figure 2.6</b> : Retour sur capital investi CROIC au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto	74
<b>Figure 2.7</b> : Taux de rentabilité interne TRI au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto...	75
<b>Figure 2.8</b> : Taux d'émission TE au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto .....	76
<b>Figure 2.9</b> : Ratio de la performance relative TRI/TE au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto .....	77
<b>Figure 2.10</b> : Taux d'intégration interne des produits finis au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto .....	78
<b>Figure 2.11</b> : Taux de recyclage des déchets au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto..	79
<b>Figure 3.1</b> : Méthodologie proposée pour l'analyse de sensibilité.....	87
<b>Figure 3.2</b> : Le TRI des dix premières solutions de la frontière de Pareto pour chaque scénario .....	96
<b>Figure 3.3</b> : Le capital investi pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto pour tous les scénarios.....	97
<b>Figure 3.4</b> : Taux d'émission pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto pour tous les scénarios.....	98
<b>Figure 3.5</b> : Le ratio TIR/TE pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto pour tous les scénarios.....	100
<b>Figure 3.6</b> : Variation du capital investi pour l'ensemble des scénarios.....	102
<b>Figure 3.7</b> : Variation du CFA et de la proportion des différents produits pour tous les scénarios.....	104
<b>Figure 3.8</b> : Variation du taux d'intégration interne et du taux de recyclage pour tous les scénarios.....	105
<b>Figure 3.9</b> : Variation du TRI et du TE pour tous les scénarios .....	106
<b>Figure 4.1</b> : Valeur résiduelle des différents modes d'amortissements sur la durée de vie fiscale de 20 ans	122
<b>Figure 4.2</b> : TRI et TE pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto (scénario de référence)..	126
<b>Figure 4.3</b> : Différentiel du TRI par rapport au scénario de référence .....	129
<b>Figure 4.4</b> : Différentiel du TE par rapport au scénario de référence .....	130
<b>Figure 4.5</b> : TRI/TE pour les différents scénarios au niveau des dix premières solutions de la frontière de Pareto .....	131
<b>Figure 5.1</b> : Application du modèle conceptuel pour l'évaluation de la planification soutenable de la production bioénergétique au sein des P&P avec le respect des phases de la méthode LCSA.....	154

# Acronymes

- AQPER : Association Québécoise de la Production d'Énergie Renouvelable
- CHP : Cogénération '*Combined Heat and Power*'
- CFNA : Cash-Flow Net Actualisé (CFA: Cash-Flow Actualisé; CF: Cash-Flow)
- CGA : *Canadian Gas Association*
- CH<sub>4</sub> : Méthane (CH<sub>4</sub>)
- DA: Digestion Anaérobie
- DPA : Déduction Pour Amortissement
- DPAA : Déduction Pour Amortissement Accéléré
- EcLCA : Économique LCA
- FAO : L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture '*Food and Agriculture Organization of the United Nations*'
- GES : Gaz à Effet de Serre (GHG : '*GreenHouse Gas*')
- GNR : Gaz Naturel Renouvelable
- GREET: Modèle GREET d'argonne '*Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*'
- GrSCM : Management de la chaîne logistique verte ('*Green SCM*')
- IEA : l'Agence Internationale de l'Énergie
- BRFI : Bioraffinerie forestière intégrée '*Integrated Forest Biorefinery : IFBR*'
- ILCSA: LCSA intégré
- IPCC : Panel Intergouvernemental chargé du Changement Climatique
- LCA : Analyse du Cycle de Vie '*Life Cycle Assessment*'
- LCC : le coût du cycle de vie '*Life Cycle Cost*'
- MCDM : Méthodes multicritère d'aide à la décision
- N<sub>2</sub>O : L'oxyde nitreux
- NREL : Laboratoire National d'Énergie Renouvelable
- ONU : L'Organisation des Nations Unies
- P&P : Compagnie ou secteur de Pâtes et Papiers
- PEPP : Programme d'Écologisation des P&P
- PM : Pacte Mondial
- SACV : Soutenabilité par l'Analyse du Cycle de Vie (LCSA : '*Life Cycle Sustainability Assessment*')
- SFDD : Stratégie Fédérale de Développement Durable
- SGQA : Système pancanadien de Gestion de la Qualité de l'Air
- SLCA: '*Social Life Cycle Assessment*'
- SSF : Saccharification et Fermentation Simultanée.
- TE : Taux d'Émission
- TRI : Taux de Rentabilité Interne

# Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon directeur de recherche Prof. Mustapha Nour El Fath pour son soutien académique et personnel durant cette thèse. Son dévouement et son expertise m'ont initié au monde de la recherche et m'ont été d'une grande utilité pour me lancer dans le long projet qu'est le doctorat. Prof. Nour El Fath était toujours à l'écoute, prêt à donner conseil pour le bien de ma carrière. L'ayant côtoyé durant presque quatre ans et demi, fût un agréable périple tant au niveau professionnel qu'au niveau humain.

Un grand merci à Philippe Marier et Alexis Roy, membres de CIRRELT, pour leurs aides techniques efficaces. Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes collègues membres du laboratoire CIRRELT et FORAC.

Je remercie Prof. Benoît Lévesque, directeur actuel des programmes de 3<sup>ème</sup> cycle en génie mécanique et les membres du jury Prof. Daoud Aït Kadi, Prof. Luc Lebel et Prof. Masoumeh Kazemi Zanjani pour avoir accepté de donner de leur temps précieux pour évaluer ce travail.

Mes remerciements s'adressent à mes chers parents Ali et Charoi, qui m'ont encouragé vivement à poursuivre et parfaire mes études doctorales. Sans oublier les sacrifices énormes de tous les membres de ma petite famille (Sihem, Meriem, Mohamed Amine, Meriem et Mehdi) et mes frères et sœurs (Ayadia, Latifa, Aziza, Mohamed, Hédi, Aicha, Taher, Mahdia et Khadija). Un grand Merci s'adresse à mon frère Prof. Mohamed Ben Daya pour son support, ses conseils et ses encouragements sur tous les plans.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement Prof. Claire Deschênes qui m'a accueilli généreusement lors de mon arrivée à l'université Laval et qui n'a jamais manqué de me supporter jusqu'à la fin de mes recherches doctorales.

« C'est Lui qui, de l'arbre vert, a fait pour vous du feu, et voilà que de cela vous allumez ». Versé 80, Sourate Ya-Sin du Sacré Coran.

الَّذِي جَعَلَ لَكُمْ مِنَ الشَّجَرِ الْأَخْضَرِ نَارًا فَإِذَا أَنْتُمْ مِنْهُ تُوقِدُونَ (80) من سورة يس

« Voyez-vous donc le feu que vous obtenez par frottement ? Est-ce vous qui avez créé son arbre ou sommes-nous les créateurs ? Nous en avons fait un rappel, et un élément utile pour ceux qui en ont besoin » Versets 71, 72 et 73 de sourate ALWakia du Sacré Coran.

أَفَرَأَيْتُمُ النَّارَ الَّتِي تُورُونَ (71) ءَأَنْتُمْ أَنْشَأْتُمْ شَجَرَتَهَا أَمْ نَحْنُ الْمُنشِئُونَ (72) نَحْنُ  
جَعَلْنَاهَا تَذْكَرَةً وَرَمْتَنَا لِلْمُقْوِينَ (73) من سورة الواقعة

"What people don't understand, they won't value; what people don't value, they won't protect; what people don't protect, they will lose." Charles Jordan.

# Chapitre 1 : Introduction générale

## 1.1. Introduction

Le développement durable demeure un élément fondamental des discussions stratégiques qui se tiennent à l'échelle mondiale. Il continue, en outre, à évoluer notamment vers la reconnaissance accrue des synergies entre les aspects écologiques, économiques et de la valeur du capital naturel, qui sont à la base de la prospérité socioéconomique, tant pour la génération actuelle que pour les générations futures. Les décisions politiques stimulent en général l'exploitation et la valorisation de la biomasse en produits énergétiques notamment pour relever les défis des changements climatiques. Toutefois, L'exploitation des forêts à grande échelle, pour des raisons énergétiques, est une question complexe qui se retrouve propulsée au cœur du débat sur le développement durable.

Les entités microéconomiques s'intéressent, de plus en plus, à intégrer la notion de soutenabilité pour procurer cette étiquette (*label*) à leur réseau de création de valeur. Toutefois, l'évaluation de la soutenabilité demeure un sujet polémique, d'une part à cause de la nouveauté de cette notion, et d'autre part, à cause de l'absence de méthodes robustes pouvant articuler les aspects paradoxaux considérés par cette évaluation.

Les compagnies canadiennes de Pâtes et Papiers (P&P) ont joué un rôle socioéconomique majeur durant les deux derniers siècles. Ces entités, en plus de l'avantage de leur positionnement géographique, ont accumulé une expérience confirmée en matière d'industrie forestière, dont notamment le traitement de la biomasse ligneuse. Au cours des trois dernières décennies, ces entités ont encouru des contraintes environnementales difficiles, auxquelles vient s'ajouter une crise chronique du marché. Cette dernière crise a eu des retombées sans précédent sur le côté social, ce qui a amené à qualifier le contexte difficile du secteur comme une crise de soutenabilité.

Au cours de la dernière décennie, l'industrie de l'énergie verte est devenue une composante basique des stratégies de transition énergétique pour les pays développés. La biomasse a toujours été au cœur de cette stratégie pour le Canada. Pour les P&P, cette

orientation constitue une opportunité pour résoudre la crise environnementale et économique accrue du secteur. Les preneurs de décision ont besoin d'une feuille de route pour transformer les usines de P&P en Bioraffinerie Forestière Intégrée (BRFI). Le choix des technologies, le dimensionnement de la capacité de production et le choix des voies d'investissement bioénergétique constituent des préoccupations majeures pour les preneurs de décision. Toutefois l'évaluation de la soutenabilité du plan d'affaires conséquent demeure un défi de taille.

En outre, la conversion de la biomasse ligneuse en énergie se fait à travers un modèle industriel émergent dit bioraffinerie de deuxième génération. L'intégration de ce modèle, considéré soutenable d'après l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), suscite l'attention du secteur des P&P qui souffre déjà d'une crise de soutenabilité. Il est à vérifier ainsi *si l'intégration d'un modèle industriel, soutenable de fait, peut procurer ce label à l'incubateur?*

L'évaluation de la soutenabilité de l'intégration des bioraffineries dans les P&P, selon le contexte canadien, nécessite de considérer les contextes suivants :

- L'évolution de la notion de soutenabilité et les stratégies de transition énergétique conséquentes ;
- Le contexte du secteur des P&P et la valeur ajoutée escomptée de la refonte du plan d'affaires de ses entités en intégrant la production bioénergétique ;
- Le contexte de la production bioénergétique et l'émergence du modèle industriel dit bioraffineries de deuxième génération ;
- Le contexte d'évolution des approches pour évaluer la soutenabilité.

Par l'étude de tous ces contextes, nous voulons signaler que l'apport d'ingénierie pour confectionner des outils d'aide à la décision nécessite, en plus du diagnostic approfondi du problème, un recul suffisant vis-à-vis des notions pivots liées à la recherche envisagée. A cet effet, notre travail nécessite de creuser certains concepts clés dont notamment la soutenabilité, les bioraffineries intégrées, les stratégies de transition énergétique, etc. Nous notons, en outre, que notre cas d'étude se trouve propulsé au carrefour des stratégies publiques-privées, ce qui a priori, oriente les analyses, les choix et les objectifs.

Notre contribution, à ce propos, consiste à développer un outil d'aide à la décision permettant aux preneurs de décision, au sein du secteur des P&P, de fonder un nouveau modèle d'affaires soutenable renforçant la diversification des produits par l'intégration de la production bioénergétique. L'objectif est d'évaluer la soutenabilité de l'intégration des BRFI et de communiquer un nouveau modèle d'affaires aux preneurs de décision, tout en renforçant leur capacité de négocier une politique incitative propice en matière des investissements bioénergétiques dans le cadre du partenariat public-privé.

L'objet de ce chapitre introductif est de relater le contexte global du sujet de recherche, mettant en exergue les défis qui s'imposent au secteur de P&P et les solutions potentielles qui cadrent avec la soutenabilité. La première section traitera l'évolution du concept de la soutenabilité et les stratégies de transition énergétique conséquentes. Dans une deuxième section, nous présenterons le contexte de la crise chronique de soutenabilité dont souffre le secteur de P&P et les tendances de recherche y afférentes durant les trois dernières décennies. Une troisième section sera réservée à l'émergence du modèle industriel dit bioraffinerie de deuxième génération et les modes de son implémentation. Les deux dernières sections décriront respectivement l'évolution des modèles d'évaluation de la soutenabilité et notre contribution au sujet de recherche proposé. Toutes ces sections seront accompagnées d'une revue de littérature se rapportant aux principales publications scientifiques en relation.

## **1.2. Évolution du concept de la soutenabilité et ses déclinaisons forestières**

La soutenabilité est un modèle de développement global qui s'impose au fil du temps encadré par un système institutionnel au niveau des Nations Unies. La question environnementale et sa relation avec l'énergie constitue le cœur des sujets traités dans le cadre de la soutenabilité. On présentera ainsi l'évolution du concept de soutenabilité, sa manifestation pratique et ses déclinaisons forestières tout en faisant allusion au contexte de la transition énergétique et ses déclinaisons régionales dans le contexte canadien.

### **1.2.1. Évolution du concept de la soutenabilité**

Des chercheurs du Club de Rome<sup>1</sup> ont entrepris en 1972 une simulation informatique projetée jusqu'à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle sur l'évolution des besoins de la population humaine en fonction de l'exploitation des ressources naturelles (Meadows et al., 1972). Le résultat montre que la poursuite du rythme de la croissance économique va causer une chute brutale des populations au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle à cause de la pollution, de l'appauvrissement des sols cultivables dû à la surexploitation, et des effets des énergies fossiles. Durant la même année, une conférence des Nations Unies sur l'environnement humain tenue à Stockholm avait admis comme problématique la question de l'environnement, qui apparaît comme un patrimoine mondial essentiel à transmettre aux générations futures. La conférence avait exposé notamment l'écodéveloppement, les interactions entre écologie et économie à côté de la relation entre le développement des pays du Sud et du Nord. Cette conférence a été rétrospectivement qualifiée de premier Sommet de la Terre.

Un ensemble de conventions ont vu le jour à partir des années 1980 ayant pour objectif de protéger les ressources naturelles pour une exploitation équitable et propre. Le champ d'application de ces conventions s'est élargi pour couvrir tout le monde, ce qui traduit l'importance de la conscience universelle vis-à-vis des menaces qui peuvent détruire les écosystèmes et la vie sur terre (l'annexe 1.A présente un cadre commenté des conventions et protocoles internationaux sur les changements climatiques et la couche d'ozone). La notion de développement durable apparaît pour la première fois, en 1980, dans un rapport intitulé « La stratégie mondiale pour la conservation », publié par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN, WWF, PNUE, 1980).

En 1987, la Commission mondiale sur l'environnement et le développement a défini pour la première fois la notion de développement durable : « Le développement durable est un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Brundtland Commission, 1987). À

---

<sup>1</sup> Le Club de Rome a été fondée en 1968 comme une association informelle de hautes personnalités indépendantes du monde politique et des affaires. Les membres du club partagent un intérêt commun pour l'avenir de l'humanité et de la planète.

la suite de cette définition, plusieurs conceptions du développement durable ont été développées. Ces représentations tournent autour d'une approche globale cadrant avec la confluence de trois préoccupations connues sous l'appellation « les trois piliers du développement durable », à savoir l'aspect économique, environnemental et social.

L'articulation des trois aspects de la soutenabilité reste source de polémique majeure, notamment au niveau de la modélisation traitant avec la réalité micro ou macroéconomique. Toutefois, l'esprit du développement durable est résumé par la formule employée lors du premier sommet sur l'environnement en 1972 : « Penser globalement, agir localement » tant que la survie de notre planète est intimement liée à nos activités. La finalité du développement durable est ainsi de trouver un équilibre cohérent et viable à long terme entre ces trois enjeux conflictuels (économique, environnemental et social). Un enjeu transversal vient de s'ajouter à ces trois piliers, il s'agit de la gouvernance qui exprime la façon de faire participer tous les acteurs à la prise de décision. La responsabilité sociétale est une expression explicite de la gouvernance consignée par la norme ISO 26000. Le développement durable est en fait un processus de transformation dynamique dans lequel l'exploitation des ressources naturelles, le choix des investissements, l'orientation des changements techniques et institutionnels sont rendus cohérents avec l'avenir comme avec les besoins du présent (Voiron-Canicio, 2005).

### **1.2.2. Principes et signification pratique de la soutenabilité**

Le concept de soutenabilité est à la fois profond et complexe. Il est profond au niveau de sa signification philosophique qui introduit les notions de l'équité, de l'éthique, du bien-être social et de la responsabilité vis-à-vis des écosystèmes biologiques et des générations futures. Il est compliqué au niveau de la prise en compte des enjeux environnementaux et sociaux dans le modèle du développement durable sans compromettre l'aspect économique. La réintégration de ces notions est nécessaire si la science de l'organisation voulait soutenir un développement durable qui tient compte des aspects écologiques et sociaux (Thomas et al., 1995). Le concept du développement durable lui manque beaucoup de cohérence, quant à sa perception et son interprétation. Ces dernières devront subir plus de rigueur intellectuelle, malgré l'effort considérable de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement des Nations Unies pour réduire le fossé entre le concept et sa représentation

managériale effective. Le développement durable implique ainsi que l'objet de préoccupation est l'ensemble du processus de progrès économique dans lequel l'économie contribue à l'amélioration du bien-être humain. Toutefois, le stock de capital naturel, interprété comme bien commun avec les générations futures, doit être conservé. Selon cette logique, le développement soutenable doit se traduire par la justice vis-à-vis des personnes socialement défavorisées, des générations futures et de la nature. La difficulté découle de notre ignorance des natures des interactions entre l'environnement, l'économie et la société ; et les dommages sociaux et économiques découlant de faibles marges de résistance aux chocs externes dont les crises de différentes catégories (politiques, économiques, sociales et écologiques comme les changements de température et les catastrophes naturelles, etc.).

Ainsi, la valeur de notre assurance à l'encontre des menaces suscitées peut servir pour évaluer le coût qu'on doit à la nature et à la société. Ce devoir traduit la notion de responsabilité vis-à-vis de l'environnement qui peut se manifester par des réglementations plus contraignantes s'adressant à l'homme généralement, mais aux sociétés qui exploitent les ressources essentiellement. Pour les ressources naturelles forestières par exemple, on peut se poser les questions suivantes : Quel management des forêts peut réaliser le bien être de toute personne ayant droit à partager le fruit de ce bien naturel ? Comment évaluer la façon d'agir avec ces ressources naturelles qui font un commun avec les générations futures et comment évaluer une activité vis-à-vis de la soutenabilité ? Ces questions nous renvoient toujours au point d'accès se situant entre le concept de soutenabilité et sa mise en œuvre pratique par des outils, techniques, règles et lois pour arrondir les angles entre l'aspect économique, social et environnemental.

Les banques, les sociétés, les organisations gouvernementales et non gouvernementales se précipitent pour faire du développement durable leur slogan d'activité. Or, il y avait un manque de clarté au niveau de la définition du concept même du développement durable (Lélé, 1991). L'absence d'un cadre théorique et analytique clair rend difficile de déterminer si les nouvelles politiques adoptées pour promouvoir la soutenabilité vont favoriser une forme respectueuse de l'environnement et seront socialement significatives pour le développement. Pezzey and Toman (2002) voient, de leur part, que l'efficacité économique et l'équité sociale sont des concepts différents, et que les économistes ont besoin

de maintenir cette distinction lors de l'analyse des questions liées au progrès économique à long terme et à l'environnement. En effet, les coûts des avantages environnementaux à long terme dépendent, en fin de compte, des hypothèses implicites ou explicites sur la répartition intergénérationnelle des revenus, donc sur les obligations de la génération actuelle vis à vis des générations futures. Pearce and Atkinson (1993) considèrent qu'une économie est durable si elle économise plus que la moins-value totale sur les capitaux engagés. Les capitaux désignés concernent le capital naturel et celui inventé ou créé et engagé par l'homme.

D'après Daly (1990), depuis que l'économie humaine est un sous-système d'un écosystème global fini, il est clair que la croissance économique ne peut pas être durable sur de longues périodes. La croissance durable à long terme devrait être ainsi rejetée. A cet effet, pour la gestion des ressources renouvelables, il faut respecter deux principes évidents du développement durable. Le premier principe est le taux de prélèvement qui doit être égal au maximum au taux de régénération des ressources alors que le deuxième principe concerne les taux d'émission des déchets qui doivent correspondre aux capacités d'assimilation des écosystèmes naturels dans lesquels les déchets sont émis. Ces deux notions sont d'une importance majeure, notamment pour rapprocher une mise en œuvre du concept de la soutenabilité. La capacité de régénération des ressources et celle d'assimilation des rejets doivent être considérées comme un capital naturel. L'échec de maintenir ces capacités doit être traité comme consommation de capital, et donc une atteinte à la soutenabilité. La gouvernance peut admettre de tels principes lors du traitement avec le dossier de la soutenabilité.

De ce fait, les entités microéconomiques ne doivent pas créer seulement une valeur purement économique, mais elles devraient adhérer aux objectifs environnementaux et sociaux qui peuvent leur procurer des avantages certains (Jeurissen, 2000). La réussite future du marché, selon Jeurissen (2000), dépend souvent de la capacité d'une entreprise à satisfaire le trident de la rentabilité, la qualité de l'environnement et l'équité sociale. Les managers sont appelés, de plus en plus, à accorder de l'importance à l'impact social, environnemental et économique de l'entité au niveau de son comportement vis-à-vis de l'environnement d'affaires (Henriques and Richardson, 2004). Il en découle que l'assurance d'un réseau de création de valeur soutenable est une tâche complexe pour une entreprise tant que le

comportement de ses partenaires influence sa performance en matière de soutenabilité. A cet effet, la prise en compte de la soutenabilité dans la relation fournisseur-consommateur devient cruciale pour parvenir à la soutenabilité dans le réseau de création de valeur (Carter and Jennings, 2004; Amaeshi et al., 2008).

Les partenaires du monde des affaires, qui devront transposer les principes et concepts en décisions managériales stratégiques, sont les entreprises, le gouvernement, les consommateurs et les composants de la société civile. Toutefois, on a signalé que l'ampleur de la soutenabilité est universelle dans le temps et dans l'espace d'après son concept. Cet aspect lui procure la spécificité d'être un sujet de préoccupation institutionnel et stratégique de l'Organisation des Nations Unies (ONU). La phase la plus importante de cette préoccupation c'est traduit par la création d'un Pacte Mondial (PM) au cours de l'année 2000 (<https://www.unglobalcompact.org/>). Ce PM rassemblait les entreprises et les organismes des Nations Unies autour de neuf principes universels relatifs aux droits de l'homme, aux normes du travail et à l'environnement. Depuis le 24 juin 2004, le PM compte un dixième principe relatif à la lutte contre la corruption comme énuméré à l'annexe 1.B. L'un des objectifs de l'ONU est d'intégrer les principes du PM au système décisionnel des entreprises.

Le défi essentiel que présente le concept de soutenabilité, c'est de le traduire en principes concrets pour le système managérial, qui le transforme en stratégies et décisions opérationnelles au niveau des différentes activités de l'entreprise. Ainsi, l'action de l'ONU peut servir de cadre à partir duquel les gouvernements peuvent s'inspirer pour imposer aux entreprises un contexte favorable au respect de tous les composants de la soutenabilité.

### **1.2.3. Déclinaisons forestières de la soutenabilité**

La soutenabilité nécessite la définition d'approches explicites traduisant l'ensemble de ses aspects, ainsi que les outils de leur intégration dans les politiques économiques et les réglementations subséquentes. Toutefois, les enjeux économiques peuvent freiner une mise en œuvre rationnelle de la gestion durable des forêts. Alors que la nature même des aspects économiques des forêts à mettre en valeur, au moyen de l'éventail des instruments des politiques forestières, demeure une question à controverse et d'une certaine complexité (Negny, 2004).

Les modèles de l'économie classique, dominants depuis la deuxième guerre mondiale, sont bousculés par le volet de la gestion responsable des ressources et de la préservation de la biodiversité. La prise en considération du facteur environnement, dans les critères de production, suppose des modifications dans les mécanismes de gestion, de circulation et de contrôle des ressources (Arnaud et al., 1993), ce qui influence tout le système du réseau de création de valeur. Le mode de développement, conçu par la Conférence Mondiale sur l'Environnement et le Développement de Rio de Janeiro en 1992, est celui qui contribue aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs. A partir de cette définition doit découler une approche permettant de concevoir une vision sur l'intégration de cette notion dans les systèmes de management de l'économie classique.

La forêt se trouve au cœur des questions de développement durable, aussi bien pour ses enjeux écologiques (conservation de la biodiversité végétale et animale, régulation des ressources en eau, stockage du carbone, etc.), sociaux (amélioration des conditions de vie des populations qui en dépendent, valorisation des connaissances traditionnelles, maintien de l'existence de ces écosystèmes pour les générations futures, etc.) qu'économiques (production et exploitation des ressources ligneuses, source de revenus pour les populations locales, etc.). «Face aux signaux d'alarmes lancés sur l'état des forêts à la fin des années 1980, celles-ci se sont donc retrouvées propulsées au cœur du débat sur le développement durable» (Leroy et al., 2013). L'exploitation des forêts pour des raisons énergétiques à grande échelle est une question complexe tant que la soutenabilité demeure un concept multidisciplinaire et difficile à mettre en œuvre. Sous le contexte de la soutenabilité, les décisions politiques stimulent en général l'exploitation et la valorisation des ressources forestières sous prétexte qu'elles sont renouvelables. Cependant, la nature et l'étendue des biens et services de l'écosystème forestier à valoriser s'opère dans un contexte d'incertitude vue la complexité de l'évaluation de l'impact sur l'environnement de l'exploitation de ces ressources.

#### **1.2.4. Stratégie régionale du développement durable**

Le gouvernement du Canada a franchi une étape importante vers un avenir durable en adoptant, en 2008, la loi fédérale sur le développement durable. L'objet de cette loi

consiste à « définir le cadre juridique pour l'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie fédérale de développement durable (SFDD), qui rend le processus décisionnel en matière de l'environnement plus transparent et fait en sorte qu'on soit tenu d'en rendre compte devant le Parlement ». En 2010, le Canada a adopté une stratégie fédérale de développement durable pour instituer une politique environnementale, plus transparente et plus responsable, munie de cycles stratégiques triennaux (2010-2013, 2013-2016, 2016-2019, etc.). La stratégie fédérale de développement durable comporte des objectifs stratégiques à moyen et long terme avec des plans concrets et des outils de réalisation selon des thématiques bien sélectionnés. Des organes de suivi ont été instaurés afin de relever les défis se rapportant aux changements climatiques, à la qualité de l'air et à la qualité et la disponibilité de l'eau afin de protéger la nature et les canadiens. À l'instar du premier cycle la SFDD relative à la période 2013-2016 vise à mieux intégrer les dimensions sociales et économiques à travers une stratégie qui fournit de l'information sur les facteurs sociaux et économiques et les effets des changements environnementaux, ainsi que sur la façon dont les mesures environnementales du gouvernement fédéral peuvent procurer des avantages économiques et sociaux.

La SFDD du Canada, pour la période 2016–2019, mentionne un objectif à long terme sur la gestion soutenable des terres et forêts. Le rapport stipule que les terres et les forêts soutiennent la biodiversité et fournissent divers services écosystémiques pour les générations à venir tout en rappelant la réglementation sur la gestion de la qualité des effluents qui supervise le rejet de substances nocives par les usines de P&P dans les eaux où vivent les poissons.

La gestion durable des forêts, à cet effet, constitue une des cibles prioritaires du développement durable. La cible nationale proposée voulant que d'ici 2020, des progrès soient réalisés en matière de gestion durable des forêts du Canada (Ministre des Ressources naturelles ; site internet du gouvernement). Concernant les défis, afférents aux changements climatiques et à la qualité de l'air, deux cibles ont été définies. La première, visait l'atténuation des changements climatiques en réduisant, d'ici 2020, de 17 % les émissions totales de Gaz à Effet de Serre (GES) au Canada, par rapport aux niveaux d'émission de 2005. La deuxième cible visait l'amélioration de la qualité de l'air extérieur en assurant la conformité avec les limites d'émissions réglementées d'ici 2020. Cette dernière cible visait

à réduire les émissions des polluants atmosphériques pour atteindre les objectifs du Système pancanadien de Gestion de la Qualité de l'Air (SGQA). La SFDD pour la période 2016-2019 prévoit une réduction des GES de 40 % en dessous des niveaux de 2005 à l'horizon 2030.

Pour atteindre les cibles citées, certaines stratégies ont été déterminées en fonction d'un certain nombre d'objectifs ayant trait à l'implantation des technologies et industrie propres, du transport écologique, de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables.

Les stratégies de mise en œuvre relatives aux objectifs suscités concernent :

- L'évaluation du rendement environnemental des technologies nouvelles et émergentes ;
- Le développement qui favorise la création de nouvelles technologies pouvant réduire les émissions des GES et améliorer l'efficacité énergétique ;
- Le financement des projets qui peuvent aider à optimiser l'utilisation des ressources, valoriser les ressources résiduelles et contribuer à l'éco-efficacité ;
- L'appui de la croissance des services des entreprises liées à la fabrication, y compris ceux qui intègrent l'innovation à la conception et au développement de produits et à la chaîne d'approvisionnement ;
- L'encouragement des entreprises, par la voie de la déduction pour amortissement accéléré destinée à l'équipement de production d'énergies propres, à investir dans les équipements qui peuvent contribuer à une réduction des émissions et à la diversification de l'approvisionnement énergétique ;
- La tendance d'intégration de nouveaux projets pour une valorisation lignocellulosique selon de nouvelles voies de produits et de marché :
  - La CNC (Cellulose Nanocristalline) : Il s'agit d'une matière qui améliore la résistance des matériaux destinés au marché de la construction aéronautique et automobile, l'industrie des cosmétiques et médicale et la partie cellulosique destinée au secteur du textile par suite de l'augmentation du prix du coton ;
  - Le bioraffinage et le bois d'ingénierie.
- Le développement de nouveaux modèles d'affaires qui renforcent la diversification des produits à haute valeur ajoutée avec un changement de la chaîne logistique au niveau de la distribution et de l'exploration des marchés. Il faut passer de la logique des

produits simples commercialisés à grande échelle aux produits diversifiés, compétitifs et bien conçu selon les exigences du besoin du consommateur industriel et selon le management de la chaîne logistique ;

- Le renforcement de la recherche forestière pour trouver des issues de production et de marché. On cite, le Programme des Technologies Transformatrices (PTT) administré par l'Institut Canadien de Recherche Forestière, le Consortium de recherche FORAC ayant pour mission la recherche et le transfert des connaissances pour l'avancement de l'industrie des produits forestiers, la Direction de la Recherche Forestière structure du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune ayant pour mission l'amélioration de la pratique forestière au Québec et le Bureau du Développement Durable Environnement Canada, etc.

Concernant le secteur des P&P, les stratégies considèrent que le maintien et la pérennité de ce patrimoine devient une question urgente et d'ampleur socioéconomique majeure. Pour amorcer une reprise réussie, il fallait déclencher une restructuration soutenue au niveau des investissements de rénovation technologique pour se convertir vers de nouvelles perspectives de production et de marchés valorisant les potentialités des ressources et du savoir-faire capitalisés. Des projets importants de réanimation économique et environnementale ont été déployés. Les principaux projets concernent l'exécution de programmes d'innovation de grandes envergures financés par le gouvernement. L'une des meilleures illustrations est le programme PEPP (Programme d'Écologisation des P&P) financé par l'injection de 1 Milliard de \$ au titre des investissements destinés à améliorer les perspectives environnementales des P&P. Les résultats ont été très rassurantes pour la plupart des projets réalisés.

### **1.3. Crise de soutenabilité et intégration de la production bioénergétique dans les P&P**

Nous présentons dans cette section, les tendances de recherche et les faits qui ont marqué la crise de soutenabilité du secteur des P&P. Les préoccupations du secteur passent de l'aménagement environnemental des rejets polluants à l'intégration des bioraffineries de deuxième génération pour la production bioénergétique. Un aperçu sur le contexte actuel du

marché international des P&P et les tendances d'investissement seront présentés avant d'aborder l'étude sur les tendances de recherche.

Après deux siècles, l'industrie papetière canadienne est devenue un patrimoine commun par ses effets socioéconomiques majeurs (Jean-Paul, 2014). Le secteur était à l'origine de la prospérité et la naissance des grandes villes et a joué le rôle de levier faisant du Canada un leader mondial dans l'exportation des papiers journaux. Avec 75100 employés en 2012 (D'Amours et al., 2014), ce secteur continue à jouer un rôle socioéconomique capital dans l'économie du pays. Cependant, le vieillissement technologique, les crises du marché extérieur des P&P et la situation financière difficile menacent l'existence même du secteur. L'industrie papetière durant cette dernière décennie montre des signes d'essoufflement. Plusieurs usines ferment et le secteur a perdu entre 2003 et 2013 plus que 30% de sa force de travail issue des milieux communautaires. Ce contexte alarmant a retardé ces sociétés pour adopter des technologies environnementales, ce qui a aggravé la sécurité socioéconomique des collectivités tributaires de la forêt dans les différentes provinces. Au niveau de la question environnementale, le secteur était source de pollution touchant à la fois l'hydrosphère et l'atmosphère par les rejets organiques et toxiques, en plus de l'émission des GES. Au niveau économique, le réseau de création de valeur a subi une détérioration au niveau de sa composante majeure qui est le marché. Ce qui met en péril le plan d'affaires classique se basant sur un produit réalisé et commercialisé à grande échelle (production de masse).

Ainsi, l'industrie des pâtes et papiers a connu des crises et des changements majeurs ayant une incidence sur la structure de l'offre et la demande au cours de la dernière décennie. L'investissement dans la capacité de production de pâtes et papiers en Asie et en Amérique du Sud a considérablement réduit la part de marché de l'industrie des P&P pour le Canada et pour d'autres pays historiquement reconnus par leur importante part de marché (McCarthy and Lei, 2010). Karikallio et al. (2011) ont prouvé, en utilisant différentes approches analytiques, que l'industrie mondiale de P&P est un marché fortement concurrentiel. La part de marché des plus grandes entreprises mondiales dans l'industrie de P&P a considérablement diminué ces dernières années. Il a été démontré, en outre, que la demande d'exportation de papier est élastique par rapport au prix d'exportation, ce qui implique qu'une augmentation de l'exportation réduit substantiellement sa valeur. La part de marché des sociétés Nord-

Américaines est passée de 41% à 35% entre 2002 et 2006. En 2005-2010, près de 60% des investissements dans la production de pâtes commerciales et plus de 70% des investissements, pour la production du papier, ont été réalisés en Asie. Selon les statistiques de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), la quantité d'exportation de pâte de bois entre 1995 et 2014 a diminué de 10% pour le cas canadien, alors qu'elle a augmenté au cours de la même période d'environ 455% et 518% respectivement pour le Brésil et l'Indonésie. En ce qui concerne la quantité de pâte de bois produite pour la même période, elle a diminué de 32% pour le cas canadien, alors qu'elle a augmenté, au cours de la même période, de 185%, 245% et 294% respectivement pour le Brésil, l'Indonésie et la Chine. Le changement de la structure du marché est dû aussi à la diminution de consommation de papier par suite de l'émergence des moyens de communication numériques.

Les tendances de recherche, durant les trois dernières décennies, expriment la crise de soutenabilité du secteur de P&P, ainsi que les solutions envisageables pour une mutation soutenable. Nous avons mené, à cet effet, une étude sur plus de cent (100) papiers de recherche réalisés au titre des 27 dernières années (entre 1991 et 2017) sur le secteur de P&P pour déceler les aspects de cette mutation. L'étude envisagée a permis de distinguer clairement que l'intégration des BRFI dans les P&P n'est autre que le résultat d'une évolution historique ayant ses spécificités et ses motifs. Les sous-sections suivantes présentent le découpage historique de la période concernée et les tendances de recherche y afférentes.

### **1.3.1. Ère de l'émergence de la notion de soutenabilité (1991-2002)**

C'est la période qui suit la définition du concept de développement durable par les Nations Unies en 1987 (Brundtland Commission, 1987) et l'émergence d'une réglementation internationale contraignante envers les pays industrialisés pour la composante environnementale du développement (voir la famille des normes ISO 14000 pour le management environnemental (Secrétariat central de l'ISO, 2009)). Les travaux de recherche relatifs à cette période traitent essentiellement l'évaluation et le diagnostic de la pollution provenant des rejets de produits chimiques et organiques et leurs effets néfastes sur les milieux aquatiques et sur la vie sociale. Toutefois, cette période a été marquée plus par des analyses et des diagnostics des problèmes environnementaux que par des propositions

consistantes (Martel and Kovacs, 1997; Gauthier and Archibald, 2001; Ali and Sreekrishnan, 2001; Kovacs et al., 2002).

Le traitement des rejets provenant des usines de P&P a fait l'objet d'une revue suggérant la digestion anaérobie comme solution prometteuse pour le traitement des déchets liquides (Thompson et al., 2001). Cependant, la gazéification de la liqueur noire est considérée comme une mutation importante liée aux changements dans le système industriel pour la production énergétique par la cogénération. L'analyse par la "méthode du pincement" ("*pinch analysis*") du système de cogénération intégrant la gazéification a été présentée dans (Berglin and Berntsson, 1998).

### **1.3.2. Standardisation de l'aménagement environnemental (2003-2008)**

Cette période a été marquée par la révision de la norme ISO 14001 en 2004 qui définit une série d'exigences spécifiques à la mise en place d'un système de management environnemental au sein des entités, abstraction faite de leur taille et activité. La recherche sur les P&P pendant cette période commence à proposer des solutions aux problèmes environnementaux imminents. Barla (2007) a contribué à propos du sujet de la certification conformément à la norme ISO 14001 et les mesures imposées au secteur des P&P concernant les rejets et les émissions. Doonan et al. (2005) ont contribué au titre des déterminants de la performance environnementale du secteur des P&P. Les 4 normes, ISO 14040-14041-14042-14043, dédiées à l'analyse du cycle de vie ont été fusionnées, en raison d'une révision en 2006, pour obtenir les deux normes qui fondent actuellement la méthode d'évaluation de l'impact sur l'environnement, ISO 14040 et 14044, 2006.

L'amélioration de l'efficacité énergétique devient un axe pivot de recherche (Sarimveis et al., 2003) et la gazéification de la liqueur noire attire l'attention comme source d'énergie potentiel pour les P&P. La voie de gazéification a été explorée notamment pour ses conséquences socio-économique et son importance pour la cogénération (Eriksson and Harvey, 2004). Une revue, sur la performance des méthodes de traitement des rejets liquides, a été réalisée par Pokhrel and Viraraghavan (2004). Dans la même veine, une revue sur les technologies de réduction des rejets organiques a été proposée dans (Mahmood and Elliott, 2006). Des solutions plus élaborées commencent à émerger concernant la valorisation des

boues papetières, composées des résidus de la fabrication du papier, en éthanol par fermentation (Sjöde et al., 2007).

### **1.3.3. Crise économique du secteur de P&P et émergence des BRFI comme solution à la crise de soutenabilité (2009-2017)**

C'est la période la plus explicite, au niveau des solutions proposées, pour se conformer aux exigences environnementales tout en diversifiant la production. Les travaux de recherche pour cette période adoptent l'intégration de la production bioénergétique comme solution aux soucis diagnostiqués au cours des périodes d'avant. Les deux voies les plus citées concernent la production de l'éthanol par fermentation de l'hémicellulose contenue dans la liqueur noire (Huang et al., 2010) et la gazéification de la liqueur noire et de la biomasse résiduelle.

Avant 2011, le sujet d'intégration des BRFI dans les P&P commence à prendre de la place dans la recherche avec des propositions d'intégration simples. L'optimisation énergétique était le premier mobile d'intégration lors de la mutation vers la cogénération. Cependant, la voie thermochimique de gazéification de la liqueur noire et de la biomasse résiduelle est le plus discuté (Cortés and Rivera, 2010; Wetterlund et al., 2011; Consonni et al., 2009; Naqvi et al., 2010; Goortani et al., 2010).

Comparé à la période précédente, la gazéification s'étend sur la biomasse résiduelle autre que la liqueur noire, ce qui ouvre la voie à la production énergétique marchandable. C'est le point qui met en cause le réseau de création de valeur classique et suscite la refonte du plan d'affaires pour reconstruire le réseau de création de valeur selon les nouvelles orientations. Une série de travaux, en réponse à ces soucis, explorent les nouvelles alternatives du trio processus-produit-marché dans le cadre de la nouvelle conception industrielle dite BRFI (Mansoornejad et al., 2010). Ainsi, la proposition de la voie de conversion par gazéification à côté de l'électricité comme produit marchandable non classique pour les P&P, ouvrent les portes devant une multitude de configurations possibles.

A partir de 2011, les solutions proposées étaient doublement motivées : résoudre les questions environnementales hôte pour le secteur de P&P et chercher de nouvelles issues

pour solutionner la crise économique structurelle touchant le marché des P&P à partir de l'année 2008. Au titre de cette période, la refonte du plan d'affaires selon les paradigmes de soutenabilité répond aux soucis du secteur. Ainsi, l'intégration des BRFI a été suggérée pour conforter la situation économique du secteur tout en solutionnant les soucis environnementaux.

Les travaux de recherche traitant le sujet d'intégration des BRFI ont abordé les deux aspects susmentionnés.

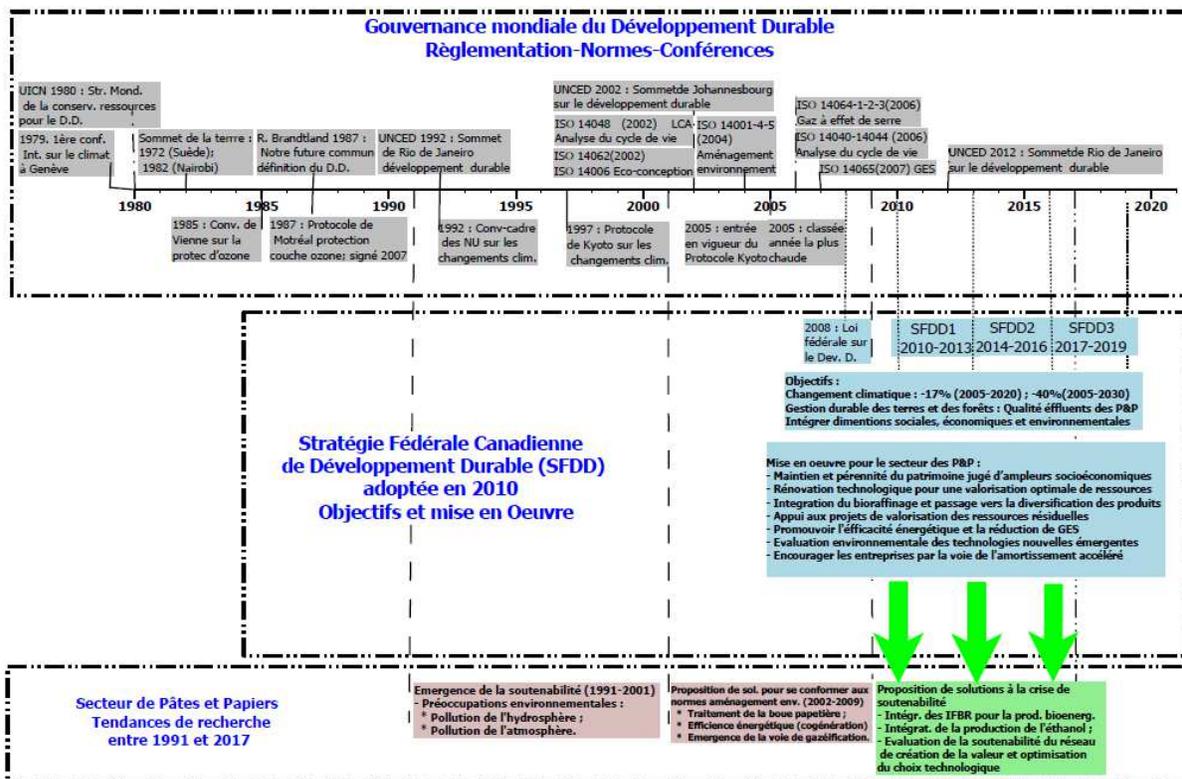
Pour l'aspect environnemental, les questions traitées concernent :

- L'intégration des technologies pour le traitement des rejets organiques et le recyclage des coproduits de pâtes et papiers. L'objectif recherché était la résolution de la pollution provenant des rejets chimiques et organiques conformément à la norme 14001 sur l'aménagement de l'environnement ;
- La promotion des technologies qui améliorent l'efficacité énergétique, afin de réduire l'utilisation des combustibles fossiles identifiés comme source majeure d'émission de GES.

Pour l'aspect économique, les questions traitées concernent l'intégration de nouvelles voies de production bioénergétique pour dégager de nouvelles ressources financières.

Atteindre ce double objectif est un défi sachant les risques technologiques, d'approvisionnement et de marché imminents aux solutions envisagées. La sous-section (1.4.2.) sur l'évaluation de la soutenabilité des BRFI récapitule les principales contributions qui proposent l'intégration des BRFI dans les P&P.

La figure 1.1 illustre les principaux événements de la gouvernance mondiale du développement durable, ses déclinaisons régionales pour le cas canadien et l'interférence de la stratégie énergétique canadienne avec l'intégration de la production énergétique par le secteur des P&P.



**Figure 1.1:** Gouvernance mondiale et régionale du développement durable et leurs déclinaisons sur le secteur des P&P

## 1.4. Émergence des BRFI et leur intégration aux P&P

### 1.4.1. Émergence des BRFI pour la valorisation énergétique de la biomasse

Le bioraffinage a été défini par l'Agence Internationale de l'Énergie comme le traitement soutenable de la biomasse en un éventail de produits commercialisables et d'énergie (IEA, 2008). De même, la bioraffinerie est définie selon le Laboratoire National d'Énergie Renouvelable (NREL), en tant qu'installation de transformation qui convertit la biomasse en divers produits (par exemple, biocarburants et produits biochimiques ainsi que la production d'électricité). Il faut ainsi distinguer entre les bioraffineries de première génération et les bioraffineries de deuxième génération.

Les bioraffineries de première génération s'approvisionnent en biomasses provenant des Agro-cultures de plantes sucrières et oléagineuses pour produire des biocarburants (bioéthanol et biodiésel). Leur exploitation a occasionné des conflits avec les aspects environnementaux et sociaux dont l'exploitation des terres agricoles, l'utilisation excessive

d'eau douce, des fertilisants chimiques, des pesticides et l'augmentation du prix de consommation des produits concurrents à la production des bio-fuels. Cette situation embarrassante atteint à la notion de soutenabilité ce qui a incité les chercheurs et les décideurs de la politique économique et environnementale, dans les pays développés, à réagir en conséquence pour en trouver des issues honorables quant au modèle industriel à promouvoir conformément aux exigences de la soutenabilité. D'où l'émergence de la bioraffinerie de deuxième génération dont la bioraffinerie forestière s'approvisionnant de la biomasse ligneuse. Mansoornejad et al. (2010) ont noté que la bioraffinerie forestière émerge comme une opportunité prometteuse pour l'amélioration du modèle d'affaires des entreprises de produits forestiers, mais elle introduit en même temps des défis importants en termes de choix de technologies et de risques économiques et financiers. Liew et al. (2014) soulignent que la mise en œuvre de l'approche d'intégration des processus dans l'opération de la bioraffinerie est indispensable pour améliorer l'efficacité des processus. Cela a donné lieu à divers procédés de production et multiples produits intégrables dans la bioraffinerie avec un équilibre de masse et d'énergie optimisé.

#### **1.4.2. Conception des bioraffineries de deuxième génération**

La conception des BRFI, classées comme bioraffineries de deuxième génération, est développé afin d'améliorer l'efficacité énergétique et l'équilibre de masse en intégrant différents processus de conversion tels que les processus physiques, thermochimiques, et biochimiques (Fernando et al., 2006). Un modèle pour simuler l'intégration d'autres coproduits avec la pâte à papier au sein d'une bioraffinerie forestière a été développé dans (Huang et al., 2010). Liew et al. (2014) classent les principaux processus de conversion dans les bioraffineries en deux plates-formes de base qui sont les voies thermochimiques (plate-forme de gaz synthétique '*sungas*') et les voies biologiques (plates-formes de fermentation des sucres). La plate-forme de '*sungas*' se concentre sur la gazéification des matières premières et des sous-produits de la biomasse, alors que la plate-forme de fermentation de sucres se concentre sur la fermentation des composants de la biomasse (cellulose et hémicellulose). Karlsson et al. (2014) ont noté que la coproduction de produits biologiques à haute valeur ajoutée dans les bioraffineries est une option prometteuse pour une utilisation optimisée de la biomasse. Les matériaux lignocellulosiques tels que les résidus agricoles et

forestiers, ont été identifiés comme des matières premières alternatives et attractives en raison de leur haute disponibilité et de leur faible demande en ressources. Les auteurs ont évalué, dans leur étude, le bilan énergétique et celui d'émission des GES lors de la coproduction de l'éthanol avec du biogaz et de l'électricité dans les bioraffineries utilisant de la paille et des résidus forestiers. En outre, Mohammadi et al. (2011) confirment que la voie biochimique peut être combinée avec une voie thermochimique pour la conversion du gaz synthétique. La conversion thermochimique, par gazéification à température élevée, génère un liquide intermédiaire ou un gaz synthétique qui sera transformé en biocarburants synthétiques, en utilisant un biocatalyseur tel que les bactéries ou les enzymes de fermentation.

### **1.4.3. Opportunité d'intégration des BRFI dans les P&P**

La bioraffinerie forestière a reçu une grande attention du secteur de P&P, principalement en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest, comme moyen potentiel de diversifier sa gamme de produits et de générer de nouveaux revenus. Cela a poussé les pays manufacturiers traditionnels comme le Canada à examiner de nouveau la valorisation de leurs ressources renouvelables et à chercher, en conséquence, des solutions alternatives pour convertir l'industrie forestière en entreprises soutenables et rentables. En outre, la crise de soutenabilité du secteur des P&P couplée avec la stratégie de transition énergétique du Canada explicitée respectivement au niveau des sections 1.3 et 1.2, font de l'intégration des BRFI une opportunité qui cadre avec les intérêts des preneurs de décision aux niveaux microéconomique et macroéconomique. Ainsi, un nouveau modèle d'affaires pour les P&P est devenu une nécessité de survie pour tout le secteur.

El-Halwagi and Linninger (2009) incitent à l'intégration des BRFI dans le secteur des P&P pour profiter des atouts du secteur des P&P en termes d'investissement. Pour cela, un schéma d'implémentation progressive et souple a été proposé. Bajpai (2013a) et Bajpai, (2013b) considèrent également que les P&P constituent le milieu idéal pour l'intégration des BRFI, ce qui permet selon Bajpai (2013a) une ouverture sur de nouveaux marchés, une meilleure valorisation des rejets et la production de produits à haute valeur ajoutée en citant, à titre d'exemple, que les compagnies de papiers Kraft aux USA renvoient 50% de la matière organique à l'incinération. Selon Bajpai (2013a), l'intégration des BRFI introduira un développement technologique qui permet de rationaliser l'exploitation de la biomasse.

Machani et al. (2014) suggèrent que l'intégration des BRFI aux entreprises forestières est une orientation prometteuse pour contrecarrer les défis économiques et de marché. Moshkelani et al. (2013) supposent que l'extraction des hémicelluloses et leur conversion en polymères, combustibles et produits chimiques, avant la fabrication de la pâte, est une opportunité pour le processus Kraft. Cette étude, accorde une attention particulière à deux options de produits :

- La production de l'éthanol et l'extraction de la lignine à partir de la liqueur noire qui peut être transformée en produits chimiques précieux ;
- La gazéification de résidus de bois pour produire du gaz synthétique comme source de chaleur, d'électricité, de carburant ou de produits chimiques.

Dans le processus de fabrication de la pâte Kraft, seulement 42% à 44% de la biomasse ligneuse est convertie en pâte alors que le reste, composé principalement de la lignine et de l'hémicellulose, est brûlé dans la chaudière de récupération. Cette partie peut être mieux exploitée pour augmenter la marge des revenus, grâce à divers cheminements technologiques. Moshkelani et al. (2013) reconnaissent que le choix entre différentes voies, produits et politiques de conversion dépendent des contraintes et du plan d'affaires pour chaque usine Kraft. Le secteur des P&P peut se transformer ainsi en entreprises plus diversifiées et rentables.

La BRFI est un modèle industriel soutenable défini comme un site :

- Permettant une intégration intensive des processus avancés d'énergie thermique ;
- Considérant la biomasse forestière comme principale matière première et carburant ;
- Minimisant la consommation d'eau douce et le rejet des effluents liquides ;
- Indépendante des carburants à base de combustibles fossiles et réduisant au maximum les émissions de GES.

Toutefois, les voies de transformation, le choix de produits, les technologies de conversion appropriées, les évaluations de l'incertitude du marché et le développement soutenable constituent des défis importants à relever.

#### **1.4.4. Implémentation des bioraffineries**

Le problème d'implémentation constitue un des défis les plus complexes que rencontrent les incubateurs potentiels. En effet, les perspectives d'étendre le système de la conception traditionnelle à celui des industries vertes et durables fait appel à un domaine multidisciplinaire (El-Halwagi and Linninger, 2009). En général, la plupart des contributions considèrent qu'il n'y a pas de modèle unique des BRFI. Selon (Farmer, M.C., 2005; Bajpai, 2013a) il existe un grand nombre de conceptions industrielles des BRFI. Ces dernières dépendent notamment du contexte d'approvisionnement en biomasses et des différentes technologies de conversions viables. A cet effet, certaines contributions de recherche plaident pour l'expérimentation (Negny, 2004; Machani et al., 2013; Ghezzaz and Stuart, 2011) comme un bon départ avant l'implémentation effective des BRFI. Cette tendance a été controversée par une approche qui suppose que le développement de nouveaux processus et leur transfert à l'échelle industriel à partir d'un milieu d'expérimentation réelle demeure inefficace et coûteux en termes de ressources matérielles et de temps (Zondervan et al., 2011). Lundberg et al. (2014) constatent, lors d'une étude de conversion d'une usine Suédoise de pâte en kraft existante, qu'il a été possible d'augmenter le niveau d'intégration de la chaleur de l'usine pour l'autosuffisance en plus d'un excès qui pourrait faciliter l'intégration d'une usine de séparation de la lignine ou pour la production d'électricité. Huang et al. (2009) considèrent que les bioraffineries forestières classiques de P&P, avec une longue histoire de l'utilisation durable de la biomasse lignocellulosique, offrent une plate-forme appropriée qui pourrait être élargie aux futures BRFI. Bajpai (2012) considère la soutenabilité comme un élément clé du concept des BRFI tout en suggérant qu'il faut édifier un plan d'affaires mieux adapté aux conditions actuelles du marché, tout en préservant l'activité principale de P&P. Toutefois, le potentiel de mise en œuvre de toute bioraffinerie est évalué dans le contexte de la matière première disponible, des procédés technologiques applicables et de la demande du marché selon Moshkelani et al. (2013). Concernant spécifiquement l'implémentation des BRFI dans les entreprises de P&P, Priadi et al. (2014) motivent l'intégration des BRFI par le fait que les P&P sont confrontés à des défis avec les mécanismes d'efficacité énergétique et la gestion des polluants résultants, compte tenu des commentaires environnementaux et des exigences légales en cours. Dans le même esprit, Huang et al. (2010) ont souligné que les usines de P&P représentent une plate-forme propice pour utiliser plus efficacement de la

biomasse abondante et renouvelable. La transformation des usines modernes de P&P en BRFI présente une excellente occasion de produire, en plus de la fibre de cellulose précieuse, des coproduits, y compris l'éthanol de qualité carburant et de l'énergie supplémentaire, ce qui entraîne une rentabilité financière accrue et une réduction potentielle des émissions de GES. Moshkelani et al. (2013) ont souligné que l'incorporation d'une unité de bioraffinerie à un procédé de fabrication de pâte Kraft, en cours d'exploitation, présente d'importants avantages au niveau technologique, économique et social par rapport à la construction d'une nouvelle bioraffinerie. Moshkelani et al. (2013) ont présenté la stratégie d'implémentation progressive d'une BRFI intégrée à une usine Kraft et ont discuté des défis conséquents. Marinova et al. (2009) ont noté que l'optimisation de l'énergie devrait faire partie intégrante de toute tentative de conversion réussie d'une usine de pâte Kraft classique en BRFI. Toutefois, la stratégie d'implémentation soulève un certain nombre de problèmes dont la mise en œuvre de la fabrication des produits à haute valeur ajoutée, ainsi que la maîtrise et la soutenabilité des nouvelles technologies. Ainsi, une transformation réussie nécessitera une mise en œuvre progressive de nouveaux plans d'affaires pour donner aux entreprises la possibilité de maîtriser les nouvelles technologies, de minimiser les risques et d'accroître la rentabilité.

Galbe et al. (2011) suggèrent qu'il est judicieux de vérifier toutes les étapes du processus d'intégration à l'échelle des sites pilotes avant l'implémentation. Les derniers auteurs ont spécifié les étapes critiques du processus telles que le prétraitement, le processus simultané de saccharification-fermentation et aussi des problèmes plus techniques tels que la filtration de la lignine et l'influence de l'intégration des processus de recyclage des déchets.

Huang et al. (2009) considèrent que la technologie pour la bioconversion de la biomasse lignocellulosique se rapproche rapidement de la viabilité commerciale. Ils considèrent, en outre, qu'il existe une possibilité pour le gouvernement fédéral canadien, en collaboration avec ses homologues provinciaux, de mettre en œuvre la politique qui soutient les efforts de bioraffinage à base lignocellulosique. Les BRFI basées sur la biomasse lignocellulosique pourront accéder à une plus grande variété de matières premières, y compris la biomasse forestière (Huang et al., 2009).

## **1.5. Évaluation de la soutenabilité des bioraffineries**

Wiktorian (2004) affirme que les usines de P&P, étant un grand consommateur de biomasses et d'énergie, participent pleinement au cycle de carbone. C'est la raison pour laquelle le Canada considère la biomasse et les déchets du bois au sommet de la liste des carburants renouvelables pour le secteur des industries forestières.

La BRFI est un modèle industriel qui permet d'intégrer d'une façon soutenable la valorisation des déchets tout en améliorant l'indépendance énergétique. Toutefois, l'implémentation de ces entités, coûteuses et techniquement compliquées, demeure hors portée des cibles des investisseurs. La validation de l'hypothèse de soutenabilité de ces entités demeure une question à démontrer notamment lorsque leur implémentation se fait en rétro-installation dans le secteur des P&P.

### **1.5.1.Évaluation de la soutenabilité**

La Soutenabilité par l'Analyse du Cycle de Vie (SACV) (équivalent en anglais de : *'Life Cycle Sustainability Assessment'* (LCSA)) a été considérée comme l'une des méthodes les plus communes pour évaluer la soutenabilité des produits et des processus. Toutefois, le cadre d'évaluation de la soutenabilité, selon l'approche cycle de vie, est encore en cours de développement avec des cas d'application encore très limités (Neugebauer et al., 2015). Cependant, il faut distinguer entre la méthode LCSA qui évalue la soutenabilité d'un produit, processus ou service, sur tout son cycle de vie, et l'évaluation du réseau de création de valeur soutenable qui tente d'intégrer cette méthode. L'importance de l'intégration de la méthode LCSA réside, conceptuellement, au niveau du respect de l'approche cycle de vie pour les différents aspects qui composent la soutenabilité. En effet, le concept de la pensée cycle de vie joue un rôle important dans la mise en œuvre pratique des aspects de la soutenabilité selon (Neugebauer et al., 2015). L'évaluation de la soutenabilité devient, de plus en plus, une question vitale pour les entreprises. Les preneurs de décisions doivent décider des investissements stratégiques sous contrainte de perspectives commerciales volatiles et largement influencées par les contraintes afférentes à la soutenabilité et la perception du public. Par conséquent, l'intérêt proactif des entreprises vis-à-vis de leur décision qui impactent la soutenabilité augmente (Keller et al., 2015).

La méthode LCSA n'est pas encore normalisée à cause des difficultés d'intégration de l'approche cycle de vie par les méthodes afférentes aux différents aspects évalués. Les difficultés concernent notamment l'aspect social et, selon un degré moindre, l'aspect économique. En plus, le cheminement ou le mappage des indicateurs d'impacts catégoriaux (relatifs à chaque catégorie d'aspect de la soutenabilité) vers des indicateurs globaux (relatifs à la soutenabilité) représente un défi majeur pour l'applicabilité de la méthode LCSA.

En outre, l'évaluation de la soutenabilité du réseau de création de valeur se base souvent sur un compromis entre les indicateurs de performance des différents aspects. Ces indicateurs sont calculés, le plus souvent, sans respect de l'approche cycle de vie à cause de l'absence d'inventaires normalisés à cet effet. Le chevauchement au niveau de la portée relative à chaque aspect constitue un autre handicap d'évaluation à côté du problème conceptuel de cheminement d'impacts. Nous présentons, pour le reste de cette sous-section, l'évolution conceptuelle de la méthode LCSA et les tentatives de son Application.

La normalisation de la méthode LCSA n'a pas vu le jour malgré l'effort conceptuel déployé notamment dans (UNEP/SETAC, 2009) et (UNEP/SETAC, 2011). Les tendances conceptuelles les plus confirmées annoncent la reprise des mêmes étapes de la méthode LCA, standardisée par les ISO 14040 et 14044 (2006). Toutefois, les difficultés qui entravent la standardisation de la méthode LCSA résident notamment au niveau de la complexité d'agrégation des indicateurs d'impacts sous l'égide des zones de protection de la soutenabilité. Ainsi, le cheminement d'indicateurs d'impacts reste un dilemme à résoudre pour assurer le routage entre les indicateurs locaux et globaux de la soutenabilité comme illustré par la figure 1.2.

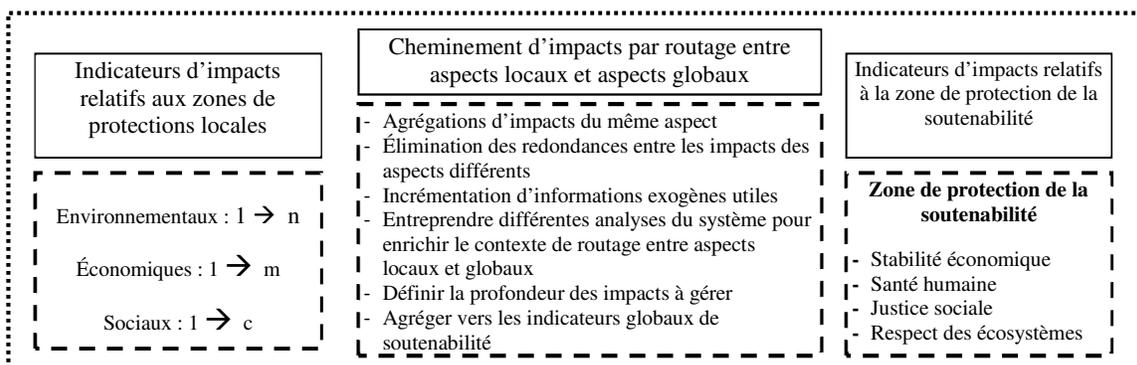


Figure 1.2 : Schéma du cheminement des indicateurs d'impacts entre aspects locaux et globaux

Une des conceptions les plus élaborées et les plus officielles de la méthode LCSA est présentée par (Valdivia et al., 2013) en se basant sur l'initiative (UNEP/SETAC, 2011) et sur la définition de la soutenabilité de Kloepffer (2008). L'approche UNEP-SETAK se base sur l'articulation des trois méthodes (LCA, SLCA et LCC) et suit la même démarche que celle de l'LCA. Le tableau 1.1 récapitule le contenu des différentes phases de la méthode LCSA.

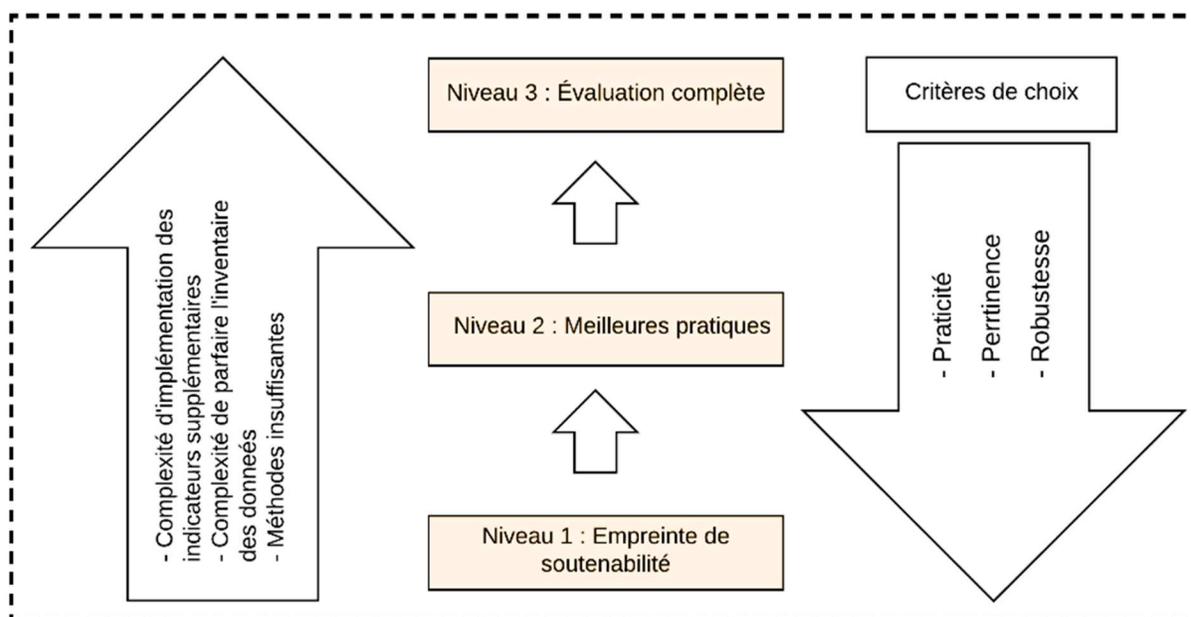
**Tableau 1.1 :** Cadre de la méthode LCSA confectionné d'après (UNEP-SETAK *initiative life cycle*) reporté par Valdivia et al. (2013)

Phase (selon démarche LCA)	Proposition selon (Valdivia et al., 2013) en se basant sur l'initiative UNEP-SETAK, 2011
Définition de l'objectif et de la portée de l'étude	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un <b>objectif</b> commun devrait être formulé bien que les objectifs de chaque technique puissent être différents.</li> <li>- <b>L'unité fonctionnelle</b> devrait considérer l'utilité technique (comme la qualité, la fonctionnalité, etc.) ainsi que l'utilité sociale (comme la commodité, le prestige, etc.).</li> <li>- <b>La portée du système étudié</b> doit être pertinente mais elle pourrait être intrinsèque à la technique (méthode). Recommandation de l'incorporation de tous les processus pertinents pour au moins une des techniques.</li> <li>- <b>Les catégories d'impact</b> devraient être liées à chaque technique pour faciliter les compromis potentiels et identifier le double comptage lors de la collecte d'informations.</li> <li>- <b>Les méthodes d'allocation</b>, l'utilisation de proportions physiques ou économiques est suggérée, car il est accepté dans la pratique lors de la mise en œuvre des trois techniques séparément.</li> </ul>
ILCSA Inventaire de la soutenabilité par l'Analyse du Cycle de Vie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'<b>ILCSA</b> suggéré est un inventaire du cycle de vie recueillis au niveau du processus ou au niveau organisationnel. L'LCA fonctionne avec les données signalées au niveau du site, des installations et des processus, le SLCA et le LCC peuvent utiliser des données collectées et signalées au niveau de l'organisation ;</li> <li>- L'identification des acteurs de la chaîne dans le système de produits est essentielle ;</li> <li>- Le type de données peut être quantitatif, semi-quantitatif ou qualitatif.</li> </ul>
ELCSA Évaluation d'impact sur la Soutenabilité par l'Analyse du Cycle de Vie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La pertinence des impacts en fonction du point de vue des parties prenantes est prise en compte ;</li> <li>- Les différences dans l'exécution d'une <b>ELCSA</b> parmi les trois techniques sont remarquables et reconnues ;</li> <li>- Les externalités pour l'aspect économique peuvent ou non être monétisées dans l'approche LCC.</li> </ul>
InLCSA Interprétation d'impact sur la Soutenabilité par l'Analyse du Cycle de Vie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tous les résultats doivent être vérifiés en fonction de la qualité et de l'incertitude des données ;</li> <li>- Une représentation parallèle détaillée des trois techniques avec leurs résultats aide les parties prenantes à identifier les impacts potentiels et réels ainsi que les compromis entre les résultats des trois techniques ;</li> <li>- L'agrégation et la pondération des résultats ne sont pas recommandées.</li> </ul>

Au niveau conceptuel, certains efforts consistants, à côté des travaux de l'UNEP-SETAK, ont été déployés. Neugebauer et al. (2016) proposent une évaluation du cycle de vie économique (EcLCA) pour représenter l'aspect économique, dans le cadre de la LCSA,

conformément aux principes de la méthode LCA. Neugebauer et al., (2016) introduisent un schéma de cheminement d'impacts économiques, y compris les catégories d'impacts intermédiaires et finales, dans des domaines de protection définis allant au-delà de la conception axée sur les coûts de la méthode LCC classique. Les auteurs recommandent la nécessité de poursuivre les recherches et le réglage précis des catégories d'impacts et leur cheminement pour permettre une base d'évaluation valide et cohérente afin de favoriser la mise en œuvre pratique de la méthode EcLCA au sein de la méthode LCSA. Le cheminement d'impacts entre les indicateurs, intermédiaires ou finaux et la zone de protection de la soutenabilité est assez difficile à définir pour tous les aspects.

Dans (Neugebauer et al., 2015) une approche à trois niveaux (voir figure 1.3) a été développée fournissant une hiérarchie d'indicateurs et proposant un concept de mise en œuvre par étape de leur implémentation. Bien que des indicateurs soient disponibles pour les trois dimensions de la soutenabilité, les indications nécessaires pour la sélection des indicateurs sont manquantes.



**Figure 1.3** : Concept de mise en œuvre par étapes d'une hiérarchie d'indicateurs de soutenabilité

Un examen des indicateurs a été effectué conformément aux trois critères de praticité, pertinence et robustesse de la méthode, ensuite les indicateurs ont été classés en trois niveaux. Le premier niveau se concentre sur les indicateurs facilement applicables et pertinents pour

les processus de production. Le deuxième niveau reflète les indicateurs de bonnes pratiques actuels déjà utilisés dans les études de cas. Le dernier niveau vise à donner un ensemble complet d'indicateurs pour évaluer la soutenabilité.

Keller et al. (2015) de leur part, présentent une méthodologie d'évaluation intégrée de la soutenabilité selon l'approche cycle de vie appliquée aux bioraffineries 'LCSA intégrée' (*Integrated LCSA : ILCSA*). Cette méthodologie introduit une discussion structurée des résultats afin de tirer des conclusions et des recommandations concrètes pour les décideurs. Cette méthodologie expliquée par un simple exemple lui manque l'implémentation pratique.

Il est à signaler toutefois, que la modélisation des objectifs multiples domine actuellement les méthodologies d'évaluation de la soutenabilité du réseau de création de valeur. Quant à la résolution du modèle, on recourt souvent à l'identification d'un ensemble de solutions non dominées suivi de l'analyse multicritère pour atteindre un compromis entre les objectifs des aspects étudiés. Les cas d'application de la méthode LCSA ainsi que l'intégration de l'approche cycle de vie dans l'optimisation du réseau de création de valeur sont très limitées. Les méthodes appliquées pour l'évaluation de la soutenabilité des chaînes logistiques et des bioraffineries intégrées sont présentées au niveau de la section suivante.

### **1.5.2. Chaîne logistique verte**

Les chaînes logistiques vertes ou écologiquement durables ont fait l'objet d'un grand nombre d'études comme le montrent de nombreux articles revues (Srivastava Samir K., 2007; Sarkis et al., 2011). Le management de la chaîne logistique verte (GrSCM : '*Green Supply Chain Management*') traite de l'intégration des questions écologiques afin d'améliorer l'impact environnemental des activités de la chaîne logistique sans compromettre la performance économique et opérationnelle (Lee, 2015; Mentzer John T. et al., 2011). Pour de nombreuses entreprises, l'attention passe des considérations purement économiques à une dimension plus large qui inclut l'aspect environnemental et ce par la mise en œuvre du système de management environnemental décrit par la norme ISO 14001 dont le traitement avec des fournisseurs certifiés (Agi and Nishant, 2017; Ansari and Qureshi, 2015). Ce changement implique la mise en œuvre de plusieurs mesures respectueuses de

l'environnement dont l'écoconception, la logistique inverse, l'efficacité énergétique etc. (Zhu and Sarkis, 2004).

Alors que la méthode ACV est largement reconnue comme un outil scientifiquement fiable pour évaluer l'impact environnemental. Les techniques de modélisation basées sur la programmation mathématique ont également été largement utilisées pour intégrer les questions environnementales au GrSCM. En fait, de nombreuses études ont identifié le couplage de l'optimisation multi-objectif et la méthode ACV comme une pratique appropriée pour soutenir une prise de décision solide dans la conception durable de la chaîne logistique (Finnveden et al., 2009; Rajeev et al., 2017). Une telle intégration peut potentiellement conduire à une amélioration de la performance économique et environnementale (Cano-Ruiz and McRae, 1998; García and Caballero, 2012; Mota et al., 2015).

L'intervention du gouvernement est essentielle pour promouvoir l'industrie de la production des bioénergies, en fournissant des incitations pour créer des conditions économiques et de marché favorables. Grâce à des incitations gouvernementales, de nombreux pays ont développé des conditions favorables pour les bioraffineries (Bautista et al., 2016). La dimension technologique est également importante, en particulier dans le domaine des produits biosourcés, en raison de l'émergence de nouvelles technologies qui doivent être évaluées (Hofmann et al., 2012).

Malgré l'existence d'un grand nombre d'études sur l'intégration de l'optimisation multi-objectif et de l'ACV pour évaluer le GrSCM, seules quelques études ont considéré des applications industrielles utilisant des données réelles. En outre, dans les applications existantes, relativement rares, la méthode ACV n'est pas explicitement utilisée. L'impact environnemental est vaguement estimé à l'avance et réintégré en tant qu'attribut de produits, d'intrants et de transport, sans tenir compte d'un inventaire réaliste par processus.

### **1.5.3. Évaluation de la soutenabilité des bioraffineries intégrées**

Les bioraffineries de deuxième génération n'ont pas atteint la maturité industrielle ni la viabilité économique escomptée et demeurent en phase essentiellement expérimentale pour les biocarburants. A cet effet, elles constituent un champ très actif pour la recherche. Pour le secteur des P&P, les voies les plus explorées pour l'intégration des BRFI, concernent la

valorisation des déchets pour la réduction de l'impact environnemental et l'intégration de la production des biocarburants pour le transport. Selon (Budzianowski and Postawa, 2016), les approches traitant l'intégration de bioraffineries soutenables devraient inclure « l'intégration des plates-formes, l'échange de déchets et des produits avec d'autres industries, l'application de voies de conversion plus efficaces, l'efficacité d'étendre la base de matières premières, la fourniture de services sociaux et pour l'écosystèmes, et l'optimisation de la biomasse ».

Pour l'aménagement environnemental du réseau de création de valeur, l'approvisionnement en biomasses est l'une des premières préoccupations de l'industrie forestière désireuse d'intégrer les bioraffineries. La seconde préoccupation est la conception du réseau d'infrastructures dont la composante manufacturière (technologie et capacité de production). L'élément le plus volatile, au niveau de la chaîne de création de valeur, concerne la technologie non encore stable et le marché non structuré pour la production bioénergétique. Subramanian and Gunasekaran (2015) ont présenté une revue de littérature portant sur les travaux de recherche, traitant le management de la chaîne logistique publiés au cours de la dernière décennie pour identifier l'écoconception du réseau de création de valeur. La principale conclusion était que la recherche devrait répondre aux préoccupations concernant les pratiques propres d'intégration des processus industriels et des technologies notamment lors de la conception de nouveaux produits.

Le premier élément du réseau de création de valeur qui a attiré l'intérêt de la recherche était l'approvisionnement en biomasse. L'évaluation de la disponibilité, l'optimisation de la logistique du transport et les alternatives d'utilisation à grande échelle de la biomasse sont les préoccupations les plus discutées (Chauhan et al., 2009; Uihlein and Schebek, 2009; Ekşioğlu et al., 2009; Sultana and Kumar, 2011; Lin et al., 2014; Sharma et al., 2013; Quddus et al., 2017). Dans ce cadre, un modèle mathématique multiobjectif, abordant la planification de la chaîne d'approvisionnement durable, appliqué à l'industrie forestière canadienne a été présenté dans (Boukherroub et al., 2015). En outre, un schéma collaboratif entre les entreprises forestières (scieries et usines de papier) pour atteindre la performance économique durable a été développé dans (Lehoux et al., 2016). L'allocation durable des ressources forestières appliquée à une étude de cas canadien portant sur la stratégie d'allocation du bois a été réalisée par (Boukherroub et al., 2017). Chaker Alayet (2017)

présente des modèles mathématiques pour planifier les activités d'une chaîne d'approvisionnement compétitive de produits forestiers. Un modèle évaluant la faisabilité de l'utilisation de la biomasse forestière pour la production durable de biocarburants a été proposé dans (Shuva Gautam, 2017).

Le deuxième élément concerne la conception de la bioraffinerie intégrée et les choix stratégiques connexes afférents à l'emplacement, les infrastructures, les technologies et le portefeuille produits-marchés. Dans (Wang et al., 2013), un modèle multiobjectif est proposé pour l'optimisation de la superstructure des bioraffineries, intégrant la voie thermochimique de gazéification évalué selon les critères économiques et environnementaux compte tenu des alternatives de technologies et d'équipements. Le modèle multiobjectif détermine simultanément la sélection de la technologie, la taille des équipements et la consommation d'énergie de chaque unité en fonction des performances économiques et environnementales. Cependant, dans (Wang et al., 2013) on ne considère pas la planification stratégique à long terme du réseau de création de valeur. Mansoornejad et al. (2010) ont développé une méthodologie hiérarchique pour intégrer la conception des portefeuilles produits au réseau de création de valeur des BRFI. Diverses méthodologies pour la définition des portefeuilles produits, la sélection des processus technologiques et la conception du réseau de création de valeur sont intégrées dans la méthodologie proposée. Alex Marvin et al. (2012) évaluent la valeur actuelle nette d'une chaîne d'approvisionnement en biomasse pour la production de l'éthanol dans les régions Midwest des États-Unis, en utilisant un modèle de programmation mixte linéaire pour optimiser l'emplacement et les capacités de production des bioraffineries en conjonction avec la récolte et la distribution de biomasses. Mansoornejad et al. (2013) introduisent une approche systématique pour la planification optimale de la production et l'installation des bioraffineries. L'optimisation vise à déterminer la conception du réseau de création de valeur dont la taille et l'emplacement des installations, les stratégies opérationnelles ainsi que la sélection de la biomasse pour maximiser le profit net. Sharma et al. (2013) présentent un modèle pour optimiser la sélection des intrants et des technologies ainsi que l'intégration des procédés, des équipements et le recyclage des effluents pour une entreprise de bioraffinage multi-produits et multi-plate-formes. Slade et al. (2009) ont analysé l'impact de la conception du réseau de création de valeur sur la viabilité des projets commerciaux de l'éthanol cellulosique en Europe. Slade et al. (2009) ont démontré qu'une

analyse basée sur l'optimisation du réseau de création de valeur peut éclairer les preneurs de décision sur la structure des principaux coûts d'un projet.

L'évolution des méthodes d'évaluation vers les aspects globaux marque les derniers travaux de recherche sur la production bioénergétique. Ainsi, une mutation profonde a marqué l'évaluation du réseau de création de valeur passant ainsi de la valeur purement économique aux aspects complexes ayant trait à la valeur soutenable en conformité avec les modèles émergents de l'écoconception. En effet, la viabilité économique devient insuffisante pour exprimer la valeur créée par le réseau de création de valeur d'entreprises. L'intégration d'autres aspects, méthodes et outils d'analyse devient nécessaire voire indispensable. L'aspect environnemental vient de s'imposer, à cause de la réglementation coercitive pour la conformité avec l'aménagement de l'environnement. En outre, la standardisation de la méthode d'évaluation de l'impact environnemental LCA constitue un autre motif de taille pour l'intégration de l'aspect environnemental au niveau de l'évaluation de la soutenabilité.

A cet effet, si la viabilité économique est confirmée par certains chercheurs et pour certaines configurations de bioraffineries, elle devrait l'être aussi pour les autres aspects composant la soutenabilité. D'après Haanaes et al. (2013), plusieurs chercheurs ont cité des exemples soulignant la rentabilité économique et la viabilité de l'intégration des BRFI à court et à long termes. L'étude menée dans (Machani et al., 2014) a permis de confirmer la viabilité économique et de définir une feuille de route pour planifier l'implémentation des investissements en bioénergie en incubation dans les P&P canadiens. Cependant, et comme nous l'avons signalé plus haut, l'aspect économique devient insuffisant pour évaluer un modèle industriel définie comme soutenable de fait. L'aspect environnemental avec celui économique sont les plus cités, dans les travaux de recherche, pour exprimer la soutenabilité d'un projet de bioraffinerie. Andiappan et al. (2015) ont traité l'optimisation multi-objectif pour concevoir une BRFI durable en considérant les performances économiques, l'impact environnemental et les besoins énergétiques. Giarola et al. (2012) présentent un modèle pour la conception et la planification stratégique des réseaux de création de la valeur destinés à la production du bioéthanol de première et de deuxième génération pour optimiser simultanément les performances environnementales et financières.

Cependant, il est à signaler que l'approche cycle de vie est l'une des expressions conceptuelles les plus fondamentales pour l'intégration des méthodes d'évaluation de la soutenabilité au niveau des réseaux de création de la valeur d'entreprises. Dans (Chaabane et al., 2012), un modèle pour la conception d'un réseau de création de valeur a été développé en considérant les principes de la méthode LCA en plus des contraintes d'équilibre de masses au niveau des différents nœuds. La prise en compte explicite des coûts environnementaux dans la conception de la chaîne d'approvisionnement est cruciale pour gérer l'échange des droits d'émission selon ce dernier auteur. Mansoornejad et al. (2010) recommandent les outils d'évaluation se basant sur l'approche cycle de vie dont l'LCA, pour évaluer l'empreinte environnementale, et l'analyse multicritères (MCDM) pour faire de la décision finale un compromis des différents aspects étudiés. Certaines études récentes, modélisant le réseau de création de valeur sur un horizon de vingt ans, incluent la méthode d'analyse du cycle de vie (LCA). Dans (Cambero et al., 2016) un modèle bi-objectif, pour l'optimisation des réseaux de création de valeur, a été développé et appliqué à une étude de cas de bioraffinerie destinée à la production des bioénergies et des biocarburants à partir de la biomasse forestière en Colombie-Britannique au Canada. Ce travail ne tient pas compte de la capacité des technologies implémentées en tant que variable de décision ni de la dépréciation des investissements ou la taxation directe du revenu. En outre, les tendances futures du marché et l'évolution des taux de conversion de la biomasse en raison de l'amélioration potentielle de la technologie ne sont pas prises en considération. Dans (Mansoornejad et al., 2013) un outil d'aide à la décision a été développé, dans le cadre d'un modèle multiobjectif pour la conception d'un réseau de création de valeur, visant à optimiser les performances économiques et environnementales d'une chaîne de production combinée de sucre et d'éthanol.

Lorsqu'il s'agit d'intégrer les BRFI dans les P&P, les travaux de recherche se distinguent au niveau des différentes configurations envisagées et étudiées. La prise en compte, dans l'analyse du réseau de création de valeur, des éventuelles interactions avec l'activité incubatrice constitue un autre point de divergence au niveau des travaux de recherche. En effet, intégrer en rétro-installation les BRFI dans un projet récepteur est différent de la création en 'Greenfield' d'une BRFI. L'analyse du réseau de création de valeur tient compte dans le premier cas de la synergie avec l'activité incubatrice. Le recyclage des

coproduits et des déchets de l'activité incubatrice constituent une des alternatives d'intégration qui expriment cette synergie. Cependant, l'introduction de nouvelles voies de conversion s'approvisionnant en biomasse résiduelle constitue une nouvelle orientation stratégique concurrente pour la diversification de la production.

Dans (Benali et al., 2016), une évaluation des aspects économiques et environnementaux a été réalisée pour une BRFI destinée à la production de la lignine et ses dérivées, intégrée à une usine de pâtes utilisant la procédure Kraft. Les résultats font allusion à l'importance des nouvelles orientations vers les marchés des produits à haute valeur ajoutée. Selon l'étude, la lignine, peut constituer une voie prometteuse pour réussir la transformation des usines de fabrication de P&P en BRFI. Cependant, bien que la lignine soit un produit à haute valeur ajoutée, le marché reste faible et l'adoption de cette voie prive l'incubateur d'une source indispensable d'énergie. Moshkelani et al. (2013) proposent, dans ce dernier cas, de trouver des issues pour la production de l'énergie propre. Le concept des BRFI intégrées dans une usine Kraft a été discuté dans (Moshkelani et al., 2013). Une méthodologie a été présentée à l'appui pour mener un processus d'intégration réussi. Les attributs de réussite identifiés se basent sur l'efficacité énergétique et la confection d'une stratégie pour une mise en œuvre progressive de l'intégration. Il a été suggéré que l'intégration des nouvelles technologies bioénergétiques, dans le récepteur Kraft, soit effectuée de manière soutenable afin de minimiser l'impact environnemental. Il a été particulièrement recommandé d'intégrer une nouvelle voie pour la production de l'énergie dans le cas de la valorisation de la lignine ou des hémicelluloses retirées de la ligne de pâte Kraft. La voie de gazéification des résidus forestiers et industriels est proposée pour être couplée à l'intégration des technologies destinées à l'extraction et la valorisation de la lignine et des hémicelluloses, et ce, afin d'éviter la dépendance aux combustibles fossiles. Cependant, la lacune majeure du travail de recherche de (i.e., (Moshkelani et al., 2013)) est l'absence d'un modèle mathématique pour optimiser l'énergie lors de l'implémentation de la bioraffinerie. La gazéification de la biomasse proposée dans (Moshkelani et al., 2013) pour renforcer la production de l'énergie propre a été jugée économiquement non viable par Machani et al. (2014). Cependant, cette voie reste prometteuse car elle ouvre des voies de conversion du *sungas* en biodiesel, en bioéthanol et en biométhanol.

L'étude menée dans (Machani et al., 2014) a permis de définir une feuille de route pour planifier l'implémentation des investissements en bioénergie dans les P&P en tenant compte de la synergie avec l'activité incubatrice. dans (Machani et al., 2014) un modèle mathématique, appliqué à un ensemble de données réalistes, a été présenté. Cependant, la composante environnementale n'a pas été prise en compte, bien que l'on reconnaisse que cet aspect est une préoccupation majeure pour le secteur des P&P.

Huang et al. (2010) présentent un modèle pour simuler une BRFI produisant les pâtes de papiers commerciales avec d'autres coproduits. Le modèle a été utilisé pour comparer deux variantes à côté du procédé de fabrication de pâte Kraft classique. La première variante concerne l'intégration de l'extraction des hémicelluloses avant la fabrication de la pâte pour la production de l'éthanol alors que la deuxième variante concerne l'intégration à la fois de la pré-extraction de l'hémicelluloses et de la cellulose pour la production d'éthanol.

Lors de l'évaluation de la soutenabilité de l'intégration des BRFI, dans le cadre de l'optimisation du réseau de création de valeur, l'accent est mis sur l'importance de l'approche analytique pour expliciter d'une façon plus approfondie l'interaction des différents aspects étudiés. Cette approche vise en outre la validité dans le temps des décisions stratégiques en fonction du contexte volatile de marché. La nécessité de cette approche analytique procure au système une certaine robustesse qui considère la volatilité de l'opérationnel dans la définition du stratégique. L'analyse par les scénarios est la méthodologie la plus adoptée pour traiter cette préoccupation. Mansoornejad et al. (2013) présentent une approche basée sur les scénarios pour la conception et l'analyse du réseau de création de valeur des BRFI en utilisant une méthodologie par étapes qui vise à réfléchir les aspects pratiques de la conception dans la prise de décision.

La méthodologie étape par étape utilise un modèle pour analyser l'impact des décisions de conception sur les activités au niveau opérationnel c.à.d. l'influence du stratégique sur l'opérationnel. Dans (Machani et al., 2015) un modèle mathématique a été développé pour évaluer la rentabilité d'un ensemble de stratégies de transformation, selon différents scénarios futurs axés sur les tendances, afin d'identifier les options stratégiques les plus robustes pour l'intégration des bioraffineries dans les compagnies de P&P.

Il faut signaler en outre, que la conception et le développement du réseau de création de valeur font partie des décisions stratégiques qui engagent l'entreprise à long terme (technologie, capacité de production, emplacement de l'installation etc.). Toutefois, les paramètres de l'environnement commercial peuvent changer et, par conséquent, affecter les performances du réseau de création de valeur. L'impact de l'incertitude du marché en amont et en aval constitue un autre motif pour analyser la robustesse du modèle notamment s'il s'agit d'un outil d'aide à la décision. Ainsi, pour concevoir un réseau évolutif et robuste de création de valeur, les changements importants dans l'environnement commercial doivent être pris en considération. Selon (Meepetchdee and Shah, 2007; Pishvae et al., 2011), les paramètres critiques tels que la demande des clients sont assez incertains. L'incertitude de l'approvisionnement en matières premières a été abordé dans (Quddus et al., 2017) à travers un modèle de programmation stochastique. Alex Marvin et al. (2012) utilisent un modèle entier mixte pour trouver les emplacements et les capacités optimales des BRFI en conjonction avec la récolte et la distribution de biomasses. Quddus et al. (2017) ont étudié l'impact de l'incertitude de l'offre de matières premières sur la conception et la gestion du réseau de création de valeur pour les dépôts polyvalents de traitement des pellets. Cardona-Valdés et al. (2011) ont développé un modèle d'optimisation stochastique qui tient compte de l'incertitude de la demande, où le risque inhérent est modélisé par scénarios. La principale contribution a été l'incorporation de l'incertitude de la demande des clients aux décisions sur la localisation des centres de distribution et l'allocation des modes de transport. Mansoornejad et al. (2013) proposent un modèle pour la conception optimale du réseau de chaîne logistique de biomasses sous incertitude. Une approche stochastique en deux étapes a été utilisée pour résoudre le modèle proposé dans le but d'étudier la robustesse des différents scénarios.

## **1.6. Contributions de la thèse**

Le besoin d'outils d'aide à la décision, pour évaluer la soutenabilité des BRFI intégrées aux P&P, est annoncé pour repenser le plan d'affaires selon les nouveaux paradigmes de soutenabilité. Dans ce contexte, des outils avancés d'aide à la décision sont nécessaires pour évaluer et optimiser la soutenabilité lors de la planification des investissements bioénergétiques tout en fournissant les éclaircissements nécessaires aux

preneurs de décision. Toutefois, l'examen de la revue de littérature afférente montre une insuffisance au niveau des travaux traitant l'évaluation de la soutenabilité des BRFI intégrées au P&P en considérant l'activité incubatrice comme partie intégrante de l'évaluation.

En réponse à ces besoins, nous proposons des outils d'aide à la décision centrés sur une méthode qui intègre l'évaluation de l'impact environnemental, selon l'approche cycle de vie, à l'optimisation du réseau de création de valeur pour parfaire un plan d'affaires soutenable au niveau stratégique et tactique. Ce couplage, géré par la modélisation des problèmes à objectifs multiples au niveau de l'évaluation des impacts, respecte les étapes formelles du cadre de la méthode LCSA proposé par l'école normative telle que présenté dans (Valdivia et al., 2013). Le cadre d'évaluation proposé, tire profit des avantages de l'optimisation du réseau de création de valeur au niveau de la gestion des différents flux, et intègre l'analyse du cycle de vie pour évaluer l'impact sur l'environnement. Ce contexte de modélisation, promouvant les cas d'application de la méthode LCSA, est renforcé par une approche analytique. Cette approche est appliquée au niveau de la phase d'interprétation des impacts afin d'analyser la robustesse du modèle et pour statuer sur le choix des modes de dépréciations favorables aux investissements bioénergétiques.

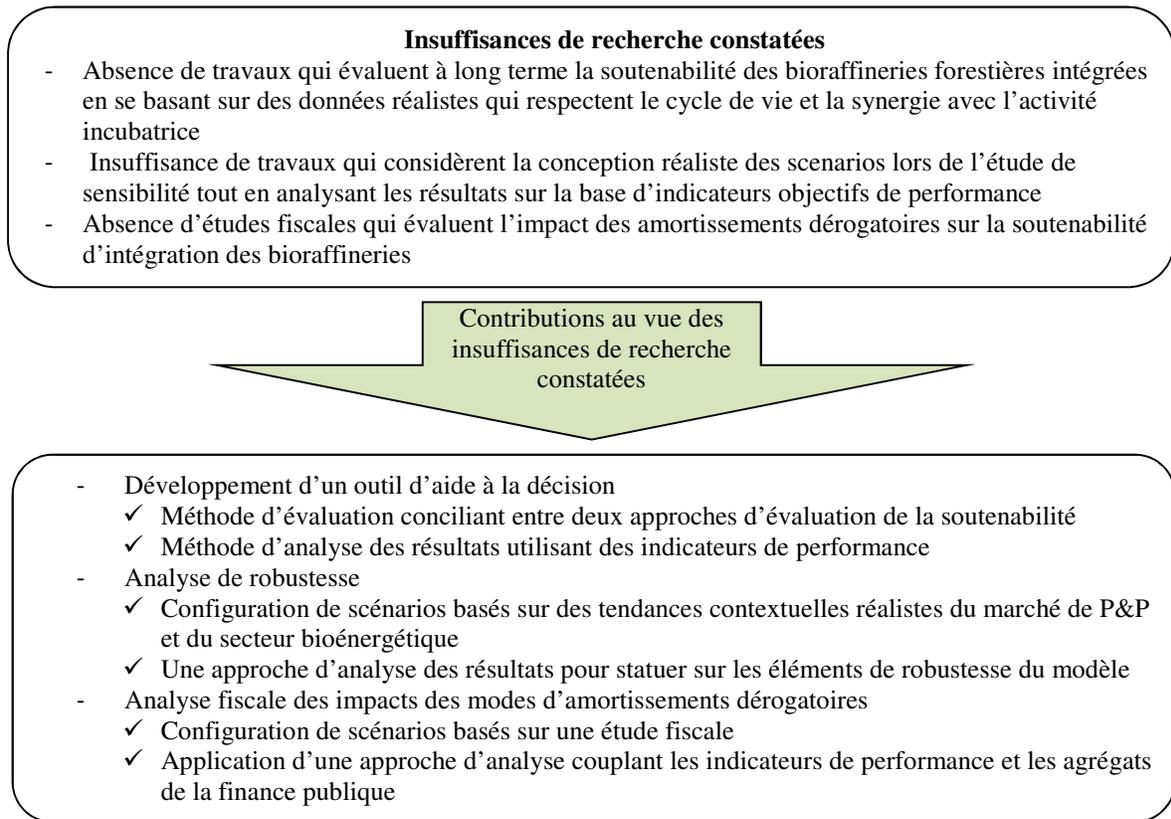
Dans notre étude de cas, le secteur des P&P diversifie son portefeuille de produits en convertissant, en produits bioénergétiques, les résidus de biomasse à faible coût générés par l'industrie elle-même en plus des résidus forestiers, industriels, agricoles et municipaux. Nous développons un modèle mathématique qui permet de définir une feuille de route pour la planification soutenable des investissements en bioénergie, en minimisant les émissions de GES et en maximisant la valeur financière de la BRFI sur un horizon de planification à long terme tout en assurant une gestion convenable de l'activité de P&P. Le modèle proposé s'intègre à la phase d'évaluation des impacts conformément à l'approche d'analyse du cycle de vie.

Le modèle proposé tient compte des tendances d'évolution de plusieurs paramètres, tels que la disponibilité des biomasses, la maturité des technologies et la demande en bioénergie. Il intègre, en outre, d'autres outils d'analyse financière tels que la dépréciation fiscale et comptable de la bioraffinerie estimée à la fin de l'horizon. Notre contribution présente une analyse de robustesse du modèle mathématique et élabore un canevas pour

communiquer le modèle aux preneurs de décision. En outre, une analyse fiscale approfondie des modes de dépréciations dérogatoires a été réalisée. Cette analyse traite l'impact des types d'amortissements dérogatoires sur le choix d'investissement bioénergétique et sur la soutenabilité. Notre objectif est de fournir aux preneurs de décision un ensemble d'outils d'aide à la décision tout en renforçant leur pouvoir de négocier une politique fiscale favorable à l'investissement bioénergétique, dans le cadre du partenariat publique-privé.

Le modèle proposé offre tous les détails sur l'émission par étape de la chaîne logistique, par voie de production et par unité des différents produits et permet une configuration optimale de la sécurité énergétique pour l'ensemble des activités.

Le modèle fournit, de ce fait, une structure informationnelle pour la mise en œuvre d'une comptabilité reliant les informations financières à celles environnementales et énergétiques pour mieux comprendre et analyser les interactions entre ces différents agrégats. Cela rend plus facile de remplir les obligations environnementales liées aux émissions générées par les installations industrielles et éventuellement la manipulation des allocations d'émission et des échanges de droits d'émission au marché tout en mesurant le progrès vers les objectifs de développement durable. La figure 1.4 illustre les principaux écarts scientifiques observés et les contributions proposées pour combler ces écarts. Le tableau 1.2 résume le contenu des chapitres deux à quatre, tout en synthétisant la façon d'aborder les questions de recherche couvertes par la présente thèse.



**Figure 1.4 :** Insuffisances constatées et contributions proposée

Le tableau 1.2 résume les objectifs, l'apport méthodologique et les cas d'application relatifs aux différentes contributions proposées sous formes de chapitres.

Notre première contribution (chapitre 2) propose la conception et l'application d'une méthode d'évaluation de la soutenabilité intégrant l'approche cycle de vie à l'optimisation du réseau de création de valeur dans le cadre d'un modèle mathématique multiobjectif. Ce dernier modèle fournira une feuille de route pour les investissements soutenables en bioénergie, minimisant les émissions de GES et maximisant la valeur financière de la bioraffinerie sur un horizon de planification à long terme tout en assurant une gestion optimale de l'activité incubatrice.

**Tableau 1.2 :** Consistance des contributions

Chapitres	Contributions		
	Objectifs	Méthodologie	Application
2	Évaluer la soutenabilité d'intégration des bioraffineries aux P&P pour la production bioénergétique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception d'une configuration initiale de bioraffinerie qui concilie la stratégie fédérale de développement durable avec les tendances de recherche sur le secteur des P&amp;P</li> <li>- Respect des différentes phases de la méthode LCSA</li> <li>- Modèle conceptuel d'évaluation de la soutenabilité intégrant l'approche cycle de vie (méthode LCA) dans la modélisation multiobjectif</li> <li>- Introduction d'un ratio mesurant la performance relative des investissements (performance économique et environnementale) pour enrichir l'analyse multicritère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude de cas</li> <li>- Analyse multicritère des résultats et recommandations pour le choix des solutions soutenables</li> <li>- Identification de la configuration de bioraffinerie soutenable</li> <li>- Détermination des émissions unitaires par produit et comparaison avec d'autres études</li> </ul>
3	Évaluer l'impact des incertitudes sur la soutenabilité de l'intégration des bioraffineries	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception des scénarios</li> <li>- Analyse multicritère intégrée (choix de la solution optimale pour chaque scénario et son analyse de sensibilité par rapport au scénario de référence)</li> <li>- Analyse de robustesse du modèle multiobjectif selon trois objectifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation des résultats de l'analyse de sensibilité pour chaque scénario et recommandations par objectif</li> </ul>
4	Évaluer l'impact des modes d'amortissements fiscaux dérogatoires sur la soutenabilité d'intégration des bioraffineries	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résolution du modèle multiobjectif en considérant les différents modes d'amortissements</li> <li>- Introduction de critères d'analyse mettant en exergue le partenariat public-privé (Gain d'impôt et impact sur le trésor public)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse des impacts selon plusieurs indicateurs</li> <li>- Interprétation des résultats et recommandations (partenariat public-privé)</li> <li>- Évaluation du mode d'amortissement fiscal en vigueur</li> </ul>

Dans notre deuxième contribution (chapitre 3) on présente une analyse de sensibilité du modèle mathématique proposé selon des scénarios plausibles avec l'élaboration d'un canevas pour bien communiquer le modèle aux preneurs de décision. L'objectif de cette contribution est d'évaluer la robustesse du modèle, de bien communiquer aux parties prenantes les implications des choix d'investissement dans la production de bioénergie dans

un environnement incertain et enfin d'identifier les perspectives pour améliorer l'efficacité du modèle proposé.

Notre troisième contribution (chapitre 4) propose une analyse fiscale des modes de dépréciations dérogatoires appliqués aux investissements en bioénergie. Cette analyse traite l'impact des types d'amortissements dérogatoires sur le choix d'investissement bioénergétique et sur la soutenabilité. Notre objectif était de fournir aux preneurs de décision un ensemble d'outils d'aide à la décision tout en renforçant leur pouvoir de négocier une politique fiscale favorable à l'investissement bioénergétique. En effet, le choix de l'investissement couplé avec le choix de sa façon de dépréciation offre à l'investisseur une visibilité plus complète sur les conséquences pratiques de l'investissement dans le domaine bioénergétique en connivence avec la législation fiscale en vigueur. Ce qui conforte le partenariat public-privé et détermine le niveau d'interventionnisme public dans la réussite des transformations escomptées du secteur de P&P.

## **1.7. Conclusion**

Dans cette introduction générale, nous avons présenté un portrait qui touche aux différents contextes ayant trait à l'environnement de recherche sur le sujet proposé. Le contexte de crise de soutenabilité du secteur de P&P et les opportunités d'investir dans la production bioénergétique ont été relatés. En outre, l'émergence du modèle soutenable baptisé BRFI et les difficultés de son implémentation en pratique ont été expliquées. Enfin, l'évolution de la notion de la soutenabilité et son évaluation ont fait l'objet d'une revue détaillée ou on a présenté les dernières contributions destinées à améliorer l'applicabilité de la méthode LCSA. Notre contribution consiste en une esquisse de méthode LCSA appliquée sur un cas d'étude pour évaluer la soutenabilité d'un incubateur, au départ non soutenable, lors de l'incubation d'un modèle soutenable de fait.

# **Chapitre 2 : Évaluation de la soutenabilité des bioraffineries de deuxième génération implémentées dans le secteur canadien des P&P**

## **2.1. Introduction**

La BRFI est un modèle industriel soutenable qui permet la valorisation de la biomasse et des déchets en un spectre de produits, tout en améliorant l'indépendance énergétique. Toutefois, l'implémentation de ces entités, coûteuses et techniquement compliquées, demeure hors de portée des investisseurs. La validation de l'hypothèse de soutenabilité de ces entités demeure une question à démontrer dans le cas de leur implémentation en rétro-installation dans le secteur des P&P.

L'industrie des P&P souffre d'une crise de soutenabilité, comme il a été souligné au premier chapitre, et doit édifier de nouvelles stratégies se basant sur des plans d'affaires mieux adaptés au contexte de marché. Tout en préservant l'activité principale, ces compagnies doivent identifier de nouvelles opportunités d'investissement qui cadrent avec le rôle dévolu au secteur dans la stratégie de développement durable. Ces entités, avec une longue histoire d'utilisation durable de la matière ligneuse, offrent une plate-forme appropriée pour être élargie aux futures BRFI, afin d'utiliser plus efficacement de la biomasse abondante et renouvelable.

La transformation des usines de P&P en bioraffineries de deuxième génération, présente une excellente occasion pour produire, en plus de la fibre de cellulose précieuse, des coproduits, y compris l'éthanol et de l'énergie supplémentaire. Ce contexte de mutation entraînera des flux de revenus additionnels avec une rentabilité accrue et réduira potentiellement les émissions de GES.

Dans notre étude de cas, le secteur des P&P diversifie son portefeuille de produits en convertissant les résidus de biomasses, à faible coût, générés par l'industrie elle-même

comme la liqueur noire et les boues papetières à côté des résidus forestiers, agricoles, industriels, et municipaux en produits bioénergétiques. A cet effet, il est judicieux de développer des outils d'aide à la décision pour déterminer la configuration soutenable d'investissement qui considère le facteur environnemental sans compromettre le facteur économique.

Notre objectif ainsi est d'évaluer la soutenabilité d'intégration des bioraffineries aux P&P pour la production bioénergétique. Toutefois, l'absence d'une méthode dédiée à l'évaluation de la soutenabilité est un dilemme qui pose assez de défis. Peu de tentatives qui ont appliqué des esquisses de la méthode d'analyse de la soutenabilité selon le cycle de vie LCSA en se basant sur les tendances actuelles de l'approche d'évaluation normative<sup>2</sup> de la soutenabilité. L'évaluation de la soutenabilité du réseau de création de valeur pose des contraintes énormes si on utilise la méthode LCSA. En effet, le cadre d'évaluation de la soutenabilité selon l'approche du cycle de vie est encore en cours de développement et son application est encore limitée (Neugebauer et al., 2015).

Devant ce dilemme, notre outil d'évaluation de la soutenabilité couplera l'optimisation du réseau de création de valeur avec la méthode d'analyse du cycle de vie. Ainsi, l'empreinte environnementale est calculée en respectant l'approche cycle de vie au niveau de chaque phase de la chaîne et pour chaque produit. Ce calcul considère les effets de l'intégration verticale sur les entrées des différents processus manufacturiers et l'effet des allocations entre produits et coproduits.

Notre modèle tient compte de l'évolution de la tendance de plusieurs paramètres, tels que la disponibilité de la biomasse, la maturité des technologies et la demande en bioénergie, tout en intégrant d'autres outils d'analyse financière tels que la dépréciation fiscale et comptable et la valeur résiduelle estimée à la fin de l'horizon de planification.

Le modèle proposé offre tous les détails sur l'émission, selon les stades du réseau de création de valeur, par voie de production et par unité des différents produits tout en assurant

---

<sup>2</sup> L'école normative réfère ici à ceux qui optent et œuvre pour la standardisation de la méthode LCSA et la considèrent comme extension et mutation de la méthode LCA.

la sécurité énergétique pour l'ensemble des activités. Le modèle permet, en outre, la mise en œuvre d'une comptabilité reliant les informations financières, environnementales et énergétiques pour mieux comprendre et analyser les interactions entre ces différents agrégats. Cela facilite la satisfaction aux obligations déclaratives liées à l'émission des installations industrielles et éventuellement la manipulation des échanges des droits d'émission au marché tout en mesurant le progrès vers les objectifs du développement durable.

Ce premier chapitre est articulé autour de trois sections. La première section présente, en guise de méthodologie, le modèle conceptuel pour l'évaluation de la soutenabilité. La deuxième et la troisième section présentent respectivement une étude de cas d'évaluation de la soutenabilité et une conclusion.

## **2.2. Modèle conceptuel pour l'évaluation de la soutenabilité**

Au niveau de la sous-section 1.2.4 du premier chapitre nous avons défini la stratégie régionale du développement durable et les objectifs escomptés y afférents. La biomasse et les déchets du bois sont considérés au sommet de la liste des carburants renouvelables pour le secteur des industries forestières. Il en découle qu'à l'échelle macroéconomique le secteur des P&P est considéré comme un pôle industriel appelé à promouvoir la production et la consommation des énergies propres, réduire l'empreinte environnementale et relever les défis des changements climatiques, de la qualité de l'air et de la qualité et la disponibilité de l'eau.

En outre, et comme expliqué au niveau de la sous-section 1.3 du premier chapitre, le secteur des P&P souffre d'une crise de soutenabilité et doit subir une mutation profonde pour maintenir sa pérennité sachant que les décideurs de la politique économique canadienne considèrent, en premier lieu, l'importance de l'impact socioéconomique du secteur.

Les tendances de recherche sur le secteur, pendant la dernière décennie, convergent vers l'intégration de la production bioénergétique afin de réaliser l'autosuffisance énergétique interne, diversifier la production et recycler les effluents et déchets. Toutefois, l'intégration de la production bioénergétique est coûteuse, techniquement compliquée et nécessite des outils d'aide à la décision pour planifier l'investissement à long terme.

Cette étude considère le croisement d'intérêts du secteur avec la stratégie de transition énergétique et propose l'évaluation de la soutenabilité des bioraffineries implémentées dans l'industrie des P&P pour la production bioénergétique. Notre méthodologie se base sur la proposition d'une configuration initiale qui concilie les résultats de recherche sur le secteur des P&P avec la stratégie énergétique canadienne annoncée au niveau de la *stratégie fédérale de développement durable* dont notamment :

- La tendance d'intégrer de nouveaux projets de bioraffinage pour une valorisation lignocellulosique selon de nouvelles voies de produits et de marché ;
- L'optimisation de l'utilisation des ressources, la valorisation des ressources résiduelles et la contribution à l'éco-efficacité ;
- L'évaluation du rendement environnemental des technologies nouvelles et émergentes et le développement favorisant la création de nouvelles technologies pouvant réduire les émissions des GES et réalisant l'efficacité énergétique.

La stratégie œuvre explicitement à fonder un nouveau modèle d'affaires qui renforce la diversification des produits à haute valeur ajoutée avec un management du réseau de création de valeur au niveau de la distribution et de l'exploration des marchés. La sélection d'une configuration initiale de bioraffinerie qui cadre avec la stratégie du développement durable en matière énergétique, tout en conciliant avec les résultats de recherche à propos de l'intégration des bioraffineries de deuxième génération, nécessite la considération des voies suivantes :

- La production de biofuel pour le transport ;
- L'autosuffisance énergétique ;
- Solutionner les rejets d'effluents liquides ;
- Assurer une intégration verticale qui maximise la sécurité énergétique tout en préservant la synergie avec l'activité incubatrice.

Après avoir proposé une configuration initiale à évaluer, nous proposons la méthode d'évaluation qui répond à l'objectif de l'étude proposée. Notre méthode d'évaluation se base sur le couplage du modèle d'optimisation du réseau de création de valeur avec la méthode LCA, ce qui permet la cohabitation de deux approches d'évaluation différentes : l'évaluation de l'empreinte environnementale se basant sur l'approche cycle de vie et l'approche

d'optimisation du réseau de création de valeur qui maximise le profit en fonction du choix d'un plan d'investissement. Les deux approches d'évaluation divergent aussi au niveau de la portée de l'analyse puisque l'approche cycle de vie remonte jusqu'à l'extraction des matières premières nécessaires pour la phase d'approvisionnement. L'optimisation des objectifs liés aux deux aspects (économique et environnemental) sera étudiée dans le cadre d'une modélisation multiobjectif qui permet une synergie et un compromis potentiel entre les deux aspects. En effet, pour l'évaluation de l'empreinte environnementale, l'inventaire des différentes entrées-sorties au niveau des processus sont considérés en tenant compte de l'application des méthodes d'allocation pour distinguer la charge environnementale revenant à chaque produit et coproduit. Le calcul de l'impact sur l'environnement est greffé aux flux physiques tout au long du réseau de création de valeur.

Tel que recommandée par l'école normative, qui œuvre à se faire passer la méthode LCA pour LCSA, la méthodologie proposée respecte formellement les quatre phases de la méthode LCSA comme illustré par la Figure 2.1.

<b>Définir l'objectif et la portée de l'étude</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Objectif</b></li> <li>• <b>Frontière du système étudié</b></li> <li>• <b>Unité fonctionnelle ; Catégories d'impacts et méthodes d'allocation</b></li> </ul>
<b>Analyse de l'inventaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Inventaire économique</b></li> <li>• <b>Inventaire environnemental</b></li> <li>• <b>Inventaire lié au volet technologique</b></li> </ul>
<b>Évaluation des impacts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Méthode (modèle multiobjectif + ACV)</b></li> <li>• <b>Frontière de Pareto</b></li> <li>• <b>Analyse des résultats et choix de la solution</b></li> </ul>
<b>Interprétation des impacts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Rapprochement Objectifs-Résultats</b></li> <li>• <b>Autres études et comparaison</b></li> <li>• <b>Recommandations</b></li> </ul>

**Figure 2.1** : Méthodologie d'évaluation de la soutenabilité

## **2.2.1. Exposé du problème et définition de l'objectif et de la portée de l'étude**

### **2.2.1.1. Exposé du problème**

Le problème consiste à évaluer la soutenabilité d'intégration de la production bioénergétique par l'implémentation des bioraffineries de deuxième génération dans les usines de P&P. Les voies à intégrer concernent la production du bioéthanol et la conversion des déchets en énergies et en biofuels destinés à l'approvisionnement de la cogénération et pour la vente.

- Voie bioéthanol : Consiste à produire du bioéthanol à partir d'une variété de biomasse lignocellulosique en utilisant la technologie de saccharification<sup>3</sup> et de fermentation simultanée (SSF).
- Voie de conversion de déchets en biofuels : Permet de produire du biogaz à partir des boues papetières et des déchets solides municipaux usant de la technologie de digestion anaérobie (DA).
- Voie de cogénération : Consiste à produire de l'électricité et de la chaleur (vapeur) à partir de la liqueur noire et du biogaz en utilisant la technologie de cogénération '*Cogeneration Heat and Power*' (CHP).

Les principales phases du réseau de création de valeur de la bioraffinerie sont :

- L'approvisionnement qui concerne la fourniture et le transport à l'usine des résidus forestiers, agricoles, industriels et municipaux ;
- La fabrication qui englobe la conversion de diverses biomasses à l'aide des technologies appropriées ; et
- La distribution vers les différents marchés des produits et coproduits.

L'évaluation est proposée sur un horizon de vingt (20) ans également divisés en quatre (4) cycles d'investissement de cinq (5) ans chacun. Deux aspects de la soutenabilité sont pris

---

<sup>3</sup> Selon Wikipédia, la saccharification est un processus biochimique qui consiste à transformer les sucres complexes, comme la cellulose ou l'amidon, en sucres plus simples, tels le fructose et le glucose. Il s'agit généralement d'un processus enzymatique.

en compte dans cette évaluation : l'aspect économique évalué à l'aide de l'indicateur Cash-Flow Net Actualisé (CFNA) tout en tenant compte de la valeur de récupération ou valeur résiduelle à la fin de la période de l'horizon de planification, et l'aspect environnemental lié à l'impact sur les changements climatiques évalué à l'aide de l'indicateur GHG (en anglais 'GreenHouse Gas') comptabilisant les émissions des GES en CO<sub>2</sub> équivalent.

Notre étude vise à répondre aux questions suivantes :

- Quel plan d'investissement pouvant assurer l'optimisation des dimensions économiques et environnementales considérées ? Plus spécifiquement, quelles sont les voies à retenir pour chaque cycle d'investissement, selon la technologie et la capacité de production appropriées ?
- Quel est l'impact du choix d'investissement sur le plan d'affaires en termes de planification de la production et des émissions ?
- Comment gérer l'activité incubatrice de P&P pour assurer une synergie convenable avec la BRFI implémentée ?

Un ensemble de variables de décision et de données d'entrée pertinentes sont nécessaires pour la formulation mathématique du problème (modélisation).

- **Variables de décision**

▪ *Variables binaires*

- Pour la BRFI : Ces variables indiquent si la sélection d'une option de capacité pour une technologie particulière est choisie ou non au titre d'un cycle d'investissement ;
- Pour l'activité de P&P : Ces variables indiquent si l'activité incubatrice (P&P) est opérationnelle ou non au cours des périodes de l'horizon de planification.

▪ *Variables continues*

Ces variables concernent :

- Les flux de biomasses et d'autres intrants consommés par les différentes voies de conversion ;
- Les flux des produits et coproduits réalisés ;

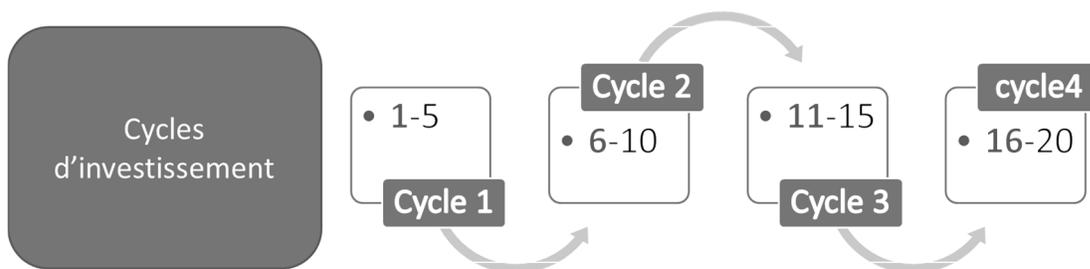
- Les flux de produits et de coproduits consommés entre les voies de conversion intégrées ; et
  - Les flux de produits et de coproduits expédiés vers les différents marchés ;
- **Les données d'entrée**
- *Dans la phase d'approvisionnement*
    - Un ensemble de biomasses lignocellulosiques composées de résidus forestiers (résidus de récolte), de résidus agricoles (paille de maïs et paille de blé), de résidus industriels (sciure, copeaux et écorces) et de résidus municipaux (déchets urbains solides composés de résidus organiques);
    - Au niveau de l'approvisionnement, le coût de chaque type de biomasse et sa quantité sont connus ainsi que la tendance de l'offre de biomasse ;
    - Les émissions par tonne, pour les résidus forestiers et les résidus agricoles, au stade de la collecte sur les lieux et au stade du transport, seront calculées à l'aide d'un modèle d'évaluation du cycle de vie ;
    - Pour les résidus industriels, l'émission est évaluée dans le contexte canadien en suivant (McKechnie et al., 2014);
    - Pour les résidus municipaux, les émissions sont égales à celles générées par la collecte et le transport vers l'usine, comme indiqué dans (Friedrich and Trois, 2016).
  - *Dans la phase de fabrication*
    - Les taux de conversion de différentes biomasses et intrants sont connus pour chaque technologie utilisée dans diverses voies. De plus, ces taux de conversion changent avec l'amélioration de l'efficacité technologique ;
    - Le coût de production de chaque unité de produit est connu ainsi que le coût opérationnel de l'activité de P&P ;
    - Toute interruption de l'activité de P&P au titre d'une période donnée a un coût de fermeture connu.

▪ *Dans la phase de distribution*

Les conditions de marché de la bioénergie et la disponibilité de la demande sont considérées comme connues ainsi que la tendance future de la demande.

▪ *Concernant l'investissement*

Comme indiqué précédemment, l'évaluation couvre un horizon de planification divisé en 4 cycles de 5 ans chacun. Pour chaque technologie, l'investissement est possible au début de chaque cycle selon les options de capacité disponibles (voir Figure 2.2). Trois options sont disponibles pour chaque technologie proposée au titre des différentes voies de conversion. La consommation en énergie (électricité et chaleur) est connue par unité de capacité de production installée pour les différentes voies de conversion et aussi pour l'activité incubatrice. Enfin, un budget connu est alloué à l'investissement sur l'ensemble de l'horizon de planification et le coût par unité de capacité de la technologie implémentée est connu.



**Figure 2.2 :** Cycles d'investissement

### **2.2.1.2. Objectif de l'étude**

L'objectif de notre étude est d'évaluer à long terme la soutenabilité d'intégration des bioraffineries de deuxième génération aux P&P pour la production bioénergétique. Une planification soutenable des investissements bioénergétiques considère un compromis entre la minimisation des émissions globales et la maximisation du profit dégagé par l'exploitation des mêmes investissements à long terme.

### **2.2.1.3. Portée de l'étude**

Conformément à la méthode LCA, la portée de l'étude concerne l'unité fonctionnelle, la délimitation du système, les catégories d'impacts et les méthodes d'allocation.

#### **- Unité fonctionnelle**

Deux unités fonctionnelles ont été retenues pour les besoins d'analyse et de comparaison avec d'autres travaux d'évaluation. La première est l'unité physique intrinsèque à chaque produit conformément à la gestion des flux physiques de la chaîne logistique (tonne, pour la pâte de papier ; m<sup>3</sup>, pour le biogaz ; litre, pour l'éthanol et KWh, pour l'électricité et la chaleur). Cependant, la deuxième est liée au cash-flow (CF) réalisé par la bioraffinerie, soit un CF de 1000\$. L'objectif du choix de deux unités fonctionnelles est de permettre la comparaison en se référant à chaque produit réalisé et aussi à l'activité totale de la BRFI.

#### **- Délimitation du système**

La délimitation du système à étudier dépend de l'aspect considéré au niveau de la soutenabilité. La délimitation adoptée pour l'aspect environnemental s'étend de l'extraction des matières premières jusqu'à la porte de l'usine pour l'approvisionnement en biomasse en tenant compte du transport. Pour la phase manufacturière, la délimitation couvre tous les processus manufacturiers jusqu'à la porte de l'usine après la conversion de la biomasse. En ce qui concerne l'aspect économique, la délimitation du système étudié est liée au réseau de création de valeur reliant les phases d'approvisionnement, de fabrication et de distribution qui s'étend jusqu'au marché des produits finis.

Pour plus de détails sur la délimitation du système, les voies intégrées dans la BRFI, implémenté en rétro-installation dans les usines de pâtes et papiers, sont décrites comme suit :

- *Voie de l'éthanol lignocellulosique*

La production de l'éthanol est la voie principale proposée lors de l'intégration de la bioraffinerie. Cette voie s'approvisionne d'une variété de biomasses composée de résidus forestiers, agricoles et industriels. La biomasse est soumise à un ensemble de processus de conversion (prétraitement, hydrolyse enzymatique, fermentation et distillation) en utilisant

la technologie de saccharification et fermentation simultanée (SSF) pour produire de l'éthanol et de la lignine comme coproduit. En plus de la biomasse, les intrants de cette voie sont composés des produits chimiques, d'enzyme (cellulase), de la levure pour la fermentation, de l'eau et de l'énergie (chaleur et électricité). La production de l'éthanol génère des rejets et des émissions de GES.

- *Voies, déchets pour la production d'énergie et de biofuels*

Priadi et al. (2014) considèrent que l'industrie de P&P génère de grandes quantités de boues papetières et suggère la **Digestion Anaérobie** (DA) pour le traitement potentiel afin de stabiliser ces effluents. Cette voie traite, en plus des boues papetières, les déchets solides municipaux, fournis à un prix subventionné, pour produire du biogaz destiné à l'approvisionnement de la cogénération ou à la vente. La **cogénération** utilise, en plus du biogaz, la liqueur noire comme matière première basique.

- *Activité de P&P*

L'activité de P&P, utilisant la technologie des procédés Kraft, est l'activité d'incubation produisant de la pâte commerciale à partir des résidus industriels de sciage. L'activité de P&P génère, en plus de la liqueur noire recyclé dans l'unité de cogénération, des effluents recyclés par l'unité de DA. L'ensemble du système de BRFI intégré dans le P&P est présenté par la figure 2.3.

## - **Les catégories d'impacts**

L'impact intermédiaire sur le changement climatique, évalué par l'indicateur GHG, est la catégorie d'impact relatif à l'aspect environnemental. Toutefois, les flux nets de trésoreries actualisés évalués par le Cash-flow Net Actualisé (CFNA), est la catégorie d'impact pour l'aspect économique.

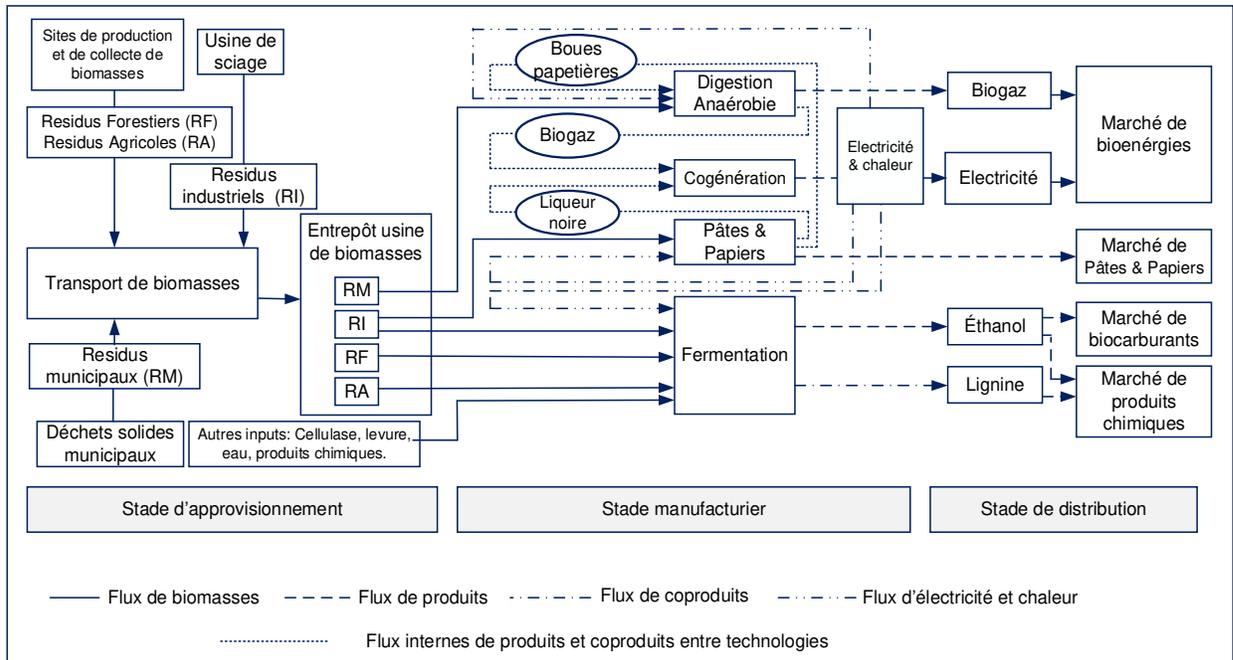


Figure 2.3 : BRFI intégrée au P&P

## - Les méthodes d'allocation

L'utilisation des proportions physiques est suggérée comme méthode d'allocation, car c'est une pratique acceptée lors de la mise en œuvre des différents techniques d'évaluation prises séparément selon (Valdivia et al., 2013). Dans notre cas, les critères énergétiques et économiques sont utilisés pour l'aspect environnemental. La méthode d'allocation selon le critère énergie est utilisée pour allouer l'impact environnemental entre l'éthanol et la lignine et entre l'électricité et la chaleur selon le pouvoir calorifique minimale des produits et coproduits concernés. Cependant, la méthode mixte d'allocation économie-énergie est appliquée pour le cas de l'allocation de l'impact environnemental entre le produit de la pâte à papier et les coproduits et déchets connexes à savoir la liqueur noire et les boues papetières. L'aspect économique adopte, pour l'allocation, le critère physique qui est implicitement intégré comme paramètre pour l'équilibre de masse au niveau des différents nœuds de la phase manufacturière.

Par ailleurs, les charges environnementales de l'électricité et de la chaleur ont été déterminées en tenant compte des flux internes des intrants *optimisés selon l'objectif économique*. Une telle approximation permet de garder le modèle multi-objectif linéaire.

## **2.2.2. Analyse de l'inventaire**

Nous distinguons entre l'analyse de l'inventaire relative à l'évaluation environnementale de celle relative à l'évaluation économique.

### **2.2.2.1. Inventaire relatif à l'aspect environnemental**

Cet inventaire est effectué en deux étapes. Dans la première étape, une méthode LCA attributionnelle est appliquée, en utilisant le modèle GREET (*Green house ganses, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*). Pour calculer les émissions de GES liées à l'approvisionnement et au transport des résidus forestiers et agricoles. Dans la deuxième étape, les émissions de GES sont déterminées à partir de différentes études existantes dans la littérature concernant la phase manufacturière et l'approvisionnement en résidus municipaux et industriels.

#### **- Émissions relatives à l'approvisionnement en résidus forestiers et agricoles**

L'inventaire environnemental fournit l'ensemble des paramètres nécessaires pour intégrer le concept d'évaluation selon l'approche cycle de vie (LCA) dans le modèle de l'optimisation du réseau de création de valeur. Cette évaluation est effectuée conformément à la méthode standard LCA décrite par les normes internationales des séries ISO 14040 et ISO 14044 (2006). La méthode LCA est utile pour analyser les implications environnementales d'un produit, processus ou service pendant toutes les phases de son cycle de vie, grâce à l'évaluation de l'utilisation des ressources et la comptabilisation des émissions dans l'environnement associé au système évalué. Selon les normes ISO susmentionnées, une LCA comprend quatre phases : la définition de l'objectif et de la portée de l'étude, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation des impacts et l'interprétation des impacts.

### ▪ **Définition de l'objectif et de la portée de l'analyse**

L'impact sur l'environnement est évalué par l'indicateur GHG faisant l'agrégation d'un ensemble d'émissions provenant des GES (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> et les CFs) pondérées selon la méthode de pondération recommandée par le Panel Intergouvernemental chargé du Changement Climatique (IPCC). L'objectif de cette évaluation est de fournir les paramètres environnementaux nécessaires au modèle d'optimisation multiobjectif pour l'évaluation de la composante environnementale. La portée de l'analyse s'étend de l'extraction d'une tonne de biomasse et de l'énergie nécessaires pour sa production et son transport à la porte de l'usine. La délimitation du système comprend la production, la récolte et la collecte des résidus en biomasse, puis le stockage et le transfert aux centres de collecte en plus du transport à partir du terrain ou des centres de collecte jusqu'à la bioraffinerie en tenant compte de la logistique de transport utilisée. Le type de carburant consommé et le cycle de vie de ces carburants, de l'extraction du pétrole brut à son utilisation par le mode de transport concerné, sont considérés.

### ▪ **Analyse d'inventaire et évaluation d'impact**

Pour évaluer l'émission liée au stade de l'approvisionnement et du transport des résidus forestiers et des résidus agricoles, nous avons utilisé le modèle GREET. En général, le modèle GREET est structuré pour examiner systématiquement la consommation d'énergie, selon le cycle de vie et les émissions associées, à une large gamme de technologies de véhicules et sources de matières premières pour la production de carburants de remplacement (Wang et al., 2012). Dans notre contexte, pour évaluer les émissions causées par l'approvisionnement et le transport des résidus forestiers et agricoles, le modèle GREET utilise l'inventaire rapporté dans (Han et al., 2011), qui présente des résidus forestiers et agricoles et leur mise en œuvre pour produire des biocarburants pour transport.

### - **Émissions relatives à l'approvisionnement en résidus municipaux et industriels et à la phase manufacturière**

Les émissions liées à l'étape d'approvisionnement et de transport des résidus industriels sont celles suggérées par l'Institut Ontarien de recherche forestière (McKechnie

et al., 2014). Cependant, les émissions liées aux résidus municipaux sont celles générées par leur collecte comme suggéré dans (Friedrich and Trois, 2016). Les émissions liées aux entrées de différentes voies de conversion dans la phase manufacturière sont déterminées à partir de différentes études existant dans la littérature. Dans cette étape, nous avons tenu compte de l'évolution du taux de conversion de la biomasse estimé à 0,75% chaque année (Hacatoglu et al., 2010).

Le tableau 2.1 spécifie l'inventaire des émissions de GES calculé pour l'approvisionnement et le transport de la biomasse (résidus agricoles, forestier, industriels et municipaux) effectué dans les deux étapes précédentes ainsi que l'inventaire des émissions liées à chaque voie de conversion et à l'activité incubatrice de P&P. Il résume les références de l'inventaire relatif à l'équilibre de masse et des émissions pour chaque entrée des différents processus. Notez que ces valeurs sont très importantes car elles seront utilisées dans le modèle d'optimisation multiobjectif pour tenir compte de l'impact environnemental de l'approvisionnement en biomasse et du transport.

**Tableau 2.1 : Inventaire environnemental**

Processus	Intrants	Désignation	Inventaire des émissions	Inventaire pour l'équilibre de masse
Plantation de biomasses, récolte et collecte	Énergie, eau et engrais	Résidus Agricoles (RA)	88 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (Modèle GREET)	Dans (Machani et al., 2014)
		Résidus Forestiers (RF)	18 kg CO <sub>2</sub> - eq/ton (Modèle GREET)	
Transport du champ à L'BRFI	Énergie et transport	Transport de (RA)	22 kg CO <sub>2</sub> - eq/ton (Modèle GREET)	Dans (Machani et al., 2014)
		Transport de (RF)	47 kg CO <sub>2</sub> - eq/ton (Modèle GREET)	
Fermentation (Voie éthanol)	Biomasses	Résidus Agricoles	110 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (Modèle GREET)	3.70 kg/L d'éthanol (Machani et al., 2014)
		Résidus Forestiers	65 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (Modèle GREET)	3.45 kg/L d'éthanol (Machani et al., 2014)
		Résidus Industriels	105 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (McKechnie et al., 2014)	2.94 kg/L d'éthanol (Machani et al., 2014)
	Énergie	Électricité	Variable de décision	220 kwh/ton biom. (L-Jorgensen and Haglind, 2015)
		Chaleur	Variable de décision	3.8 GJ/ton biom. (L-Jorgensen and Haglind, 2015)
	Cellulase et levure	Cellulase et levure	Cellulase	10.3 kg CO <sub>2</sub> -eq/kg (Karlsson, 2014)
levure			3.2 kg CO <sub>2</sub> -eq/kg (Soam et al., 2016)	1.3 g/MJ d'éthanol (Soam et al., 2016)
Cogénération (Voie de cogénération électricité-chaleur)	Liquueur noire	Liquueur Noire (LN)	79 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (Allocation économique)	0.83 kg/KWh d'électricité (Machani et al., 2014)
		LN à cogénération	0.0078 kg CO <sub>2</sub> -eq/KWh (NCASI, 2005)	
	Biogaz	Biogaz	Variable de décision	0.5 m <sup>3</sup> /KWh d'électricité (Machani et al., 2014)
Biogaz to Cogénération		0 kg CO <sub>2</sub> -eq/KWh (Hahn et al., 2015)		
Digestion Anaérobie (Voie de conversion de déchet en biofuel)	Résidus Municipaux	Résidus Municipaux (RM)	11.3 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (Friedrich & Trois, 2016)	10 kg /m <sup>3</sup> de biogaz (Machani et al., 2014)
		RM à Digestion Anaérobie	0 kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup> (NCASI, 2005)	
	Boues Papetières	Boues Papetières (BP)	30 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (Allocation économique)	5 kg/m <sup>3</sup> de biogaz (Machani et al., 2014)
		BP à Digestion Anaérobie	0 kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup> (NCASI, 2005)	
	Énergie	Électricité	Variable de décision	75 kwh/ton de biomasses (Stephen, G., Peter, 2012)
Chaleur		Variable de décision	32 kwh/ton de biomasses (Stephen, G., Peter, 2012)	
Pâtes et Papiers	Biomasse	Résidus Industriel	105 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (McKechnie et al., 2014)	2 ton/ ton de pâtes (Machani et al., 2014a)
		Énergie	Électricité	Variable de décision
	Chaleur	Variable de décision	22.7 GJ/ ton de pâtes (NCASI, 2011)	
	Produits chimiques ajoutés	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	415 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (NCASI, 2005)	10 kg/ton de pâtes (NCASI, 2005)
		CaCO <sub>3</sub>	440 kg CO <sub>2</sub> -eq/ton (NCASI, 2005)	10 kg/ton de pâtes (NCASI, 2005)

### **2.2.2.2. Inventaire relatif à l'aspect économique**

Toutes les données relatives à l'inventaire économique se trouvent dans (Machani et al., 2013). Ces données ont été également utilisées dans (Machani et al., 2014) pour évaluer le potentiel économique de l'intégration des BRFI dans les usines canadiennes de P&P.

### **2.2.3. Évaluation de l'impact**

Cette phase représente le couplage entre la méthode LCA et l'optimisation du réseau de création de valeur dans le cadre d'une modélisation multiobjectif. L'application du modèle au système objet de l'étude, tel que décrit plus haut, débouche vers une frontière de solutions non dominées dite frontière de Pareto. Une analyse multicritère est entreprise à ce niveau pour discuter du choix des solutions les plus avantageuses.

#### **2.2.3.1. Modélisation multi-objectif**

Cette étape intègre l'aspect environnemental à l'optimisation du réseau de création de valeur qui se base sur la dimension économique. Pour réaliser cette intégration, les émissions ont été comptabilisées en tenant compte des phases concernées :

##### **- Phase d'approvisionnement**

L'émission pour chaque type de biomasse est déterminée en multipliant la valeur du flux d'approvisionnement de ce type de biomasse par la charge environnementale relative à une unité de biomasse consommée. L'émission relative à la phase de transport est égale à la quantité transportée (correspond à la quantité consommée) multipliée par l'émission relative au transport de chaque unité de biomasse concernée.

##### **- Phase de conversion**

Les émissions relatives à cette phase sont obtenues en utilisant l'inventaire fourni selon le contexte de la deuxième étape de la méthode LCA. L'impact environnemental de chaque produit et coproduit est déterminé en fonction des intrants et extrants relatifs à chaque processus concerné pour les différentes voies de conversion, et ce conformément à la portée de l'étude et le contexte de l'intégration verticale.

L'intégration de la méthode LCA au modèle d'optimisation du réseau de création de valeur est réalisée grâce à la gestion des flux physiques, aux méthodes d'allocation et à la gestion des flux liés à la production et à la livraison à soi-même de l'énergie. En outre, les contraintes d'équilibre de masse, au niveau des processus de conversion, ont permis de greffer l'impact environnemental aux différents flux gérés par le modèle d'optimisation du réseau de création de valeur.

### **2.2.3.2. Formulation du modèle mathématique**

L'objectif du modèle mathématique est d'optimiser le réseau de création de valeur de la bioraffinerie intégrée au P&P en tenant compte des aspects économiques et environnementaux. Pour développer ce modèle, les hypothèses suivantes sont considérées :

- Les matières premières sont complètement consommées à la fin de chaque période de planification ;
- La production de chaleur est suffisante pour toutes les activités considérées ;
- Les coproduits et déchets de P&P, non intégrés dans d'autres processus de conversion, seront pris en compte dans la comptabilisation de l'émission globale ;
- Au stade de la digestion anaérobie, l'émission est déterminée en tenant compte du caractère biogénique du dioxyde de carbone, de la récupération totale du méthane (CH<sub>4</sub>) et de l'émission considérée non significative de l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) ;
- Tout investissement prévu dans un cycle particulier est définitif et irréversible. Une fois implémentée, une technologie ne peut pas être retirée durant l'horizon de planification.

#### **- Notations**

L'annexe 2.A englobe les notations liées à la formulation du modèle mathématique. En utilisant ces notations, les fonctions de l'objectif relatives aux aspects étudiés ainsi que les contraintes sont présentées et expliquées ci-dessous :

## - Fonction de l'objectif de l'aspect environnemental

La fonction de l'objectif de l'aspect environnemental minimise l'impact intermédiaire sur le changement climatique de l'activité de P&P et de la BRFI intégrée sur l'horizon de planification  $T$ . L'émission de GHG est l'indicateur permettant de mesurer cet impact. Les émissions totales du système évalué comprennent l'émission provenant de la voie éthanol,  $GHGP_1$ , l'émission générée par l'activité incubatrice P&P,  $GHGP_4$ , l'émission générée par la production du biogaz vendu sur le marché,  $GHG2M$ , l'émission générée par la production de l'électricité vendu sur le marché,  $GHG3M$ , et l'émission des coproduits et déchets de P&P (liqueur noire et boues papetières) non recyclés ainsi que l'émission générée par la production de la lignine vendue sur le marché. Chaque terme impliqué dans le calcul des émissions totales est expliqué ci-dessous.

- *Émissions totales de la voie éthanol ( $GHGP_1$ ):* Cette émission est générée par la voie éthanol aux stades de l'approvisionnement et de la conversion durant l'horizon de planification  $T$  :

- Au stade de l'approvisionnement, les émissions sont calculées en multipliant le flux de biomasse  $b$  consommée par la technologie de fermentation  $e$  à chaque période  $t$ ,  $FB_{b,e,t}$ , par l'émission liée à l'approvisionnement incluant le transport pour chaque type de biomasse  $b$ ,  $GHG_b$ ;
- Dans la phase manufacturière, l'émission considère les flux d'autres intrants  $l$  consommés par la technologie  $e$  (fermentation) à chaque période  $t$ ,  $FOI_{l,e,t}$ , associés aux phases de prétraitement et de fermentation telles que la cellulase (enzymes pour convertir la biomasse en sucres), la levure pour la fermentation des sucres ainsi que les flux internes de produits finis (électricité et chaleur) produits par la technologie  $e$  (cogénération) et consommés par la technologie  $e'$  (fermentation) à la période  $t$ ,  $IFFP_{i,e,e',t}$ . Les flux précédents sont affectés respectivement par la charge d'émission unitaire liée à ces intrants,  $GHGOI_l$ ,  $GHG3MWh_t$  et  $GHG5MWh_t$ . Par hypothèse nous considérons que l'émission générée par la consommation de biomasse pendant la phase de fermentation est nulle en se basant sur la carboneutralité de la conversion de biomasses. Par conséquent, l'émission totale générée par la voie éthanol est,

$$GHGP_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{b \in \{1,3,4\}} GHG_b \cdot FB_{b,1,t} + \sum_{t=1}^T (IFFP_{3,3,1,t} \cdot GHG3MWh_t + IFFP_{5,3,1,t} \cdot GHG5MWh_t) + \sum_{t=1}^T \sum_{l \in \{1,2\}} GHGOI_l \cdot FOI_{l,1,t} \sum_{b \in \{1,3,4\}} FB_{b,1,t} \cdot CR_{b,1} \quad (1)$$

- *Émission totale générée par l'activité incubatrice P&P (GHGP<sub>4</sub>)*: Ces émissions sont calculées par agrégation des émissions liées aux flux d'approvisionnement en biomasse  $b$  consommée par la technologie  $e$  (pâte Kraft) au cours de la période  $t$ ,  $FB_{b,e,t}$ , ajouté à l'émission générée, au cours de l'étape de conversion, en utilisant le procédé Kraft. Dans cette phase, l'émission prend en compte d'autres flux d'entrée, associés aux phases de prétraitement et de conversion comme les produits chimiques (l'hydroxyde de sodium et le sulfure de sodium), appelés liqueur blanche,  $FOI_{l,1,t}$ , ainsi que les flux d'énergies (chaleur et d'électricité) consommées,  $IFFP_{l,e,e',t}$ . L'émission est déterminée en multipliant les flux précédents par la charge d'émission associée, soient  $GHGOI_l$  (autres inputs : produits chimiques),  $GHG3MWh_t$  (électricité) et  $GHG5MWh_t$  (chaleur).

Une méthode d'allocation a été adoptée pour attribuer l'émission entre la liqueur noire et boues papetières recyclés dans le cadre des BRFI. L'émission résultante est,

$$GHGP_4 = \sum_{t=1}^T GHG_1 \cdot FB_{1,4,t} + \sum_{t=1}^T (IFFP_{3,3,4,t} \cdot GHG3MWh_t + IFFP_{5,3,4,t} \cdot GHG5MWh_t) + \sum_{t=1}^T \sum_{l \in \{3,4\}} GHGOI_l \cdot FOI_{l,1,t} \cdot FB_{1,4,t} \cdot CR_{1,4} \quad (2)$$

- *Émissions totales de la voie de digestion anaérobie (GHGP<sub>2</sub>)*: Cette émission comprend celle générée par l'approvisionnement en biomasse et en déchets (boue papetière) calculée en multipliant le flux de matière première consommée,  $FB_{b,e,t}$ , (flux de biomasse) et,  $IFCP_{j,e,e',t}$  (flux interne de déchets), respectivement par la charge d'émission liée à chaque type de flux,  $GHG_b$  et  $GHGC_j$ . En ajoute, en outre, les émissions générées au stade de la digestion sur l'horizon de planification. Cette dernière émission comprend les émissions générées par les énergies consommées au processus de digestion telles que l'électricité et la chaleur consommées pour stabiliser la température ambiante dans le digesteur. Les émissions totales liées à la digestion anaérobie sont ainsi déterminées par la formule suivante,

$$GHGP_2 = \sum_{t=1}^T GHG_2 \cdot FB_{2,2,t} + \sum_{t=1}^T (IFFP_{3,3,2,t} \cdot GHG3MWh_t + IFFP_{5,3,2,t} \cdot GHG5MWh_t) + \sum_{t=1}^T GHGC_2 \cdot IFCP_{2,4,2,t} + \sum_{t=1}^T GHG_{2,2} \cdot FB_{2,2,t} \cdot CR_{2,2} + \sum_{t=1}^T GHGC_{2,2} \cdot IFCP_{2,4,2,t} \cdot CRC_{2,2} \quad (3)$$

Les émissions du biogaz vendu, à une période  $t$ , sont égales aux émissions d'une unité de biogaz ( $1 \text{ m}^3$ ) à la période  $t$ ,  $GHG2M3_t$ , multipliée par le flux de biogaz livré au marché,  $MFFP_{i,t}$ , au cours de la même période. La formule de calcul de l'émission totale fait l'agrégation des émissions par période sur tout l'horizon comme suit,

$$GHG2M = \sum_{t=1}^T MFFP_{2,t} \cdot GHG2M3_t \quad (4)$$

- *L'émission totale de la cogénération ( $GHGP_3$ ):* L'émission considère le flux des intrants en liqueur noire,  $IFCP_{j,e,e',t}$ , et en biogaz,  $IFFP_{i,e,e',t}$ , consommé par l'unité de cogénération pour produire de l'électricité et de la chaleur. On ajoute, en outre, l'émission produite au stade du processus de cogénération par ces deux intrants. Chaque flux est multiplié par la charge d'émission associée. L'émission résultante est,

$$GHGP_3 = \sum_{t=1}^T GHGC_3 \cdot IFCP_{3,4,3,t} + \sum_{t=1}^T GHG2M3_t \cdot IFFP_{2,2,3,t} + \sum_{t=1}^T GHGP_{2,3} \cdot IFFP_{2,2,3,t} \cdot CRP_{2,3} + \sum_{t=1}^T GHGC_{3,3} \cdot IFCP_{3,4,3,t} \cdot CRC_{3,3} \quad (5)$$

Les émissions de l'électricité vendue sont égales aux émissions générées par une unité d'électricité au titre de la période  $t$ ,  $GHG3KWh_t$ , multipliée par le flux d'électricité livré au marché pendant la même période,  $MFFP_{3,t}$ . La formule de calcul de l'émission totale fait l'agrégation des émissions par période sur tout l'horizon de planification comme suit,

$$GHG3M = \sum_{t=1}^T MFFP_{3,t} \cdot GHG3KWh_t \quad (6)$$

- *Émission totale de la lignine  $GHGC_1$ :* Cette émission est calculée en multipliant l'émission de l'éthanol par le taux d'allocation,  $AR$ , déterminé selon la méthode énergétique basée sur la valeur calorifique minimale (LHV) liée à l'éthanol et à la lignine :

$$GHGC_1 = GHGP_1 \cdot AR_{1,1} \quad (7)$$

Comme expliqué ci-dessus, les émissions totales générées par la BRFI sont calculées par agrégation des émissions générées par tout le système ajoutées à celles générées par les émissions des coproduits et déchets de P&P non recyclés. Ainsi, l'émission totale est,

$$GHG\_TOTAL = GHGP_1 + GHGP_4 + GHG2M + GHG3M + \sum_{t=1}^T \sum_{j \in \{2,3\}} GHGC_{j,t} \cdot (QCP_{j,t} - IFCP_{j,t}) + GHGC_1 \quad (8)$$

- *Émissions totales de la biomasse :* Le total des émissions liées à la biomasse au stade de l'approvisionnement,  $GHG\_FTP$  (Equ. (11)), est composé par l'émission occasionnée par

la production, l'aménagement et le transport jusqu'aux centres de collecte,  $GHG\_BIF$  (Equ. (9)), ajoutée à l'émission générée par le transport jusqu'à la porte de l'usine,  $GHG\_TR$  (Equ. (10)) soit :

$$GHG\_BIF = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^4 GHG\_IF_b \sum_{e=1}^4 FB_{b,e,t} \quad (9)$$

$$GHG\_TR = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^4 GHG\_TR_b \sum_{e=1}^4 FB_{b,e,t} \quad (10)$$

$$GHG\_FTP = GHG\_BIF + GHG\_TR \quad (11)$$

### - Fonction de l'objectif de l'aspect économique

Suivant (Machani et al., 2014), la fonction de l'objectif consiste à maximiser la somme des Cash-Flow nets actualisés,  $CFNA$ , (Equ. (13)) et la valeur de récupération,  $SV$ , (Equ. (14)) de la BRFI à la fin de la période d'horizon. L'objectif ainsi est de maximiser la fonction de l'objectif économique donnée par :

$$EOBJ = Max(CFNA + SV) \quad (12)$$

*Le cash-flow net actualisé (ANCF) :* C'est le bénéfice actualisé de l'exploitation de la BRFI y compris l'activité incubatrice ajouté à la valeur actualisée des économies liées à la dépréciation fiscale,  $TR.AFD$ , diminué de l'impôt direct,  $TR.ACF$ , et de la valeur actualisée des coûts d'investissement,  $A\_INV\_H$ , sur l'horizon de planification  $T$ . On a ainsi,

$$ANCF = (1 - TR)ACF + TR.AFD - A\_INV\_H \quad (13)$$

Le cash-flow net (NCF) est:

$$NCF = (1 - TR).CF + TR.FD - INV\_H \quad (14)$$

- Le terme  $ACF$  inclut la valeur actualisée de l'ensemble des revenus des produits destinés au marché,  $ARMP$ , ajoutée à la valeur actualisée des revenus des coproduits destinés au marché,  $ACPR$ , diminué de la valeur actuelle du coût fixe d'exploitation de l'activité de P&P,  $ACCPP$ , du coût de fermeture de l'activité de P&P,  $ACCPP$ , de la valeur actuelle du coût de production relatif à tous les produits,  $APC$ , et de la valeur actuelle du coût de la fourniture de biomasse,  $ABC$  :

$$ACF = ARMP + ACPR - APC - AFCPP - ACCPP - ABC \quad (15)$$

La formule du cash-flow net pour la période  $t$  est :

$$ACF_t = ARMP_t + ACPR_t - APC_t - AFCPP_t - ACCPP_t - ABC_t \quad (16)$$

La formule du cash-flow est déduite de la précédente :

$$CF = \sum_{t=1}^T ACF_t(1+r)^t ; t = 1,2, \dots, T \quad (17)$$

$$CF_t = ACF_t(1+r)^t \quad (18)$$

- *La valeur de récupération de la BRFI à la fin de l'horizon de planification* : Elle est égale aux coûts d'investissement totaux en bioénergie, déduction faite des amortissements comptables et des 'debts' (reliquat de l'investissement non comprise dans l'horizon de planification) actualisés à la période  $T$ , par le taux d'intérêt annuel  $r$ .

$$- \quad SV = \frac{T\_INV - ADBI - D}{(1+r)^T} \quad (19)$$

Les termes des formules précédentes (Equ. (13)), (Equ. (15)) et (Equ. (19)) sont détaillés ci-dessous :

- *La valeur actualisée des revenus générés par tous les produits destinés au marché* : Elle est donnée par la somme des produits du prix de vente de chaque produit  $i$ ,  $SP_i$ , avec le flux du produit concerné,  $MFFP_{i,t}$ , expédiés au marché durant chaque période  $t$  actualisé par le taux d'intérêt annuel  $r$  :

$$ARMP = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 \frac{(SP_i \cdot MFFP_{i,t})}{(1+r)^t} \quad (20)$$

- *La valeur actuelle du coût de production de tous les produits* : Elle est donnée par la somme des produits du coût unitaire de production,  $PUC_i$ , de chaque produit  $i$  avec la quantité produite à chaque période  $t$ ,  $QFP_{i,t}$ , actualisé par le taux d'intérêt annuel  $r$  :

$$APC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 \frac{(PUC_i \cdot QFP_{i,t})}{(1+r)^t} \quad (21)$$

- *La valeur actuelle du coût fixe d'exploitation de l'activité P&P* : Elle est égale au coût fixe de l'exploitation,  $FCPP$ , multiplié par la valeur de l'état d'activité de P&P à chaque période  $t$ ,  $W_t$ , actualisé par le taux d'intérêt annuel  $r$  :

$$AFCPP = \sum_{t=1}^T \frac{(FCPP \cdot W_t)}{(1+r)^t} \quad (22)$$

- *La valeur actualisée du coût de fermeture de l'activité de P&P* : Elle est égale au coût de fermeture,  $CC$ , si l'activité de P&P n'est pas opérationnelle durant cette période ( $W_t = 0$ ), actualisée par le taux d'intérêt annuel  $r$  :

$$ACCP = \sum_{t=1}^T \frac{CC(1-W_t)}{(1+r)^t} \quad (23)$$

- *La valeur actualisée des revenus provenant des coproduits* : Cette valeur est donnée par le produit du prix de vente,  $SC_j$ , et les flux des coproduits  $j$  destinés au marché,  $MFCP_{j,t}$ , durant la période d'horizon actualisé par le taux d'intérêt annuel  $r$ :

$$ACPR = \sum_{t=1}^T \frac{SC_1 \cdot MFCP_{1,t}}{(1+r)^t} \quad (24)$$

- *La valeur actuelle du coût d'approvisionnement en biomasse* : Cette valeur est donnée par la somme des produits du coût unitaire de la biomasse  $b$ ,  $BUC_b$ , par le flux de la biomasse affectée aux différentes technologies  $e$ ,  $FB_{b,e,t}$ , durant la période d'horizon, actualisé par le taux d'intérêt annuel  $r$  :

$$ABC = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^4 \frac{BUC_b \sum_{e=1}^4 FB_{b,e,t}}{(1+r)^t} \quad (25)$$

- *La valeur actuelle de la dépréciation fiscale des investissements en bioénergie* : Elle est égale au coût d'investissement en bioénergie relatif aux technologies implémentées selon l'option de capacité  $o$  au cours des périodes de planification  $c$ ,  $IC_{o,e,c}$ , divisé par la durée de vie fiscale,  $FLT$ , durant les cycles de planification, actualisé par le taux d'intérêt annuel  $r$  :

$$AFD = \sum_{c=0}^{C-1} \sum_{t=c}^T \frac{\sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,c+1} (Y_{o,e,c+1} - Y_{o,e,c})}{FLT(1+r)^t} \quad (26)$$

Ainsi, la dépréciation fiscale (FD) est:

$$FD = \sum_{c=0}^{C-1} \sum_{t=(c.PC+1)}^T \frac{\sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,c+1} (Y_{o,e,c+1} - Y_{o,e,c})}{FLT} \quad (27)$$

- *La dépréciation comptable des investissements en bioénergie* : Elle est égale à la somme des coûts d'investissement en bioénergie, relatifs aux technologies implémentées selon l'option de capacité  $o$  au cours des périodes de planification  $c$ ,  $IC_{o,e,c}$ , annualisée selon la durée de vie économique,  $ELT$ , au cours des cycles de planification :

$$ADB I = \sum_{c=0}^{C-1} \left( \sum_{t=c}^T \frac{\sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,c+1} (Y_{o,e,c+1} - Y_{o,e,c})}{ELT} \right) \quad (28)$$

- *Le coût d'investissement total de la bioénergie* : Il est égal aux coûts d'investissement en bioénergie pour les technologies implémentées au cours des cycles de planification :

$$T\_INV = \sum_{c=1}^C \sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,c} (Y_{o,e,c} - Y_{o,e,c-1}) \quad (29)$$

- *Le coût d'investissement de l'horizon en bioénergie* : Il est égal aux coûts d'investissement en bioénergie pour les technologies implémentées annualisés sur les périodes de planification, durant les différents cycles :

$$H\_INV = \sum_{i=0}^{C-1} \left( \sum_{t=PC+1}^T \frac{\sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,i+1} (Y_{o,e,i+1} - Y_{o,e,i})}{T} \right) \quad (30)$$

- *La valeur actuelle du coût d'investissement de l'horizon*: Elle est égale aux coûts d'investissement en bioénergie, pour les technologies implémentées  $e$  au titre des cycles de planification, annualisés sur les périodes de planification de l'horizon financier et actualisées par le taux intérêt annuel  $r$  :

$$A_{INV_H} = \sum_{i=0}^{C-1} \left( \left( \sum_{t=PC+1}^T \frac{\sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,i+1} (Y_{o,e,i+1} - Y_{o,e,i})}{T} \right) (1+r)^{-(i*PC+1)} \right) \quad (31)$$

- *Les 'Debts'* : Les 'Debts' de la BRFI à la fin de l'horizon de planification sont égales au coût d'investissement total en technologies bioénergétiques, diminué du coût d'investissement en bioénergie encouru par l'entreprise durant l'horizon de planification :

$$D = T\_INV - H\_INV \quad (32)$$

## - Contraintes

- *Disponibilité de la biomasse* : Les flux d'approvisionnement en biomasse  $b$  consommés par la BRFI ne peuvent pas dépasser la quantité de biomasse disponible,  $BS_b$ , à chaque période  $t$ . La tendance d'évolution de l'offre de biomasse,  $BST$ , a été prise en compte :

$$\sum_{e=1}^4 FB_{b,e,t} \leq BS_b (1 + BST(t-1)) \forall b = 1,2,..4; t = 1,2,..,T \quad (33)$$

- *Équilibre de masse au niveau de la production bioénergétique* : La quantité produite de chaque produit bioénergétique  $i$ , à chaque période  $t$ , dépend du taux de conversion des intrants consommés. Ces inputs pourraient être fournis par les flux de biomasse,  $FB$ , les flux internes de coproduits,  $IFCP$ , ou les flux internes de produits finis,  $IFFP$  :

$$QFP_{i,e,t} - \sum_{b=1}^4 CR_{b,e} (1 + CT(t-1)) FB_{b,e,t} - \sum_{j=2}^3 CRC_{j,e} (1 + CT(t-1)) IFCP_{j,4,e,t} - CRP_{2,e} (1 + CT(t-1)) IFFP_{2,2,e,t} = 0 \forall i = 1,2,3; t = 1,2,..,T$$

(34)

- *Équilibre des flux énergétiques (Électricité)* : La quantité d'électricité produite par la cogénération, pour chaque période  $t$ , doit satisfaire la demande interne en fonction de la capacité de production installée pour chaque cycle :

$$IFFP_{3,3,e,t} - \sum_{o=1}^3 CE_e \cdot CO_{o,e} \cdot Y_{o,e,c(t)} \geq 0 \quad \forall e = 1,2 ; t = 1,2, \dots, T \quad (35)$$

$$IFFP_{3,3,4,t} - CE_4 \cdot CA_p \cdot W_t \geq 0 \quad \forall t = 1,2, \dots, T \quad (36)$$

- *Équilibre de flux des produits bioénergétiques pour chaque voie de production* : Tout produit bioénergétique réalisé à chaque période  $t$  est égal à la somme des flux consommés, sur site, par d'autres technologies ajoutées à la quantité vendue au marché du même produit :

$$QFP_{i,t} - \sum_{e' \in \{1,2,3,4\} \setminus \{i\}} IFFP_{i,i,e',t} - MFFP_{i,t} \geq 0 \quad \forall i = 1,2,3,4 ; t = 1,2, \dots, T \quad (37)$$

- *Disponibilité des coproduits* : À chaque période  $t$ , les flux des coproduits  $j$ , valables pour la vente ou pour la consommation interne, sont générés selon une proportion,  $\alpha_{j,i}$ , du produit concerné  $i$  :

$$QCP_{j,t} - \sum_{i=1}^4 \alpha_{j,i} \cdot QFP_{i,t} \leq 0 \quad \forall j = 1,2,3 ; t = 1,2, \dots, T \quad (38)$$

- *Contrainte de la capacité de production pour les produits bioénergétiques et du P&P* : La quantité de chaque produit réalisé au titre de chaque période  $t$ , ses flux destinés au marché et son utilisation interne ne doit pas dépasser la capacité de production installée pour ce produit durant le cycle comprenant cette période,  $c(t)$  :

$$QFP_{i,e,t} - \sum_{o=1}^3 CO_{o,e} \cdot Y_{o,e,c(t)} \leq 0 \quad \forall i, e = 1,2,3 ; t = 1,2, \dots, T \quad (39)$$

$$IFFP_{i,e,e',t} - \left( \sum_{o=1}^3 CO_{o,e} \cdot Y_{o,e,c(t)} \right) \cdot BN \leq 0 \quad \forall i = 1,2,3 ; e = 1,2,3,4 ; e' \in \{1,2,3,4\} \setminus \{e\} ; t = 1,2, \dots, T \quad (40)$$

$$QFP_{1,4,t} - CA_p \cdot W_t \leq 0 \quad \forall t = 1,2, \dots, T \quad (41)$$

- *Irréversibilité des investissements au cours de l'horizon de planification* : Toute technologie installée est irréversible au long de l'horizon de planification :

$$Y_{o,e,c} - Y_{o,e,c-1} \geq 0 \quad \forall e, o = 1,2,3 ; c = 1,2, \dots, 4 \quad (42)$$

- *Disponibilité budgétaire pour l'investissement* : Le coût d'investissement au cours de chaque cycle ne peut dépasser un budget alloué à ce titre :

$$\sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 (Y_{o,e,c} - Y_{o,e,c-1}) IC_{o,e,c} - BD_c \leq 0 \quad \forall c = 1, 2, \dots, 4 \quad (43)$$

- *Les produits marchandables obéissent à des contraintes de demande* : les flux de produits de P&P, de produits bioénergétiques et de coproduits vendus sur les marchés, à chaque période  $t$ , ne devraient pas dépasser la demande de ces produits au marché pendant cette période :

$$QFP_{4,4,t} \leq DP_4 \cdot W_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (44)$$

$$MFFP_{i,t} \leq DP_i (1 + DT(t-1)) \quad \forall i = 1, 2, 3; t = 1, 2, \dots, T \quad (45)$$

$$MFCP_{1,t} \leq DC_1 (1 + DT(t-1)) \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (46)$$

- **Contraintes de non négativités des variables de décision**

$$\begin{aligned} Y_{o,e,c} &= \{0,1\} & \forall o, e, c \\ W_t &= \{0,1\} & \forall t \\ FB_{b,e,t} &\geq 0 & \forall b, e, t \\ FOI_{l,e,t} &\geq 0 & \forall l, e, t \\ IFCP_{j,e,e',t} &\geq 0 & \forall j, e, e', t \\ IFFP_{i,e,e',t} &\geq 0 & \forall i, e, e', t \\ MFFP_{i,t} &\geq 0 & \forall i, t; \\ MFCP_{i,t} &\geq 0 & \forall j, t \\ QFP_{i,t} &\geq 0 & \forall i, t \\ QC_{j,t} &\geq 0 & \forall j, t \end{aligned} \quad (47)$$

### 2.2.3.3. Définition de la frontière de Pareto

A partir de l'optimisation multiobjectif, on peut déterminer un ensemble de solutions non dominées, connues sous le nom de frontière de Pareto (Collette and Siarry, 2003). Chaque solution non dominée de la frontière de Pareto est un compromis entre les objectifs couverts par l'étude. Dans la présente étude de cas, la frontière de Pareto est générée en utilisant la méthode des  $\epsilon$ -contraintes (Mavrotas, 2009). Cette méthode consiste à transformer

un objectif en contrainte et à optimiser l'autre en modifiant la contrainte entre les valeurs extrêmes du premier objectif. C'est à la frontière de Pareto qu'un compromis peut être effectué entre les deux objectifs, afin de définir l'optimalité qui dépend du choix des décideurs.

#### **2.2.3.4. Critères d'analyse**

Le modèle fournit un ensemble d'informations permettant l'analyse selon plusieurs critères et indicateurs connexes. À partir de ces critères, différentes classifications des solutions sont faites. Par exemple, l'investissement est analysé en utilisant le retour sur capital investi (CROIC) et le taux de rentabilité interne (TRI). Cependant, les émissions sont analysées en utilisant le taux d'émission global (TE) et l'émission unitaire des produits. Un ratio combiné exprimant le rapport du taux de rentabilité interne de l'investissement par rapport au taux d'émission est introduit pour calculer la valeur relative des deux indicateurs mentionnés ci-dessus (appelé ratio de la performance relative). Le taux d'intégration interne (TII) et le taux de rejet des déchets (TRD) sont également utilisés. Selon ces indicateurs, le classement des différentes solutions à la frontière de Pareto est analysé afin de distinguer les solutions les plus avantageuses.

#### **2.2.4. Interprétation de l'impact**

L'analyse décrite pour chaque aspect et la façon de présenter les résultats aux preneurs de décision doivent permettre à ces derniers d'exprimer leurs choix parmi les solutions concurrentes. Toutefois, après avoir discuté du choix de la solution optimale potentielle en fonction d'un ensemble de critères et indicateurs, nous procédons à formuler les interprétations de l'impact. Ces dernières porteront sur :

- La configuration de la bioraffinerie, en fonction des investissements retenus, en termes de technologies, capacité de production et planification de l'implémentation ;
- L'intégration verticale et la synergie avec l'activité incubatrice ;
- La viabilité d'investissement dans la voie éthanol ;
- La validation des résultats notamment en matière de l'impact environnemental ;
- Les recommandations générales aux vues des différentes interprétations.

## **2.3. Étude de cas**

Nous allons nous contenter, au niveau de cette section, de l'évaluation et l'interprétation des impacts. En effet, les deux premières phases de l'étude de cas ont été traitées au niveau de la méthodologie, à savoir, la définition de l'objectif et la portée de l'étude ainsi que l'analyse de l'inventaire.

### **2.3.1. Évaluation de l'impact**

'IBM ILOG CPLEX Optimization Studio' intégrant le langage de programmation OPL et le solveur CPLEX est l'environnement adopté pour la programmation et la résolution du modèle. Cet environnement a été interconnecté avec Access MS-Office 2013 via le langage SQL. La frontière de Pareto a été programmée en VBA sous Excel interfacé avec le modèle mathématique sous CPLEX Optimization Studio. Le nombre de variables du modèle totalisait 35760 pour les 20 solutions de Pareto soit 1788 variables par solution, y compris 1120 variables booléennes, soit 56 variables par solution. Alors que le nombre de contraintes s'élève à 2080. Le modèle mathématique a été exécuté sur une machine CPU Intel Core (TM) i7-2600 de 3,40 GHz avec 16 Go de RAM et un système d'exploitation 64 bits.

L'évaluation de l'impact englobe la génération de la frontière de Pareto et la discussion, par une analyse multicritère, de la performance et caractéristiques des solutions de la frontière.

#### **2.3.1.1. Génération de la frontière de Pareto**

La frontière de Pareto a été générée en utilisant la méthode  $\epsilon$ -contraintes. Selon cette méthode, le modèle est exécuté en considérant seulement l'objectif économique (EOBJ) sur l'horizon de 20 ans. La valeur de l'objectif résultant, EOBJ<sub>1</sub>, est déterminée en l'occurrence. La charge d'émission correspondante est calculée par le modèle, d'une façon attributionnelle, en fonction des variables de décision découlant de l'optimum économique. Ensuite, le modèle est exécuté en considérant seulement l'objectif environnemental (minimisation des émissions de GES). La valeur de l'objectif économique correspondant serait, dans ce dernier

cas,  $EOBJ_2$ .  $EOBJ_1$  et  $EOBJ_2$  constituent les deux solutions extrêmes de la frontière de Pareto. Les contraintes économiques sont obtenues en divisant la gamme entre  $EOBJ_1$  et  $EOBJ_2$  sur dix-neuf (19) intervalles égaux générant vingt (20) solutions différentes. La frontière de Pareto est obtenue en optimisant la fonction de l'objectif environnemental sous réserve des contraintes économiques déterminées. Cette frontière est illustrée par la figure 2.4. Toutefois, l'allure des objectifs environnementaux et économiques sont présentés pour chaque point de la frontière de Pareto comme illustrée par la figure 2.5.

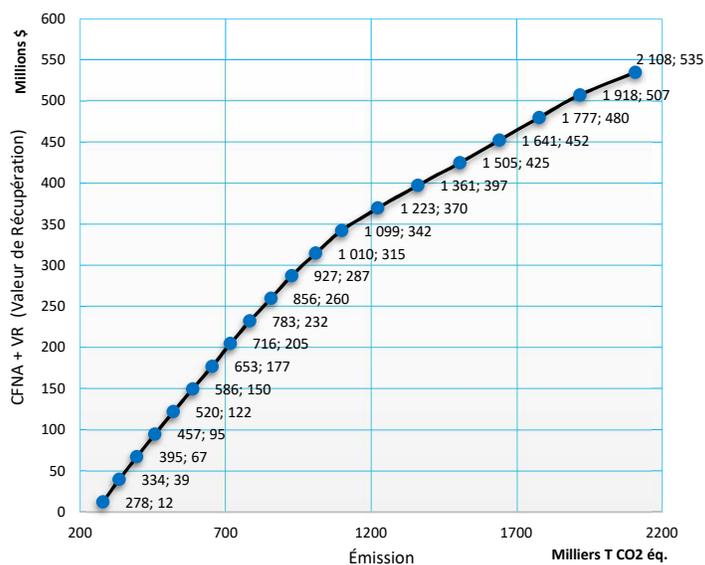


Figure 2.4 : Frontière de Pareto

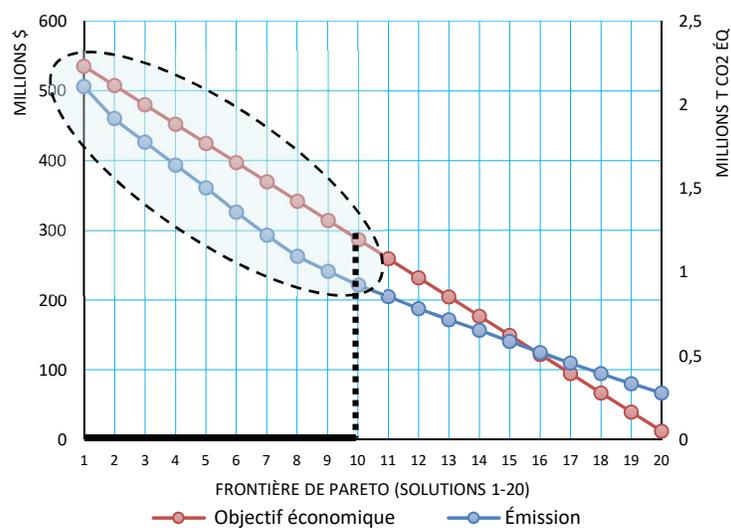


Figure 2.5 : Allure des deux objectifs à la frontière de Pareto

Chaque point de la figure 2.5 représente une solution non dominée selon le contexte des deux aspects étudiés. Cette figure montre que le taux de diminution des émissions est plus élevé, pour les premières solutions, au moment où l'objectif économique diminue linéairement. Nous nous limiterons ainsi nos analyses, par hypothèse, aux dix premières solutions où la transaction est plus significative. Nous notons qu'au niveau de la solution dix, l'objectif économique soit réduit de moitié alors que la voie éthanol ne devienne plus viable depuis la solution huit. Nous considérons que les décideurs ne tolèrent pas plus de dégradation de l'objectif économique afin de réduire les émissions.

### **2.3.1.2. Analyse des solutions**

Les solutions les plus avantageuses à la frontière de Pareto dépendent des transactions qui peuvent être établies entre les aspects étudiés en fonction des contraintes de management et de gouvernance du secteur incubateur. L'analyse des résultats tient compte d'un certain nombre d'indicateurs liés aux différents aspects étudiés. Il s'agit du rendement ou retour sur capital investi (CROIC), du taux de rentabilité interne (TRI), du taux d'émission (TE), du ratio de la performance relative (RPR), du taux d'intégration interne (TII) et du taux de rejet des déchets (TRD).

#### **- Planification et rentabilité des investissements**

Cette analyse couvre la technologie sélectionnée, la capacité de production et la période d'implémentation. Les résultats obtenus, pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto, sont illustrées par le tableau 2.2. Selon ce tableau, la capacité de production de la voie cogénération sélectionnée est stable à 40 MWh. Cette dernière capacité est raisonnable et conforme à (Goortani et al., 2010) suggérant que 44,5 MWh d'électricité peuvent être attribués aux unités de cogénération dans les usines canadiennes de fabrication de pâte à papier Kraft. Cependant, la voie de digestion anaérobie implémente une capacité annuelle de 120 millions (M) de mètres cubes ( $m^3$ ) de biogaz dont 80 M  $m^3$  implémentés au deuxième cycle et 40 M  $m^3$  implémentés au quatrième cycle. Pour la voie éthanol, la capacité de production implémentée diminue d'une solution à l'autre. Pour la première solution, la capacité implémentée au premier cycle d'investissement s'élève à 90 M litres. Au début du troisième cycle d'investissement une capacité supplémentaire de 30 M litres a été ajoutée.

Toutefois, la capacité totale de production, pour la septième solution, a diminué à 30 M litres implémentée au troisième cycle d'investissement. A la huitième solution la voie éthanol devient non viable. Le détail de la planification des investissements, en termes de technologie sélectionnée, capacité de production et capital total investi, pour les solutions concernées, est explicité par le tableau 2.2.

**Tableau 2.2 :** Planification de l'investissement (technologie sélectionnée, capacité de production, période d'implémentation et capital total investi pour chaque technologie) au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto.

Technologie		Cogeneration (C: Capacity in MWh; K: Capital in Million\$)									
Cycle	1		2		3		4		Total		
F. de Pareto	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	
1	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
2	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
3	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
4	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
5	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
6	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
7	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
8	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
9	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	
10	40	150,4	-	-	-	-	-	-	40	150,4	

Technologie		Digestion anaérobie (C : Capacité en M m <sup>3</sup> ; K : capital total investi en Million de \$)									
Cycle	1		2		3		4		Total		
F. de Pareto	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	
1	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
2	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
3	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
4	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
5	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
6	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
7	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
8	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
9	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	
10	-	-	80	160	-	-	40	80	120	240	

Technologie		Fermentation (C : Capacité en M litre ; K : capital total investi en Million de \$)									
Cycle	1		2		3		4		Total		
F. de Pareto	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	
1	90	108,9	-	-	30	36,3	-	-	120	145,2	
2	60	72,6	30	36,3	-	-	-	-	90	108,9	
3	60	72,6	-	-	-	-	30	36,3	90	108,9	
4	60	72,6	-	-	-	-	-	-	60	72,6	
5	-	-	60	72,6	-	-	-	-	60	72,6	
6	30	36,3	-	-	-	-	-	-	30	36,3	
7	-	-	-	-	30	36,3	-	-	30	36,3	
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Les résultats afférents à la capacité de production implémentée, pour les technologies sélectionnées, indiquent que la détérioration de l'objectif économique d'une solution à l'autre,

au cours des huit premières solutions de la frontière de Pareto, est causée par la réduction de la production de l'éthanol. En effet, le capital investi diminue d'une solution à l'autre et la proportion de l'éthanol dans le cash-flow net se dégrade en contrepartie de l'augmentation de la production de pâtes de papier, sachant que l'éthanol partage avec cette activité le résidu industriel comme matière première. La concurrence au niveau de l'approvisionnement favorise la voie qui présente la meilleure performance relative entre les émissions et la rentabilité économique. Cependant, tout en réduisant la capacité de production, l'éthanol migre vers l'utilisation de la biomasse la plus propre qui est le résidu forestier. Le tableau 2.3 illustre ces constatations.

**Tableau 2.3 :** Comportement de la voie éthanol au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto

<b>solution</b>	<b>Résidus agricoles</b>	<b>Résidus forestiers</b>	<b>Résidus industriels</b>
<b>1</b>	0,4%	0,0%	99,6%
<b>2</b>	0,0%	45,8%	54,2%
<b>3</b>	0,0%	39,4%	60,6%
<b>4</b>	0,0%	79,6%	20,4%
<b>5</b>	0,0%	100,0%	0,0%
<b>6</b>	0,0%	88,9%	11,1%
<b>7</b>	0,0%	100,0%	0,0%

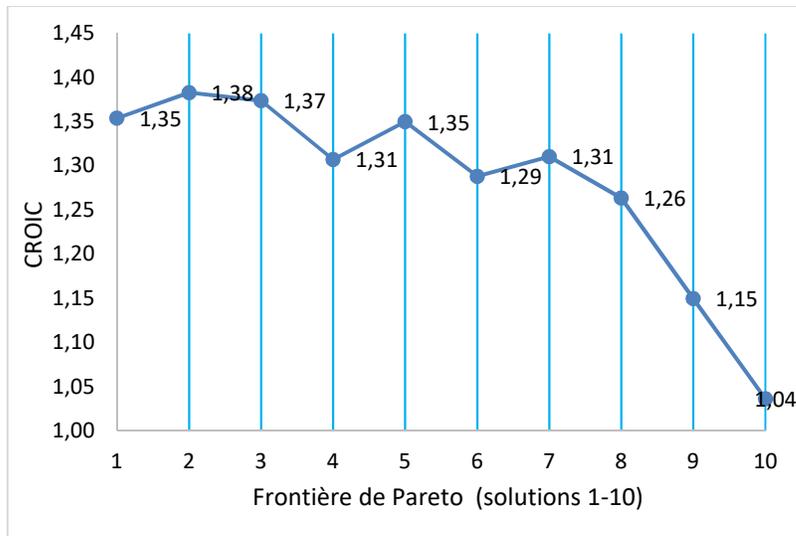
Pour analyser davantage la composante investissement, nous avons utilisé deux indicateurs suivants :

- Le CROIC (*Cash Return On Invested Capital*) pour mesurer le retour sur capital investi.

$$CROIC = ANCF/A\_INV\_H \quad (48)$$

où ANCF et A\_INV\_H sont les cash-flows nets actualisés et le capital investi actualisé définis respectivement dans les équations (13) et (31).

La figure 2.6 présente ce rapport pour chaque solution de la frontière de Pareto. Plus le CROIC est élevée, plus la BRFI génère de liquidités à partir du capital investi. Nous remarquons que les variations du CROIC ne suivent pas ceux de la fonction de l'objectif de l'aspect économique. Par exemple, la solution 1 (qui a la fonction de l'objectif économique la plus élevée) permet un CROIC inférieur aux solutions 2 et 3. Selon le critère CROIC, les solutions 2 et 3 sont bonnes avec une valeur de 1,38 et 1,37 (respectivement).

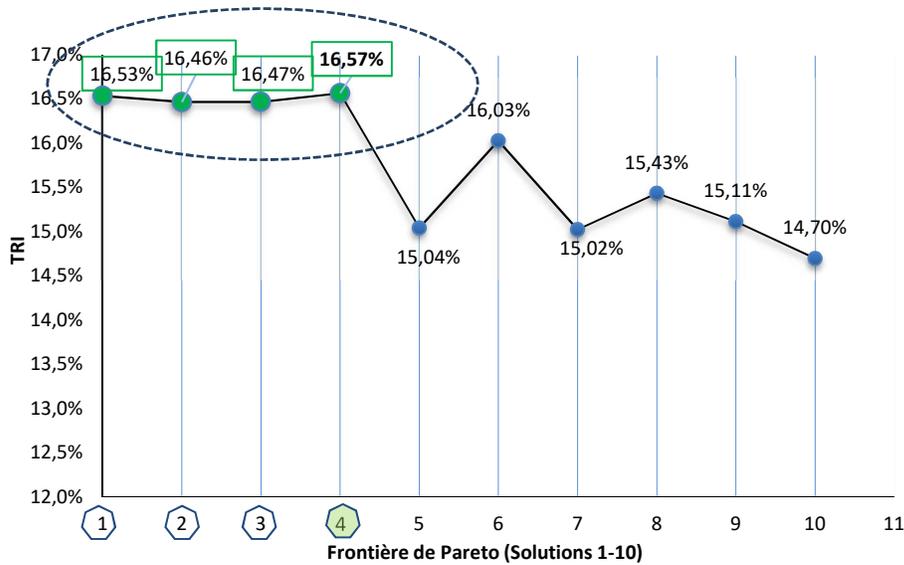


**Figure 2.6 :** Retour sur capital investi CROIC au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto

- Le taux de rentabilité interne (TIR) utilisé pour mesurer la performance économique de l'investissement sélectionné. Notez que le TIR est le taux d'intérêt pour lequel la valeur actuelle nette de tous les CF d'un projet ou d'un investissement est égale à zéro. Le TIR est calculé en tenant compte de l'imposition directe et de la valeur de récupération (valeur résiduelle) selon la formule suivante :

$$\sum_{t=1}^T \frac{CFN_t}{(1+TIR)^t} - H\_INV + \frac{SV}{(1+TIR)^T} = 0 \quad (49)$$

D'après cet indicateur, les quatre premières solutions de la frontière de Pareto sont des cibles remarquables pour une transaction potentielle comme illustrée par à figure 2.7. Notez qu'à partir de la solution 8 la voie éthanol devient non viable. En se basant sur ce critère, la quatrième solution est préférée pour l'ensemble des activités de production bioénergétique.



**Figure 2.7 :** Taux de rentabilité interne TRI au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto

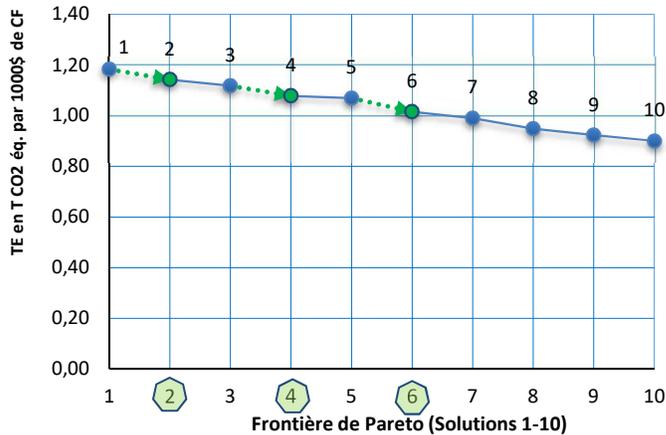
### - Émissions générées par les technologies implémentées

Le taux d'émission (TE) par 1000 \$ de flux de trésorerie pour l'ensemble de l'activité indique la charge environnementale des flux de trésorerie impliqués dans chaque solution de la frontière de Pareto analysée.

$$TE = GHG\_total / (CF / 1000) \quad (50)$$

où GHG\_total et CF sont les émissions totales et les flux de trésorerie définis dans les équations (8) et (17), respectivement.

Le taux d'émission (TE), par 1000 \$ de CF pour l'ensemble de l'activité, indique l'impact environnemental des flux de trésorerie impliqués dans chaque solution analysée de la frontière de Pareto. Comme déjà illustré par la figure 2.8, le taux d'émission diminue plus rapidement que le CF mais plus remarquablement au niveau des solutions 2, 4 et 6. Toutefois, les dernières solutions constituent une cible pour la transaction selon ce critère.

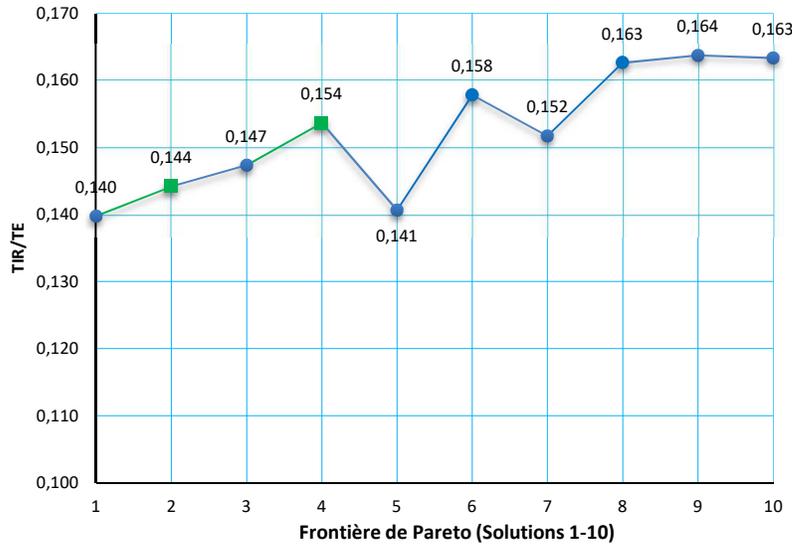


**Figure 2.8:** Taux d'émission TE au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto

Dans la plupart des cas, les indicateurs de la performance économique et environnementale peuvent diverger à propos de l'identification des solutions cibles pour les transactions. Pour régler ce conflit, un ratio de performance relative est introduit. Ce ratio nous renseigne sur les deux aspects contradictoires étudiés pour le même projet d'investissement.

### - Performance relative des investissements

Le ratio TRI/TE, considéré comme ratio de la performance relative, est un ratio qui combine les deux indicateurs conflictuels. Ce ratio est proposé pour faciliter le classement les différentes solutions analysées en tenant compte des deux aspects de la soutenabilité en même temps. La figure 2.9 montre le comportement de ce ratio pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto. A ce propos, les solutions 2 et 4 dominent les autres solutions avec une préférence pour la solution 4. En effet, la pente avant ces solutions cibles prouvent l'importance de la variation, en termes de performance relative, lors de la transaction avec ses solutions. Ce ratio permet potentiellement de résoudre le conflit entre les tendances contradictoires des premiers indicateurs reflétant chacun un aspect de la soutenabilité.



**Figure 2.9** : Ratio de la performance relative TRI/TE au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto

### - Autres indicateurs analysés

Pour guider le choix des décisions au niveau de la frontière de Pareto, on renforcera l'analyse par d'autres indicateurs significatifs exprimant certains aspects touchant à la soutenabilité. A cet effet, on a pris en considération le taux d'intégration interne des produits finis TII et le taux de recyclage des déchets TRD provenant de l'activité de P&P.

#### ▪ Taux d'intégration interne des produits finis

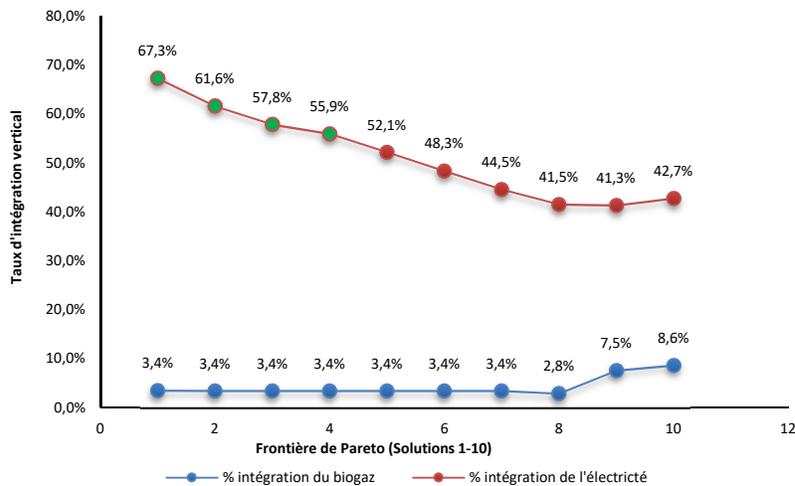
Le taux d'intégration interne (TII) des produits finis (biogaz ou électricité) est défini comme le rapport du débit des produits finis intégrés dans les autres processus de conversion sur site, sur la quantité de produits finis réalisés. Autrement dit, nous avons pour le biogaz ( $i = 2$ ) et l'électricité ( $i = 3$ ) :

$$TII_i = 1 - \sum_{t=1}^T MFFP_{i,t} / \sum_{t=1}^T QFP_{i,t}$$

Un TII plus élevé signifie que la BRFI est bien intégrée. Pour le biogaz, la figure 2.9 montre un TII faible pour toutes les solutions de Pareto : 3,4% pour les solutions 1-7. Cela signifie que 96,6% des produits finaux sont vendus, tandis que 3,4% sont consommés par la cogénération. Le TII de l'électricité passe de 67,3% pour la solution 1 à 44,5% pour la solution 7. Pour les solutions 1 à 4, moins de 45% de l'électricité est vendue. Le reste de

l'électricité (plus de 55%) est intégré pour la satisfaction de la consommation interne en énergie propre.

Concernant le taux d'intégration des produits fins, une préférence significative pour les solutions 1 à 4 est notée selon la figure 2.10 en se basant sur le taux d'intégration de l'électricité. Toutefois, le taux d'intégration du biogaz ne permet pas d'identifier ces cibles potentielles pour la transaction.



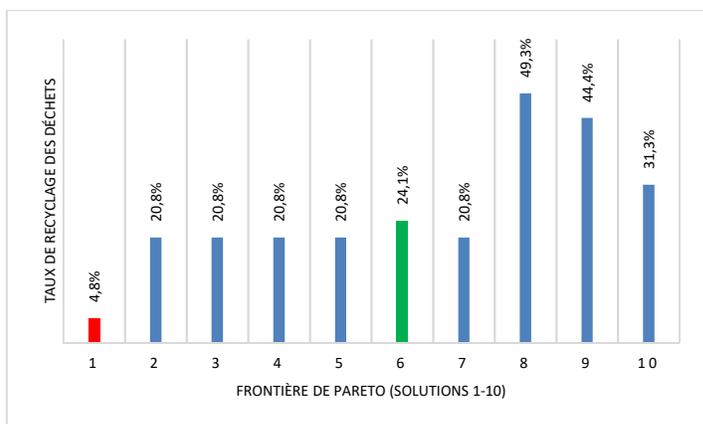
**Figure 2.10 :** Taux d'intégration interne des produits finis au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto

- *Taux de recyclage des déchets*

Le taux de recyclage des déchets (boues papetières) est défini par la formule suivante:

$$TRD = \sum_{t=1}^T IFCP_{2,4,3,t} / \sum_{t=1}^T \alpha_{2,4} \cdot QFP_{4,t} \quad (51)$$

où  $IFCP_{2,4,3,t}$  est le flux du coproduit 2 (boues papetières) généré par la technologie 4 (pâte kraft) et utilisé par la technologie 3 (cogénération) au cours de la période  $t$ ;  $QFP_{4,t}$  est la quantité de produit final 4 (pâtes et papiers) produite au cours de la période  $t$ ; et  $\alpha_{2,4}$  est la fraction du coproduit 4 (pâte et papier) qui constitue le coproduit 2 (boues papetières). Un TRD plus élevé signifie que le taux de recyclage des boues papetières, par l'unité de digestion anaérobie pour produire du biogaz, est plus important. La figure 2.11 montre que l'indicateur TRD favorise la transaction avec la solution 6, et désavantage la solution 1 pour laquelle le taux de recyclage des déchets ne dépasse pas 5%.



**Figure 2.11 :** Taux de recyclage des déchets au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto

## - Classement des solutions

Le tableau 2.4 résume le classement des solutions en tenant compte de tous les indicateurs analysés. Selon ce classement, les solutions 4 et 3 sont des cibles de compromis potentielles. Cependant, il appartient à l'investisseur de choisir la solution optimale en fonction du contexte et des préoccupations des compagnies de P&P. Les incitations accordées pour la production de bioénergie, les contraintes écologiques et de marché peuvent être d'autres raisons pour orienter le choix d'investissement.

**Tableau 2.4 :** Classement des différentes solutions à la frontière de Pareto selon les indicateurs adoptés

Frontière de Pareto	Classement selon les différents indicateurs													
	CROIC		TRI		TE		TRI/TE		TRD		TII		Score total	Rang final
	Valeur	Rang	Valeur	Rang	Valeur	Rang	Valeur	Rang	Valeur	Rang	Valeur	Rang		
1	1.354	3	16.53%	2	1.18	7	0.140	7	4.8%	7	67.3%	1	27	7
2	1.383	1	16.46%	4	1.14	6	0.144	5	20.8%	2	61.6%	2	20	3
3	1.374	2	16.47%	3	1.12	5	0.147	4	20.8%	2	57.8%	3	19	1
4	1.307	6	16.57%	1	1.08	4	0.154	2	20.8%	2	55.9%	4	19	1
5	1.350	4	15.04%	6	1.07	3	0.141	6	20.8%	2	52.1%	5	26	6
6	1.288	7	16.03%	5	1.02	2	0.158	1	24.1%	1	48.3%	6	22	4
7	1.310	5	15.02%	7	0.99	1	0.152	3	20.8%	2	44.5%	7	25	5

### 2.3.2. Interprétation d'impacts

Après avoir discuté du choix de la solution optimale potentielle sur la base d'un ensemble d'indicateurs, l'interprétation de l'impact concernera l'intégration de la bioraffinerie et la synergie avec l'activité incubatrice pour la solution 4, considérée comme une solution de compromis fortement recommandée en se basant sur les valeurs du ratio de la performance

relative. Toutefois, pour valider les résultats obtenus, en matière des émissions unitaires au titre des différents produits, une comparaison est faite avec d'autres travaux de recherche.

### **2.3.2.1. Intégration verticale et synergie avec l'activité incubatrice**

L'intégration économique verticale est un attribut intrinsèque aux bioraffineries. Dans notre cas, le taux d'intégration verticale de la production d'électricité est de 100% en amont (intrants) et de 61.6% en aval (extrants) permettant ainsi d'assurer la satisfaction interne en énergie propre. Le taux des déchets est bien réduit et le système fonctionne en indépendance totale des combustibles fossiles. La cogénération est approvisionnée à 98,27% en liqueur noire, consommée en totalité, le reste (1.73%) est assuré par le biogaz représentant 3,4% du produit total de l'unité de digestion anaérobie. Cette dernière unité est approvisionnée en boues papetières selon un taux de 1,7% et avec les résidus municipaux selon un taux de 98,3%. Les boues papetières sont valorisées ainsi à 20,8%.

De ce qui précède, on constate que l'activité de P&P est indispensable pour l'approvisionnement de l'unité de cogénération alors que la voie de digestion anaérobie agit comme soutien de sécurité pour l'approvisionnement de la cogénération.

### **2.3.2.2. Étude comparative des émissions unitaires par produit**

En se référant aux données de la solution optimale, au sens du tableau 2.4, les émissions par produit sont comparées aux résultats similaires issus d'autres travaux de recherche.

- Pour l'éthanol, l'émission est de 16,1 g CO<sub>2</sub> éq.MJ<sup>-1</sup> d'éthanol en tenant compte d'un LHV de 21,2 MJL<sup>-1</sup> (Thomas, 2000). Ce résultat cadre avec celui rapporté par (Karlsson et al., 2014), qui a enregistré 13,2 g et 14,9 g de CO<sub>2</sub> éq.MJ<sup>-1</sup> d'éthanol provenant des résidus forestiers respectivement pour la méthode ISO (qui applique la norme internationale LCA) et la méthode RED (qui applique la méthodologie stipulée par la directive européenne sur les énergies renouvelables). Le modèle GREET rapporte 21,4 g de CO<sub>2</sub> eq.MJ<sup>-1</sup> pour l'éthanol cellulosique provenant des résidus forestiers (C. E. P. A. - Air Resources Board, 2009).

(Spatari et al., 2010) rapportent, selon (Brinkman and Wang, 2005) une émission de 17 g de CO<sub>2</sub> eq.MJ<sup>-1</sup> d'éthanol.

- L'émission enregistrée pour une tonne de pâte de papier est de 314.4 kg CO<sub>2</sub> éq. Ce résultat cadre avec (CEPI, 2011) qui a trouvé 340 kg CO<sub>2</sub> eq. Cependant, (McKechnie et al., 2014) ont trouvé 491 kg de CO<sub>2</sub> eq. (L'électricité est supposée être alimentée par un mix d'électricité du réseau et de la cogénération sur site) ;

- L'émission de 1 m<sup>3</sup> de biogaz est égale à 0,130 kg de CO<sub>2</sub> eq. soit 5,9 g de CO<sub>2</sub> eq.MJ<sup>-1</sup>. (Edwards et al., 2011) ont rapporté de 10 à 25 g de CO<sub>2</sub> eq.MJ<sup>-1</sup> ;

- L'émission d'un MW d'électricité et de chaleur trouvée était respectivement de 38 et 16.7 kg de CO<sub>2</sub> eq. en utilisant la méthode d'allocation d'énergie recommandée par (NCASI, 2005). Cette émission est en ligne avec (Jamie, M. et al., 2011) rapportant 45 kg de CO<sub>2</sub> eq.MW<sup>-1</sup> pour l'électricité produite de la biomasse.

### **2.3.2.3. Recommandations générales**

La conception d'une bioraffinerie économiquement performante et à faible émission de GES est possible pour les P&P canadiennes. Cependant, certaines recommandations peuvent améliorer la soutenabilité et réduire les risques de mise en œuvre de l'implémentation des BRFI.

- *À propos de l'autosuffisance énergétique* : les résultats montrent que la proportion d'électricité vendue est située entre 23% et 58.5% de l'électricité produite (pour les dix première solutions). Cela constitue une garantie potentielle pour l'approvisionnement interne en énergie propre. Par conséquent, il est recommandé d'exporter l'électricité selon des contrats flexibles en termes de quantité fournie afin de renforcer l'autosuffisance interne.

- *Pour les risques inhérents à l'unité de la digestion anaérobie* : la dépendance de cette unité aux intrants provenant des résidus municipaux est risquée en raison de la concurrence potentielle avec les projets de méthanisation. En outre, la voie de digestion anaérobie ne garantit pas un recyclage intégral des boues papetières (74% en moyenne non recyclé). Pour éviter ainsi le rejet des déchets organiques, il est recommandé d'explorer d'autres voies de valorisation plus adéquates.

- *Optimisation de la logistique d'approvisionnement* : Le résultat montre que la phase de transport participe à concurrence de 32 à 37% aux émissions totales (moyenne des dix premières solutions de la frontière de Pareto). Par conséquent, il est recommandé d'optimiser la logistique de transport pour le contexte canadien.

- *Viabilité de la voie éthanol* : Selon les solutions non dominées présentées au niveau de la frontière de Pareto, la voie éthanol devient non viable à partir de la solution 8. L'amélioration de la performance économique peut renforcer la consistance de cette voie. Pour assurer la soutenabilité à long terme de la production de l'éthanol, les décideurs devraient élaborer une stratégie de soutien afin de promouvoir la production et l'utilisation de ce produit. Des incitations fiscales ou financières du gouvernement sont recommandées pour relaxer le compromis au-delà de la solution 6 et permettre ainsi plus de choix pour atteindre un plan d'affaires réussi.

## **2.4. Conclusion**

Pour confectionner une feuille de route propice à la planification soutenable des investissements en bioénergie, un modèle mathématique bi-objectif a été développé. Ce modèle vise à minimiser les émissions de GES et à maximiser le profit net d'une compagnie de P&P intégrant la production bioénergétique sur un horizon de planification à long terme. Le modèle proposé représente un outil d'aide à la décision pour la planification et la mise en œuvre de l'investissement dans la bioénergie tout en gérant les émissions qui en découlent. Nous avons tenu compte, au niveau de ce modèle, de l'évolution de la tendance de plusieurs paramètres tels que la disponibilité de la biomasse, la maturité des technologies et la demande en bioénergie.

Le modèle fournit des fondements pour la mise en œuvre d'une comptabilité intégrant la dimension environnementale afin de mieux comprendre et analyser les interactions entre les aspects environnementaux et économiques. Cela facilite le respect des obligations environnementales liées à l'émission des installations industrielles et éventuellement à la manipulation des quotas de droit d'émission aux échanges commerciaux, tout en mesurant les progrès vers des objectifs du développement durable.

Le modèle fournit, en outre, un ensemble d'informations permettant d'analyser l'optimalité selon plusieurs critères. Un ratio exprimant la performance relative des investissements est mis en œuvre pour refléter la valeur relative de la performance économique par rapport à la charge environnementale des investissements. Selon les différents critères et indicateurs, le classement des différentes solutions à la frontière de Pareto est analysé afin de distinguer les solutions les plus avantageuses pour chaque indicateur.

Les résultats obtenus illustrent l'importance d'un outil systémique d'aide à la décision pour la refonte d'un plan d'affaires soutenable en intégrant les investissements en bioénergie. L'intégration des bioraffineries de deuxième génération permet à l'industrie des pâtes et papiers de diversifier son portefeuille et de générer de nouveaux revenus tout en contribuant de manière significative aux efforts de réduction des émissions au Canada et à la production des énergies renouvelables. La gestion du composant environnemental enrichit le système d'information qui permet ainsi le calcul en intermittence du stock de carbone, le transfert de l'attribut carbone aux clients et le respect des exigences en matière du système déclaratif pour la conformité avec l'aménagement de l'environnement conformément à la norme ISO 14001.

Enfin, il convient de souligner que l'intégration de la voie éthanol nécessite des incitations économiques pour confirmer sa viabilité. En effet, il est prouvé que ces incitations améliorent les performances globales de la soutenabilité de la bioraffinerie en particulier pour la voie éthanol. Par conséquent, le soutien du gouvernement est nécessaire pour réaliser un plan d'affaires réussi lors de l'intégration de cette voie. Toutefois, il est à signaler que l'équilibre entre les incitations économiques et les gains en émissions attendus demeure une question polémique.

# Chapitre 3 : Conception des scénarios et analyse de sensibilité

## 3.1. Introduction

L'analyse de sensibilité du modèle mathématique multiobjectif, dédié à l'évaluation de la soutenabilité des BRFI implémentées aux P&P, fera l'objet de ce chapitre. L'objectif de cette analyse est d'évaluer la robustesse du modèle, de bien communiquer aux parties prenantes les implications du choix des investissements bioénergétiques dans un environnement incertain et de détecter les limites et les perspectives d'amélioration du modèle. Une méthodologie basée sur des scénarios contextuels et une analyse multicritères intégrée a été adoptée pour effectuer cette analyse.

Lors de la modélisation, une approche robuste est recommandée si aucun changement à la décision n'est possible, comme dans le cas des problèmes de planification stratégique. Toutefois, il est à signaler que la conception et le développement du réseau de création de valeur fait partie des décisions stratégiques qui engagent l'entreprise à long terme (planification des investissements dans notre cas). Les paramètres de l'environnement économique peuvent changer et par conséquent affecter les performances du réseau de création de valeur. Pour concevoir un réseau évolutif et robuste, les changements importants dans l'environnement économique doivent être pris en considération pour confirmer la robustesse du modèle vis-à-vis de la volatilité de ces paramètres.

Les résultats, explicités dans le chapitre précédent, confirment le fait qu'une transition vers l'intégration de la production énergétique pourrait consolider le plan d'affaires des compagnies de P&P, en améliorant leur rentabilité et en minimisant leur émission de GES. Dans le cas où le modèle est proposé comme outil d'aide à la décision, l'étude de sa robustesse est nécessaire pour éliminer les risques inhérents au choix des données et pour orienter les utilisateurs vers les meilleurs choix en matière d'investissement bioénergétique. En effet, un modèle robuste est celui qui présente une certaine stabilité dans la relation entre ses données d'entrées et de sorties. En général, l'application d'un modèle mathématique à une étude de

cas dépend du choix des paramètres d'entrées et la variation de ces derniers affecte les résultats et les interprétations qui en découlent. Une petite modification des données d'entrées qui influence de manière significative les résultats d'un modèle peut réduire sa robustesse.

Nous proposons dans ce chapitre, une analyse de sensibilité du modèle présenté et appliqué dans le chapitre précédent. Notre objectif est d'évaluer son comportement vis-à-vis de la soutenabilité de l'investissement en bioénergie par suite de la variation de paramètres sélectionnés sur la base de scénarios contextuels. L'analyse de sensibilité permet, en outre, de communiquer aux parties prenantes les implications des choix d'investissement et du comportement du système modélisé par rapport aux paramètres prévisibles, ce qui renforce éventuellement la crédibilité des résultats de ce modèle.

L'objectif de l'analyse proposée, dans notre cas, est d'étudier la sensibilité du modèle aux contextes suivants :

- Conditions de marché défavorables pour l'activité incubatrice : l'impact de ce contexte permet d'évaluer l'importance de la synergie avec cette activité et les conséquences sur l'équilibre énergétique ;
- Incitations économiques aux activités de production bioénergétique : l'impact de ce contexte permet de déterminer l'ampleur de l'interventionnisme public sur le comportement du modèle en matière du choix d'investissement et notamment sur la capacité de production ;
- Conditions d'approvisionnement difficiles en raison de la concurrence : ce contexte permet d'étudier l'impact sur la planification des investissements et sur la soutenabilité dans le cas de la concurrence ou la production à grande échelle des bioénergies ;
- Règlementation limitant les émissions causées par la production de l'éthanol : l'impact de ce contexte permet d'étudier la consistance de cette voie de production face aux contraintes réglementaires.

De nombreux défis surviennent lors de l'analyse de sensibilité d'un modèle multi-objectif. Le premier défi réside au niveau de la motivation du choix des scénarios objet de

l'analyse de sensibilité. En fait, la pertinence de l'analyse de robustesse du modèle dépend de ce choix. L'application d'une analyse multicritère pour déterminer la solution optimale pour chaque scénario est un autre défi à résoudre, notamment lorsque le nombre de scénarios est important. Le troisième défi est lié à la sélection des critères d'analyse qui relient les aspects de la soutenabilité aux choix à long terme de l'investissement bioénergétique.

Notre objectif, à propos de ces derniers défis, est de mener une analyse de sensibilité vérifiant la robustesse du modèle et conduisant à des conclusions significatives en termes d'investissement en bioénergie. Trois objectifs sous-jacents seront ainsi poursuivis :

- Tester la robustesse du modèle en présence d'incertitudes ;
- Améliorer le niveau de la communication entre 'modélistes' et décideurs à travers des recommandations plus crédibles, compréhensibles et convaincantes ;
- Proposer une analyse de perspective pour améliorer l'efficacité du modèle.

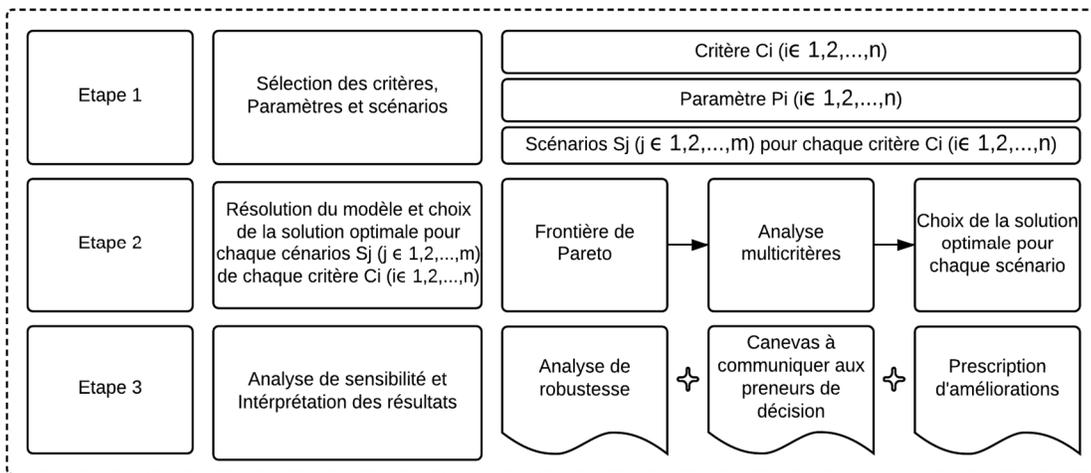
Le reste du présent chapitre est organisé comme suit. Dans une première section, nous exposons la méthodologie qui décrit fondamentalement la conception des scénarios proposés pour l'analyse de sensibilité. Dans la deuxième et la troisième section, nous présentons respectivement les résultats de l'analyse de sensibilité et l'interprétation selon les objectifs susmentionnés. La conclusion de ce chapitre fera la dernière section.

### **3.2. Méthodologie**

La méthodologie proposée pour analyser la sensibilité du modèle s'articule autour de trois étapes.

- Au titre de la première étape, un ensemble de critères est proposé en se référant aux statistiques et aux rapports prospectifs sur le secteur des P&P au Canada et dans le monde. Les politiques de transition énergétique, incitant à la production des énergies renouvelables, sont aussi considérées à côté de certains autres critères retenus par estimation. Ces derniers critères concernent les restrictions réglementaires sur les émissions et les difficultés d'approvisionnement occasionnées éventuellement par la concurrence. À partir de ces critères, on détermine les paramètres et scénarios y afférents en fonction des tendances réelles ou approchées du réel dans la plupart des scénarios.

- Dans la deuxième étape, le modèle, concerné par l'analyse de sensibilité, sera appliqué à chaque scénario pour identifier la frontière de Pareto en utilisant la méthode des  $\epsilon$ -contraintes. Une analyse multicritère est adoptée pour identifier le compromis le plus favorable pour la solution optimale. La solution optimale pour chaque scénario constitue l'objet de l'analyse de sensibilité.
- Dans la troisième étape nous effectuons, dans un premier temps, l'analyse de sensibilité des différents scénarios, par comparaison au scénario de base et dans un deuxième temps nous formulons les interprétations conformément aux objectifs escomptés de l'analyse. Ainsi, en guise d'interprétation, nous explicitons les éléments de la robustesse du modèle proposé et les implications à communiquer aux parties prenantes sur la planification des investissements bioénergétiques dans un contexte incertain. En outre, une analyse de perspective, pour améliorer l'efficacité du modèle, sera réservée en fonction des limites constatées. La solution du scénario de référence (scénario zéro : SC0) est celle déterminée en fonction des paramètres retenus au chapitre précédent. La figure 3.1 explicite la méthodologie à trois étapes déjà expliquée.



**Figure 3.1 :** Méthodologie proposée pour l'analyse de sensibilité

Nous explicitons, ci-après, la méthodologie proposée avant de procéder à son application pour l'analyse de sensibilité.

### **3.2.1. Choix des critères pour la conception des scénarios**

Trois types de critères sont retenus pour l'analyse de sensibilité. Le premier type concerne la *détérioration des conditions du marché* des P&P. L'analyse de ce contexte permet d'évaluer, selon les objectifs de l'étude, l'importance de la synergie avec l'activité incubatrice et les conséquences sur l'équilibre énergétique dont notamment l'approvisionnement de la cogénération. Le second type de critères concerne les *incitations économiques* aux activités de production bioénergétique. L'analyse de l'impact, selon ce contexte, permet de déterminer l'ampleur de l'interventionnisme public sur le comportement du modèle en matière de choix d'investissements et notamment sur la capacité de production. Le dernier type de critères, concerne les contraintes d'*approvisionnement en biomasse* dues à la rivalité dans le secteur en cas d'expansion de l'industrie de bioraffinage. L'objectif recherché, pour ce dernier cas, est la robustesse du système par rapport aux contraintes majeures d'approvisionnement à travers l'analyse d'impact sur l'investissement et sur la soutenabilité. Le troisième critère comprend également les *règlementations* potentielles limitant les émissions causées par la production de l'éthanol. L'analyse de l'impact selon ce contexte permet d'étudier la consistance de cette voie face aux contraintes réglementaires.

### **3.2.2. Identification de la solution optimale**

#### **3.2.2.1. Frontière de Pareto**

Cette étape décrit la méthodologie de résolution du modèle. Tout d'abord, nous identifions la frontière de Pareto qui forme la zone où les compromis sont possibles entre les deux objectifs considérés dans l'évaluation de la soutenabilité. Ensuite, nous analysons les solutions les plus intéressantes selon les critères retenus à cet effet.

#### **3.2.2.2. Solution optimale pour chaque scénario**

Les transactions entre les solutions non dominées, à la frontière de Pareto, dépendent des critères adoptés et du poids relatif que les décideurs ou les experts du domaine considèrent pour chaque critère. Certains critères expriment un aspect local de la

soutenabilité, comme le capital investi, le taux de rentabilité interne ou le taux d'émissions, alors que d'autres critères peuvent exprimer les deux aspects de la soutenabilité. Le critère qui exprime mieux la soutenabilité de l'investissement dans la bioénergie est celui qui lie la performance économique de l'investissement à la charge environnementale générée par l'exploitation de ces investissements. Selon ce dernier critère, le ratio de la performance relative est proposé pour analyser la solution optimale relative à chaque scénario proposé.

### **3.2.3. Analyse de sensibilité et interprétations**

Lorsque la solution optimale est identifiée, le comportement du modèle est analysé en se référant à un ensemble d'indicateurs, et ce, pour l'ensemble des scénarios définis. L'interprétation du résultat est faite conformément aux objectifs prédéfinis de l'analyse. En effet, la solution optimale, identifiée pour chaque scénario de la section précédente, fera l'objet d'une comparaison avec le scénario de référence en considérant un ensemble élargi de critères comme énumérés ci-après :

- Le capital total investi ;
- Le capital et la capacité implémentée par voie de production ;
- Le pourcentage du flux de trésorerie généré par chaque produit ;
- La structure des intrants en biomasses pour la voie éthanol ;
- Le taux de rendement interne global et le taux d'émission ;
- Le taux d'intégration verticale des produits finis (électricité et biogaz) ;
- Le taux de recyclage des déchets.

En prenant en considération tous ces critères dans l'analyse de sensibilité, l'interprétation des résultats consiste à identifier les éléments de robustesse du modèle, les perspectives d'amélioration possibles et les recommandations à communiquer aux décideurs sur le comportement et les limites du modèle en question.

### **3.3. Analyse de sensibilité**

Conformément à la méthodologie présentée ci-dessus, l'analyse de sensibilité englobe quatre sous-sections. La première traite la motivation du choix des critères et des scénarios objet de l'analyse. La seconde décrit l'analyse multicritère adoptée pour l'identification de la

solution optimale relative à chaque scénario. Quant aux deux dernières sous-sections, elles décrivent l'analyse de sensibilité et les interprétations y afférentes.

### **3.3.1. Motivations du choix des scénarios**

Dans cette sous-section, nous décrivons respectivement, les critères inhérents au contexte actuel du marché de P&P, les tendances des incitations à la production bioénergétique dont le bioéthanol et l'électricité verte et enfin la tendance d'évolution de la demande en biogaz.

#### **3.3.1.1. Détérioration du marché de papiers et de pâtes commerciales**

L'industrie des pâtes et papiers a connu des crises et des changements majeurs qui ont eu des répercussions sur la structure du marché au niveau de l'offre et la demande au cours des dernières décennies. Les investissements énormes dans la capacité de production de pâtes et papiers en Asie et en Amérique du Sud et la diminution de l'exportation ont considérablement réduit la part de marché de l'industrie canadienne en pâte et papier (McCarthy and Lei, 2010). Karikallio et al. (2011) adoptent différentes approches pour mesurer le niveau de la concurrence sur le marché mondial des pâtes et papiers. Toutes les approches soutiennent les résultats de la littérature précédente sur l'aspect concurrentiel de l'industrie mondiale des pâtes et papiers. La part de marché des plus grandes entreprises mondiales de l'industrie des pâtes et papiers a considérablement diminué ces dernières années alors que la demande d'exportations de pâte et papier est élastique par rapport au prix, ce qui implique qu'une augmentation des exportations réduit considérablement sa valeur. La part de marché des entreprises Nord-Américaines a passé de 41% à 35% entre 2002 et 2006. En 2005-2010, près de 60% de l'investissement en pâte et plus de 70% de l'investissement en papier a été réalisé en Asie. Selon les statistiques de la FAO (The Food and Agriculture Organization of the United Nations), la quantité d'exportation de pâte de bois entre 1995 et 2014 a été réduite de 10% pour le cas canadien, alors que cette quantité a été augmentée, durant la même période, d'environ 455% et 518% pour le Brésil et l'Indonésie, respectivement. En ce qui concerne la quantité de pâte de bois produite entre la même période, elle a diminué de 32% pour le cas canadien, tandis que ce chiffre a augmenté pour

la même période à 185%, 245% et 294% respectivement pour le Brésil, l'Indonésie et la Chine.

Sur la base de ces références, une dégradation de la **demande** de pâte à papier (ou pâte commerciale) est proposée pour l'analyse de sensibilité selon trois scénarios : **-10%**, **-20%** et **-30%**. En ce qui concerne le **prix**, trois scénarios sont proposés : **-5%**, **-10%** et **-15%**. Il s'agit d'un prix estimé pour maintenir le niveau des exportations, compte tenu de l'élasticité des prix à l'exportation, comme indiqué ci-dessus.

### **3.3.1.2. Soutien et incitations gouvernementales à la production bioénergétique**

Le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux appuient la production de l'éthanol au moyen d'un certain nombre de programmes qui se chevauchent et qui subventionnent la production, l'investissement et l'infrastructure de distribution. Selon Laan et al. (2009), les mesures les plus importantes concernent :

- Le soutien du prix de marché pour améliorer la flexibilité de la mise en œuvre des mandats de mélange des biocarburants. Les règlements exigeaient une teneur de 5% en carburant renouvelable dans l'essence ;
- La taxe carbone exempte les biocarburants quel que soit leur profil d'émissions tout au long du cycle de vie, tandis que les combustibles fossiles sont taxés de 21,9% à 39,4% ;
- L'exonération de la taxe d'accise fédérale sur le carburant remplacée par les paiements aux producteurs et les subventions de fonctionnement, auxquels le produit importé ne peut y accéder. Les subventions fédérales sont de 10 ¢ par litre par rapport à l'année 2008 et elles seront ramenées à 0 jusqu'à l'année 2017. Les subventions provinciales se situent entre 9 ¢ et 20 ¢ par litre ;
- Le soutien important aux technologies de l'éthanol de deuxième génération sous la forme de partenariats entre le gouvernement et les institutions de recherche privées.

Selon l'ordre des subventions accordées à la production locale de bioéthanol, les subventions admissibles à la production d'éthanol lignocellulosique sont estimées entre 5 ¢

et 15 ¢ le litre. Deux scénarios sont proposés en conséquence pour l'analyse de sensibilité du **prix d'éthanol : + 10 ¢ et + 15 ¢ par litre.**

### **3.3.1.3. Stratégie canadienne pour la demande en biogaz**

D'ici 2020, le Canada aura un marché entièrement établi du Gaz Naturel Renouvelable (GNR) qui répondra aux besoins énergétiques des canadiens, soutiendra la croissance des entreprises et l'innovation et fournira une solution aux problèmes de déchets et d'émissions (CGA Canadian Gas Association, 2014). Selon une étude réalisée en 2010, la corporation *InnoTech Alberta* estime que la production potentielle de méthane provenant du potentiel des déchets canadiens s'élève à 1300 millions de pieds cube (Mpc) par année. Ce potentiel représente près de 50% de la consommation canadienne en gaz s'élevant à 2500 Mpc par an (Abboud et al., 2010). D'un point de vue régional, le plus grand potentiel de GNR se trouve en Colombie-Britannique, suivi de l'Ontario et du Québec principalement en raison de leurs importantes ressources en biomasse (CGA Canadian Gas Association, 2014). D'ici 2020, de nombreux secteurs consommateurs d'énergie seront contraints par les règlements fédéraux, sous l'égide d'*Environnement Canada*, pour réduire leurs émissions de GES, ce qui les incite à utiliser du GNR. En Europe, les mesures de la directive sur les biocarburants de la Commission Européenne, visant à améliorer la qualité de l'air local et à répondre au besoin en carburant propre pour le transport dans les zones urbaines, ont contribué à l'adoption du GNR (Nsca, 2006). Au Québec, le gouvernement provincial investit dans les installations municipales de digestion anaérobie et met progressivement en place des réglementations en faveur de l'interdiction de déverser des matières organiques biodégradables dans les sites d'enfouissement. En outre, le gouvernement du Québec a annoncé, en juin 2017 un règlement sur la teneur de 5% en gaz naturel renouvelable qu'il faut injecter par les distributeurs dans le réseau de distribution. D'après la publication de l'AQPER du mois de décembre 2017, les recommandations de l'Association Québécoise de la Production d'Énergie Renouvelable, dans le cadre de la consultation publique sur l'élaboration du plan directeur 2018-2023 en transition, innovation et efficacité énergétiques, soutiennent le règlement qui établit à 5% la teneur en gaz naturel renouvelable lors de la distribution. Étant donné que le GNR peut être utilisé tout comme le gaz naturel et puisque le GNR peut être injecté n'importe où dans le réseau de gaz naturel et transporté vers les

stations de ravitaillement, il est évident que la demande potentielle dans le marché GNR augmentera. Le potentiel pour la production de biogaz est énorme selon les perspectives déjà décrites. Ainsi, une **augmentation de la demande de 50%** a été proposée pour l'analyse de sensibilité.

#### **3.3.1.4. Incitation à la production et à la vente d'électricité verte**

Au Canada, 11% des émissions de GES sont attribuables à la production d'électricité, tandis que les prix de l'électricité dans le pays sont parmi les plus bas au monde (Office National de l'Énergie, 2016).

Les politiques de soutien visent à encourager les projets d'énergies renouvelables, souvent par le biais de contrats à long terme ou d'accords d'achat d'électricité, tels que les '*contrats à long terme normalisés*' et les paiements anticipés par voie administrative. Les '*contrats pour différence*' sont une autre forme de contrat pour lequel les acheteurs et les vendeurs s'entendent sur un prix, mais les producteurs vendent leur électricité sur un marché où la concurrence joue librement. '*Le comptage net*' est un autre mécanisme qui permet aux utilisateurs finaux de produire leur propre électricité et de vendre leur surplus de production sur le réseau ou de l'utiliser pour réduire le coût de l'électricité consommée par ce réseau.

Les politiques de réduction des coûts comprennent les allègements fiscaux et les garanties de prêt du gouvernement, qui réduisent les risques pour les prêteurs et réduisent les coûts de financement des projets. Les politiques sur les prix de l'électricité peuvent également rendre les énergies renouvelables plus compétitives. Se référant à un contrat d'approvisionnement en électricité entre *Biomont Énergie Inc.*, propriétaire d'une centrale de cogénération basée sur la biomasse forestière résiduelle de 50 MW, et 'Hydro-Québec distribution' conclu le 20 décembre 2011, le prix convenu en 2012 s'élevait à 106,00 \$/MWh. Ce prix sera mis à jour selon la formule,  $E_t = 106.00\$ \left[ \frac{CPI_{MES_t}}{CPI_{2011}} \right]$ , où  $CPI_{MES_t}$  est la valeur moyenne de l'indice des prix à la consommation pour l'année  $t$ .

Sur les 20 dernières années, le *CPI* a augmenté de 38%, de sorte que le prix augmentera en moyenne de 19% sur 20 ans, soit 2 ¢/KW (Statistique Canada, 2017). En conséquence, les scénarios proposés pour l'analyse de sensibilité portent sur une

**augmentation de prix de l'électricité de 1 ¢ et 2 ¢ par KW** ; sachant que le prix utilisé dans le modèle est le même que celui facturé à Hydro-Québec lors de l'achat de l'électricité auprès des fournisseurs (0,106 \$/KW)<sup>4</sup>

### 3.3.1.5. Autres critères considérés pour le choix des scénarios

Les autres critères, proposés pour l'analyse de sensibilité, concernent les contraintes d'approvisionnement par suite de l'émergence de l'utilisation de la biomasse pour l'industrie bioénergétique. Une estimation de **30% à 50% de dégradation de l'offre de biomasse** (résidus industriels et résidus municipaux) est proposée pour l'analyse de sensibilité comme cas extrême. En outre, une **réduction de 5% des émissions** générées par l'éthanol est proposée comme scénario afin d'analyser le comportement du système vis-à-vis de cette contrainte environnementale.

Enfin, deux scénarios combinés ont été proposés pour *stresser* au maximum les conditions d'approvisionnement de l'unité de cogénération. Le premier scénario concerne la détérioration du prix et de la demande de pâte de papier de -15% et -30% respectivement alors que le deuxième ait trait à la dégradation de 50% de l'offre en résidus municipaux avec une dégradation de 30% de la demande de pâte commerciale. Le tableau 3.1 résume les critères, paramètres et scénarios sélectionnés en fonction des motivations détaillées ci-dessus.

**Tableau 3.1:** Conception des scénarios

Critères	Motivations	Paramètres	Scénarios		
Détérioration du prix du marché de PC	Rapport de perspectives	Prix de la PC	-5% (SC1)	-10% (SC2)	-15% (SC3)
Détérioration de la demande en PC	Rapport de perspectives	Demande en PC	-10% (SC4)	-20% (SC5)	-30% (SC6)
Détérioration de l'offre en biomasses (RI et RM)	Compétitivité	Offre de biomasses RI & RM	-30% IR (SC7)	-50% IR (SC8)	-50% MR (SC9)
Augmentation du prix de l'éthanol (par L)	Incitations économiques	Prix de l'éthanol	+5¢ (SC10)	+10¢ (SC11)	
Augmentation du prix de l'électricité (par KWh)	Données de cas réels	Prix de l'électricité	+1¢ (SC12)	+2¢ (SC13)	
Augmentation de la demande en biogaz	Rapport de perspectives	Demande en biogaz	+50% (SC14)		
Détérioration de la demande et du prix de PC	Rapport de perspectives	Prix et demande de PC	-15% Prix, -30% dde (SC15)		
Détérioration de la demande en PC et de l'offre en biomasses RM	Hypothèse	Demande en PC et offre de MR	-30%PC - 50%RM (SC16)		
Restriction des émissions générées par la production de l'éthanol	Hypothèse	Émission de GES	-5% (SC17)		

RI : Résidus Industriels ; RM : Résidus Municipaux ; PC : Pâte Commerciale

<sup>4</sup> (<http://www.hydroquebec.com/data/achats-electricite-quebec/pdf/contrats/biomont-energie-2014-02-25.pdf>).

### 3.3.2. Identification des solutions optimales

Conformément à la méthodologie présentée ci-dessus, le modèle mathématique multi-objectif est appliqué pour chaque scénario. Une analyse des résultats, selon un ensemble de critères, a été réalisée afin de déterminer la solution optimale pour les différents scénarios. Nous associons, pour la pertinence de l'analyse transactionnelle, un outil de statistique descriptive exprimant la distribution par rapport à la moyenne des indicateurs retenus pour l'analyse multicritère, et ce, pour toutes les solutions de la frontière de Pareto. Cet outil est l'écart-type exprimant, à titre indicatif, l'opportunité de transaction entre les solutions à la frontière de Pareto.

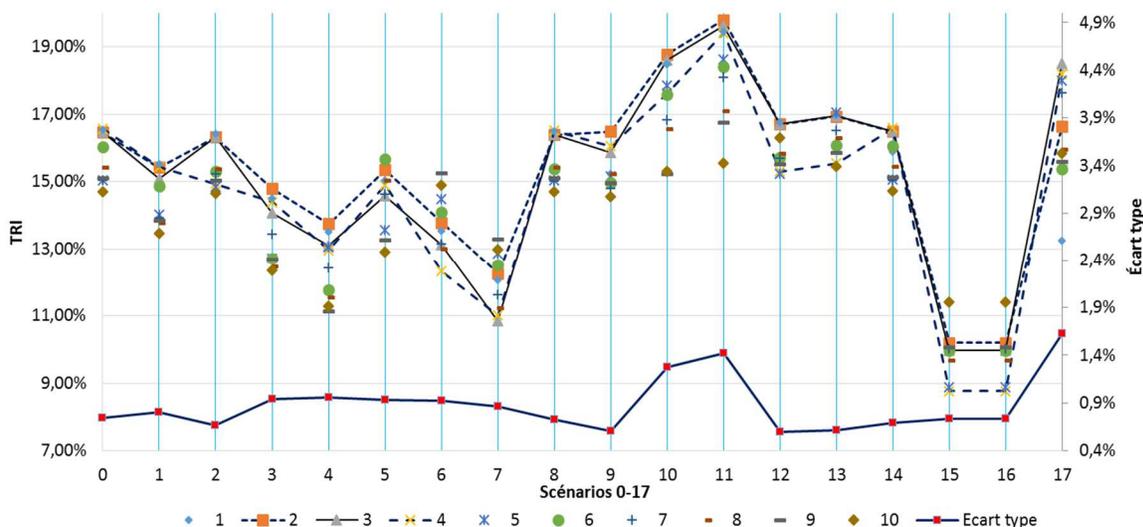
Nous limitons nos analyses aux dix premières solutions de la frontière de Pareto où le compromis est plus significatif en raison des mêmes motivations relatées au chapitre deux.

#### 3.3.2.1. Solutions basées sur la performance de l'investissement

La performance de l'investissement est généralement mesurée par le taux de rentabilité interne (TRI). Les solutions prometteuses, selon ce critère, sont celles qui ont la valeur la plus élevée. La transaction est favorable entre les solutions les moins dispersées reflétant la moindre perte de performance par rapport aux gains d'émission. Comme illustré par la figure 3.2, on constate que les solutions deux et trois sont les plus favorables pour faire la solution optimale pour l'ensemble des scénarios.

**Tableau 3.2 :** TRI de tous les scénarios pour les dix premières solutions de Pareto

TRI	Solutions de la frontière de Pareto										Moyenne
	Scénarios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
SC0	16,53%	16,46%	16,47%	16,57%	15,04%	16,03%	15,02%	15,43%	15,11%	14,70%	15,74%
SC1	15,52%	15,42%	15,07%	15,43%	14,02%	14,86%	13,92%	13,77%	13,85%	13,46%	14,53%
SC2	16,43%	16,31%	16,33%	14,93%	14,83%	15,29%	15,24%	15,38%	15,05%	14,64%	15,44%
SC3	14,51%	14,79%	14,06%	14,38%	12,70%	12,71%	13,43%	12,47%	12,69%	12,33%	13,41%
SC4	13,50%	13,75%	13,09%	12,96%	13,05%	11,77%	12,41%	11,54%	11,14%	11,28%	12,45%
SC5	15,03%	15,35%	14,57%	14,90%	13,55%	15,67%	14,63%	15,03%	13,28%	12,90%	14,49%
SC6	13,55%	13,79%	13,11%	12,32%	14,48%	14,10%	13,14%	12,99%	15,25%	14,89%	13,76%
SC7	12,06%	12,26%	10,85%	11,01%	12,86%	12,51%	11,62%	11,24%	13,30%	12,96%	12,07%
SC8	16,49%	16,39%	16,40%	16,51%	15,03%	15,38%	15,01%	15,42%	15,10%	14,69%	15,64%
SC9	15,24%	16,48%	15,87%	16,05%	15,16%	14,95%	14,80%	15,24%	14,97%	14,55%	15,33%
SC10	18,48%	18,78%	18,60%	17,63%	17,84%	17,59%	16,84%	16,56%	15,23%	15,31%	17,28%
SC11	19,46%	19,80%	19,62%	19,41%	18,63%	18,40%	18,10%	17,09%	16,76%	15,55%	18,28%
SC12	16,76%	16,70%	16,71%	15,30%	15,22%	15,71%	15,69%	15,85%	15,52%	16,31%	15,98%
SC13	16,98%	16,93%	16,95%	15,54%	17,05%	16,07%	16,52%	16,29%	15,85%	15,46%	16,36%
SC14	15,89%	16,49%	16,49%	16,59%	15,06%	16,05%	15,05%	15,46%	15,14%	14,72%	15,69%
SC15	9,99%	10,19%	9,97%	8,77%	8,87%	9,96%	10,03%	9,69%	10,07%	11,41%	9,89%
SC16	9,99%	10,19%	9,97%	8,77%	8,87%	9,96%	10,03%	9,69%	10,07%	11,41%	9,89%
SC17	13,24%	16,64%	18,51%	18,18%	17,98%	15,38%	17,62%	15,95%	15,60%	15,84%	16,50%



**Figure 3.2 :** Le TRI des dix premières solutions de la frontière de Pareto pour chaque scénario

La figure et le tableau 3.3 illustrent le comportement du modèle en matière du capital investi pour tous les scénarios, au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto. On constate, en se référant à la moyenne des capitaux investis au titre de tous les scénarios, que l'optimum économique (solution 1) est préféré selon le critère du capital horizon investi. Toutefois, il est à signaler que le capital investi pour la solution trois du SC6 et celui investi à la solution quatre du SC15 dépassent ceux investis à l'optimum.

**Tableau 3.3 :** Capital total investi pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto concernant tous les scénarios

Investissement horizon en Millions de \$	Solutions de la frontière de Pareto									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Scénarios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SC0	417	390	372	363	345	327	309	290	290	290
SC1 Prix PP -5%	417	390	381	363	345	327	318	299	290	290
SC2 Prix PP -10%	417	399	381	363	354	345	327	309	290	290
SC3 Prix PP -15%	417	399	381	372	363	345	327	318	309	290
SC4 dde PP -10%	417	399	381	363	345	329	311	293	290	290
SC5 dde PP -20%	417	399	381	403	327	329	320	302	255	255
SC6 dde PP -30%	417	399	421	403	327	329	320	311	255	255
SC7 offre IR -30%	417	390	372	363	345	318	309	290	290	290
SC8 offre IR -50%	417	399	381	363	345	318	309	290	290	290
SC9 offre MR -50%	337	310	312	303	285	267	249	230	230	210
SC10 prix Eth + 10c	417	399	399	372	363	363	327	327	299	290
SC11 prix Eth + 15c	417	399	399	399	363	363	363	327	327	290
SC12 prix Elect + 1c	417	390	372	354	336	318	299	290	290	270
SC13 prix Elect + 2c	417	390	372	354	327	309	290	290	290	290
SC14 dde biogaz +50%	437	390	372	363	345	327	309	290	290	290
SC15 dde PP -30% Prix PP -15%	417	399	399	421	403	336	327	329	310	272
SC16 offre RM -50% dde P&P -30%	317	242	228	228	228	210	192	182	173	164
SC17 GHG ETH -5%	417	390	372	354	336	318	299	290	290	290

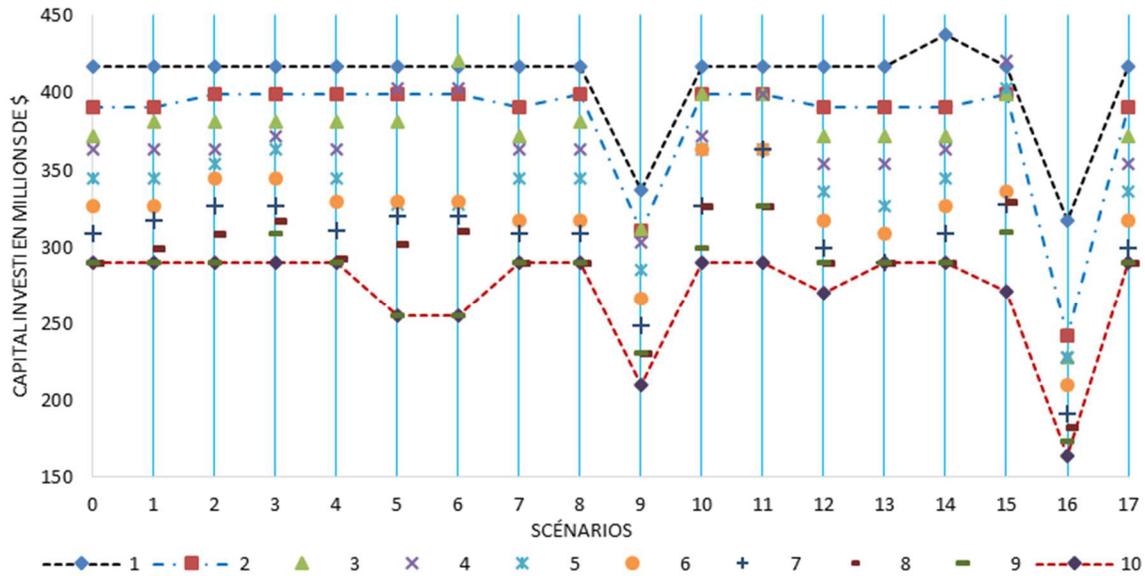


Figure 3.3 : Le capital investi pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto pour tous les scénarios

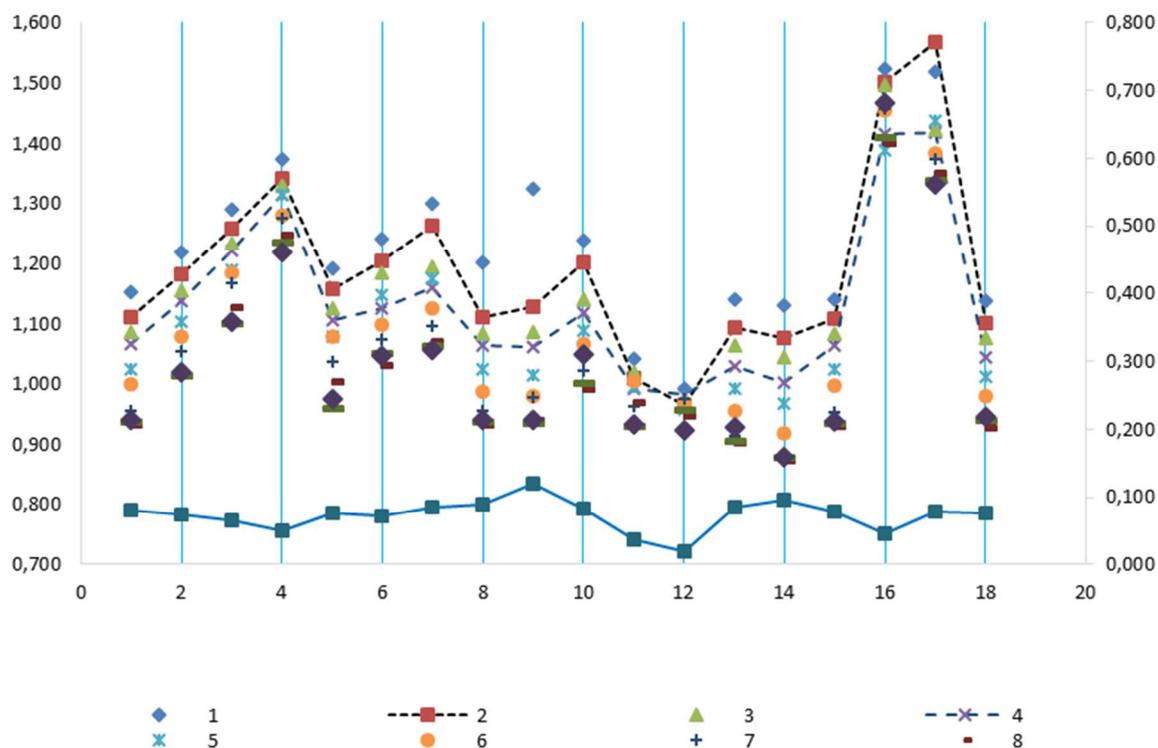
### 3.3.2.2. Solutions basées sur le taux global d'émission

Pour analyser les solutions en fonction du critère d'émission, nous utilisons l'indicateur taux d'émission (TE) qui exprime le rapport de l'émission totale par 1000\$ de Cash-flow. Les solutions prometteuses, selon ce critère, sont celles qui ont la plus petite valeur. Ce critère est couplé avec l'écart-type qui exprime les possibilités de transaction entre les objectifs économiques et environnementaux. Un écart-type, relativement important, exprime d'importantes opportunités de transactions selon cet indicateur d'émission. On constate à ce propos, que l'optimum environnemental est la solution optimale pour la plupart des scénarios. Comme illustré par la figure 3.4, le taux d'émission est remarquablement élevé pour les premières solutions ce qui permet l'éligibilité aux transactions avec l'aspect économique. Toutefois, on constate que les scénarios 3, 15 et 16 présentent un taux d'émission important relativement aux autres scénarios, et ce, à cause du contexte représenté par ces trois scénarios. Ainsi, les scénarios 3 (Diminution du prix de pâtes de 15%), 15 (Diminution du prix de pâtes de 15% et diminution de la demande de 30%) et 16 (Diminution de l'offre de résidus municipaux de 50% et diminution de la demande de 30%) sont les plus défavorables pour l'émission. Il s'agit des scénarios liés aux difficultés du marché de l'activité incubatrice et à la difficulté de l'offre des résidus municipaux. En revanche, les solutions relatives aux

scénarios 10 et 11 sont les plus favorables à une diminution de l'émission (augmentation du prix de l'éthanol de 10¢ et 15¢). Cette constatation prouve l'impact positif sur l'émission des incitations de marché réservées à la production bioénergétique.

**Tableau 3.4 :** Taux d'émission (TE) pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto concernant tous les scénarios

Taux d'émission en TCO <sub>2</sub> éq. (pour 1000\$ CF)	Solutions de la frontière de Pareto									
	Scénarios	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SC0	1,153	1,110	1,085	1,066	1,025	0,999	0,955	0,933	0,937	0,940
SC1 Prix PP -5%	1,218	1,181	1,156	1,137	1,102	1,079	1,053	1,015	1,015	1,020
SC2 Prix PP -10%	1,290	1,258	1,234	1,221	1,190	1,183	1,166	1,126	1,101	1,104
SC3 Prix PP -15%	1,372	1,341	1,330	1,313	1,315	1,280	1,276	1,249	1,237	1,218
SC4 dde PP -10%	1,191	1,156	1,126	1,105	1,078	1,078	1,035	1,004	0,959	0,976
SC5 dde PP -20%	1,240	1,203	1,184	1,125	1,147	1,099	1,073	1,032	1,052	1,046
SC6 dde PP -30%	1,300	1,262	1,193	1,158	1,174	1,124	1,096	1,072	1,063	1,056
SC7 offre IR -30%	1,200	1,109	1,084	1,064	1,025	0,987	0,955	0,934	0,938	0,941
SC8 offre IR -50%	1,324	1,128	1,085	1,062	1,015	0,981	0,977	0,940	0,937	0,942
SC9 offre MR -50%	1,238	1,200	1,139	1,117	1,088	1,066	1,021	0,993	1,002	1,050
SC10 prix Eth + 10c	1,041	1,009	1,019	0,992	0,994	1,003	0,962	0,971	0,930	0,933
SC11 prix Eth + 15c	0,993	0,965	0,972	0,982	0,957	0,968	0,976	0,948	0,957	0,923
SC12 prix Elect + 1c	1,141	1,093	1,063	1,030	0,993	0,956	0,913	0,903	0,906	0,929
SC13 prix Elect + 2c	1,129	1,076	1,045	1,003	0,967	0,918	0,871	0,875	0,878	0,878
SC14 dde biogaz +50%	1,140	1,108	1,083	1,063	1,023	0,997	0,953	0,932	0,936	0,938
SC15 dde PP -30% Prix PP -15%	1,524	1,502	1,496	1,416	1,389	1,456	1,456	1,402	1,411	1,466
SC16 offre RM -50% dde P&P -30%	1,520	1,569	1,423	1,417	1,438	1,382	1,375	1,352	1,339	1,331
SC17 GHG ETH -5%	1,137	1,101	1,076	1,043	1,012	0,979	0,939	0,927	0,942	0,944



**Figure 3.4 :** Taux d'émission pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto pour tous les scénarios

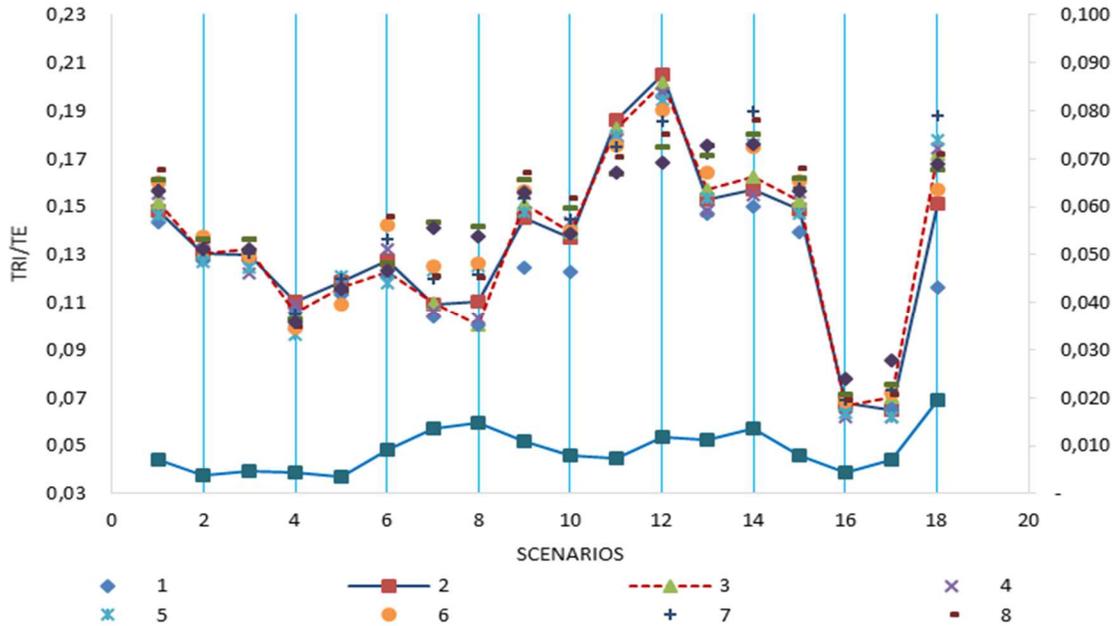
Les solutions déterminées selon ce critère sont en contradiction avec celles déterminées en fonction du critère de la performance économique. Il est donc judicieux d'opter pour un indicateur qui prend en compte à la fois les aspects économiques et environnementaux. D'où l'importance d'adopter l'indicateur composite (ratio de la performance relative), objet de la sous-section suivante.

### 3.3.2.3. Solutions basées sur le ratio de la performance relative

L'analyse, selon chaque indicateur pris indépendamment, peut masquer l'importance relative des différents aspects au niveau des solutions de la frontière de Pareto. Le ratio de la performance relative permet d'analyser les transactions entre les différentes solutions de la frontière de Pareto, en tenant compte de la performance économique de l'investissement et en même temps de leur impact sur l'émission. L'ordre de préférence selon cet indicateur est différent de celui des éléments qui le composent. En effet, ce ratio est plus favorable à la soutenabilité si le numérateur (performance économique) est grand et le dénominateur est petit (émission). Nous utilisons ce ratio pour identifier les solutions prometteuses au niveau de chaque scénario. Comme le montre la figure et le tableau 3.5, les solutions trois et cinq sont les meilleures pour la plupart des scénarios, notamment pour les solutions 1 à 5 ou l'éthanol est bien considéré.

**Tableau 3.5 :** Ratio de la performance relative (TRI/TE) pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto concernant tous les scénarios

Scénarios	Solutions de la frontière de Pareto										Ecart-type
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SC0	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,007
SC1 Prix PP -5%	0,13	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	0,004
SC2 Prix PP -10%	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,005
SC3 Prix PP -15%	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,004
SC4 dde PP -10%	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,003
SC5 dde PP -20%	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,14	0,14	0,15	0,13	0,12	0,009
SC6 dde PP -30%	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	0,12	0,12	0,14	0,14	0,014
SC7 offre IR -30%	0,10	0,11	0,10	0,10	0,13	0,13	0,12	0,12	0,14	0,14	0,015
SC8 offre IR -50%	0,12	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,011
SC9 offre MR -50%	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,008
SC10 prix Eth + 10c	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,16	0,16	0,007
SC11 prix Eth + 15c	0,20	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,012
SC12 prix Elect + 1c	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18	0,17	0,18	0,011
SC13 prix Elect + 2c	0,15	0,16	0,16	0,15	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18	0,014
SC14 dde biogaz +50%	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,008
SC15 dde PP -30% Prix PP -15%	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,004
SC16 offre RM -50% dde P&P -30%	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,007
SC17 GHG ETH -5%	0,12	0,15	0,17	0,17	0,18	0,16	0,19	0,17	0,17	0,17	0,020
Moyenne	0,125	0,133	0,135	0,134	0,135	0,138	0,141	0,142	0,141	0,139	



**Figure 3.5 :** Le ratio TIR/TE pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto pour tous les scénarios

Concernant l'écart type, dans le cas du ratio de la performance relative, il indique la dispersion par rapport à la moyenne des dix solutions pour chaque scénario. Ainsi, les solutions les plus dispersées sont celles les plus favorables ou les plus défavorables aux transactions selon l'indicateur et la position de la solution source. En effet, si on considère la performance relative, l'écart important signifie une perte ou un gain important, selon la position de la solution source, pour un scénario bien déterminé. Si la performance relative de la solution source est faible par rapport à la solution de destination, l'écart type fort signifie, généralement une éligibilité à la transaction.

Pour statuer sur la solution qui fera l'objet de l'analyse de sensibilité nous avons considéré d'autres critères dont le capital investi, l'intégration verticale des produits finis et le taux de recyclage des déchets en plus des indicateurs de performance déjà étudiés. Le tableau 3.6 décrit le classement des différents indicateurs pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto ou la solution trois est considérée comme cible pour l'analyse de sensibilité.

**Tableau 3.6** : Classement des différentes solutions selon les indicateurs retenus

Solutions	Intégration interne Electricité	Rang	Intégration interne Biogaz	Rang	Taux de recyclage déchet	Rang	Taux de rentabilité interne	Rang	Taux d'émission	Rang	Capital investi	Rang	Total rangs
1	72.6%	1	3.4%	9	10.5%	10	14.98%	3	1.231	10	409	1	34
2	67.7%	2	3.3%	10	19.2%	9	15.37%	1	1.187	9	382	2	33
3	65.8%	3	4.1%	5	21.2%	8	15.15%	2	1.155	8	371	3	29
4	64.0%	4	4.0%	6	23.8%	6	14.73%	4	1.129	7	361	4	31
5	61.0%	5	3.4%	8	21.3%	7	14.46%	6	1.107	6	338	5	37
6	58.7%	6	3.5%	7	24.2%	5	14.58%	5	1.085	5	321	6	34
7	55.0%	7	4.2%	4	26.1%	4	14.39%	7	1.058	4	306	7	33
8	51.4%	8	5.2%	3	37.3%	1	14.17%	8	1.034	2	292	8	30
9	50.2%	9	8.9%	2	37.2%	2	14.11%	9	1.030	1	281	9	32
10	4.5%	10	10.2%	1	33.6%	3	14.02%	10	1.035	3	273	10	37

Le résultat détaillé pour le choix de la solution optimale est présenté dans le tableau 3.6 pour tous les scénarios. On a choisi le même niveau de solution pour tous les scénarios (solution 3) afin de disposer d'agrégats comparables notamment pour le capital investi, la capacité de production ou le cash-flow. Ces solutions font l'objet de l'analyse de sensibilité au niveau de la section suivante.

### 3.3.3. Résultats et discussion de l'analyse de sensibilité

Pour analyser la sensibilité du modèle, notre démarche consiste à étudier l'impact de l'ensemble des scénarios sur la planification soutenable des investissements à travers les conséquences sur les critères et indicateurs de performance y afférents.

#### 3.3.3.1. Impact des différents scénarios sur la planification de l'investissement

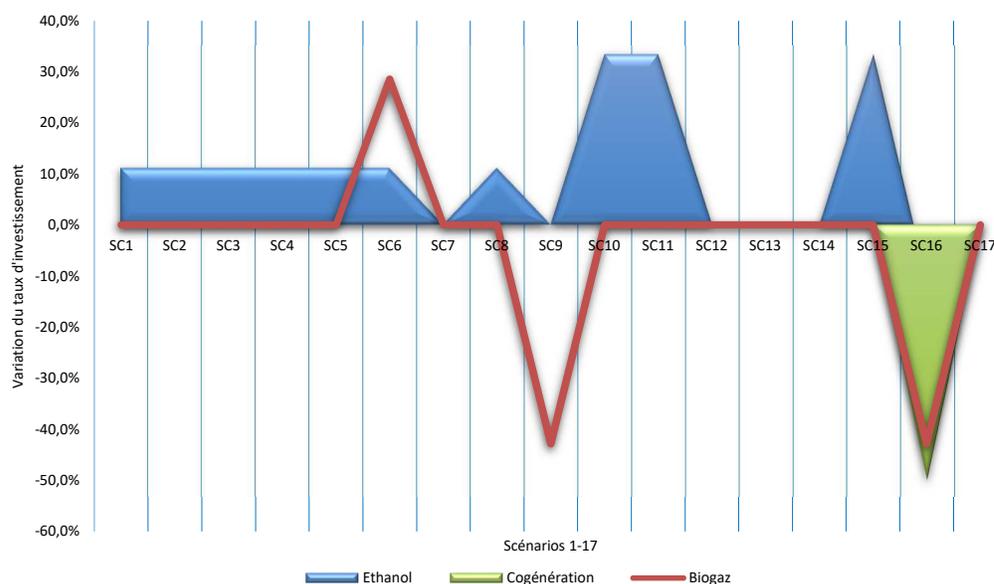
Le système étudié présente une sensibilité plus ou moins importante vis-à-vis des scénarios étudiés à propos de l'impact sur l'investissement. Comme illustré par la figure 3.6, la dégradation du marché des P&P, au niveau des scénarios SC1 à SC6, fait augmenter de 11% l'investissement dans la fermentation de l'éthanol. Le scénario 8 produit le même effet à la suite de la détérioration de l'offre de résidus industriels. Toutefois, la détérioration extrême du marché de P&P au niveau de la demande selon le SC6 fait augmenter l'investissement pour la conversion des résidus municipaux en biogaz par la digestion anaérobie. En outre, la dégradation de l'offre de ce dernier intrant fait baisser l'investissement en biogaz de 43% selon le scénario 9.

L'amélioration du prix de l'éthanol, selon les scénarios 10 et 11, permet une augmentation de l'investissement de 33.3% dans la fermentation. Le même comportement

est observé au scénario 15 lors de la dégradation du marché de P&P. Quant au scénario 16, on a combiné les scénarios 3 et 6 afin de déceler la perturbation conséquente sur l’approvisionnement de la cogénération. L’impact sur la planification de l’investissement, pour ce dernier scénario, a été la diminution du capital investi de 50% pour la cogénération et de 43% pour la production du biogaz.

**Tableau 3.7 :** Capacité d’investissement par technologie et par cycle d’implémentation et évolution du capital investi par rapport au scénario de référence pour tous les scénarios

Scénarios	Variation du capital investi par technologie durant l'horizon de planification (en Millions de \$)				Capacité de production par technologie et par cycle d'implémentation														
	Total	Fermentation	Digestion	Cogénération	Cogénération				Total	Digestion				Total	Fermentation				
					1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
SC0	372	82	140	150	40				40		80		40	120	60			30	90
SC1 Prix PP -5%	9.075	9.075	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	30	0	90
SC2 Prix PP -10%	9.075	9.075	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	30	0	90
SC3 Prix PP -15%	9.075	9.075	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	30	0	0	90
SC4 dde PP -10%	9.075	9.075	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	30	0	90
SC5 dde PP -20%	9.075	9.075	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	30	0	90
SC6 dde PP -30%	49.075	9.075	40	0	20	0	40	0	60	80	0	0	40	120	30	0	90	0	120
SC7 offre IR -30%	0	0	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	0	30	90
SC8 offre IR -50%	9.075	9.075	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	30	0	90
SC9 offre MR -50%	-60	0	-60	0	40	0	0	0	40	40	0	0	0	40	0	90	0	0	90
SC10 prix Eth + 10c	27.225	27.225	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	90	0	0	0	90
SC11 prix Eth + 15c	27.225	27.225	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	90	0	0	0	90
SC12 prix Elect + 1c	0	0	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	0	30	90
SC13 prix Elect + 2c	0	0	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	0	30	90
SC14 dde biogaz +50%	0	0	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	0	30	90
SC15 dde PP -30% Prix PP -15%	27.225	27.225	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	90	0	0	0	90
SC16 offre RM -50% dde P&P -30%	-144.275	-9.075	-60	-75.2	20	0	0	0	20	40	0	0	0	40	60	0	0	0	60
SC17 GHG ETH -5%	0	0	0	0	40	0	0	0	40	0	80	0	40	120	60	0	0	30	90



**Figure 3.6 :** Variation du capital investi pour l’ensemble des scénarios

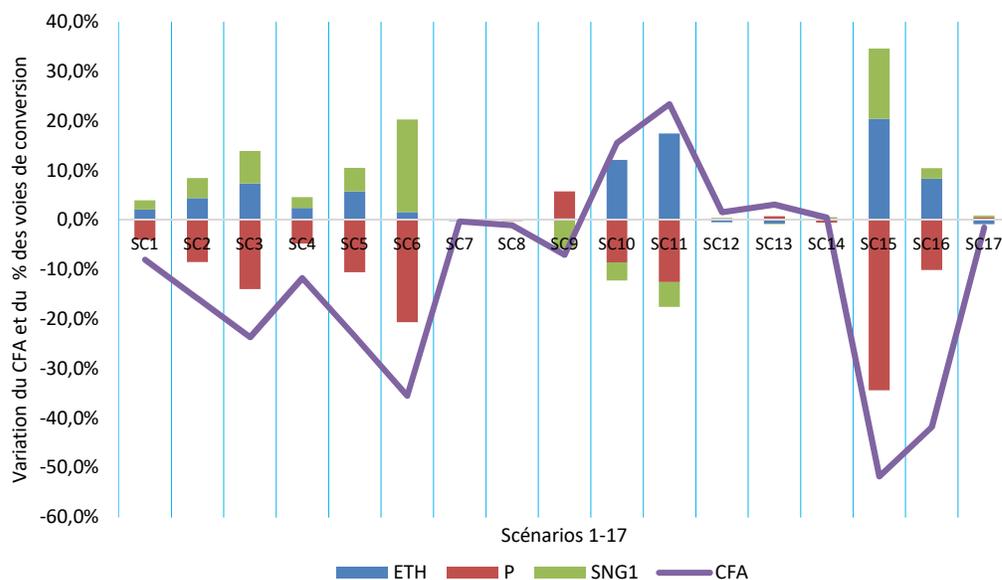
### 3.3.3.2. Impact sur la structure du Cash-Flow Actualisé (CFA)

L'évolution du CFA et de sa structure en termes des différents produits réalisés sont illustrées par la figure 3.7. Cette dernière met en évidence la corrélation entre les perturbations des investissements et celles correspondantes au CFA. La situation de dégradation du marché de P&P, pour les six premiers scénarios, influence négativement le CFA selon des pourcentages allant de -8% à -35%. La proportion de la production de PP se dégrade ainsi de 4% à 20%.

Les scénarios 15 et 16, présentant les cas extrêmes de dégradation du marché en amont et en aval, se traduisent par une chute du CFA de 52% et 42% respectivement. En revanche, l'amélioration de la situation du marché, au niveau du prix de l'éthanol pour les scénarios 10 et 11, conforte le CFA par une évolution positive de 16% et 23%. Cependant le CFA n'a pas été suffisamment sensible à l'amélioration du prix de marché de l'électricité selon les scénarios 12 et 13 et à l'augmentation de la demande en biogaz selon le scénario 14.

**Tableau 3.8 :** Évolution de la structure du CFA par produit et de la structure d'approvisionnement en biomasse pour l'éthanol pour tous les scénarios

	Structure du CFA			Approvisionnement de l'éthanol en biomasses		
	Éthanol	Pâte	Biogaz	Résidus agricoles	Résidus forestiers	Résidus industriels
SC0	19,4%	54,2%	26,4%	0	39,4%	60,6%
SC1	2,1%	-4,0%	1,9%	0	45,3%	-45,3%
SC2	4,4%	-8,5%	4,1%	0	36,0%	-36,0%
SC3	7,4%	-13,9%	6,5%	0	-9,6%	9,6%
SC4	2,5%	-4,7%	2,1%	0	45,5%	-45,5%
SC5	5,7%	-10,5%	4,8%	0	2,8%	-2,8%
SC6	1,6%	-20,6%	18,7%	0	-9,9%	9,9%
SC7	-0,2%	0,1%	0,1%	0	8,2%	-8,2%
SC8	-0,1%	0,0%	0,1%	0	60,1%	-60,1%
SC9	0,3%	5,5%	-5,8%	0	-1,8%	1,8%
SC10	12,1%	-8,6%	-3,6%	0	60,6%	-60,6%
SC11	17,5%	-12,5%	-5,0%	0	60,6%	-60,6%
SC12	-0,5%	0,3%	0,1%	0	31,1%	-31,1%
SC13	-0,7%	0,7%	-0,1%	0	43,9%	-43,9%
SC14	-0,2%	-0,4%	0,5%	0	0,9%	-0,9%
SC15	20,4%	-34,4%	14,1%	0	37,3%	-37,3%
SC16	8,4%	-10,1%	2,1%	0	-39,3%	39,3%
SC17	-0,9%	0,6%	0,3%	0	43,7%	-43,7%



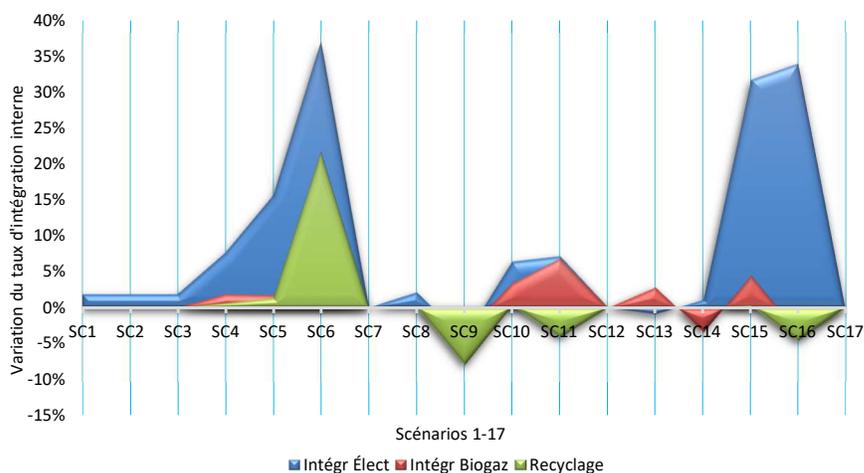
**Figure 3.7 :** Variation du CFA et de la proportion des différents produits pour tous les scénarios

### 3.3.3.3. Impact sur l'intégration interne et le recyclage

L'intégration verticale ou horizontale, l'indépendance énergétique et le recyclage total de la biomasse et des déchets qui en dérivent sont des attributs intrinsèques des bioraffineries soutenables. La conception initiale du système évalué prévoit l'autosuffisance en énergie (électricité et chaleur), la livraison à soit même du biogaz pour l'alimentation de l'unité de cogénération ainsi que le recyclage des effluents industriels contenant de la matière organique, générés par l'activité de P&P. Les résultats montrent que certains scénarios impactent le taux d'intégration des produits finis concernés ainsi que le taux de recyclage comme illustré par la figure 3.8.

- Pour les scénarios 6 et 15, représentant les cas extrêmes de la dégradation de l'activité de P&P, et le scénario 16 combinant le scénario 6 et la dégradation de l'offre des résidus municipaux destinés à la production du biogaz, le taux d'intégration de l'électricité atteint son maximum avec une évolution de 37%, 32% et 33%. Pour les autres scénarios le taux d'intégration varie entre 2 et 15%. Toutefois le taux d'intégration du biogaz n'a pas dépassé 7% au titre du scénario 11 ;
- Pour le recyclage, une amélioration de 22% a été constatée au niveau du scénario 6 lors de la dégradation extrême du marché de P&P. Cependant, la dégradation de

l'offre des résidus municipaux selon les scénarios 9 et 16 ont dégradé la valorisation des boues papetières de 8% et 5%.

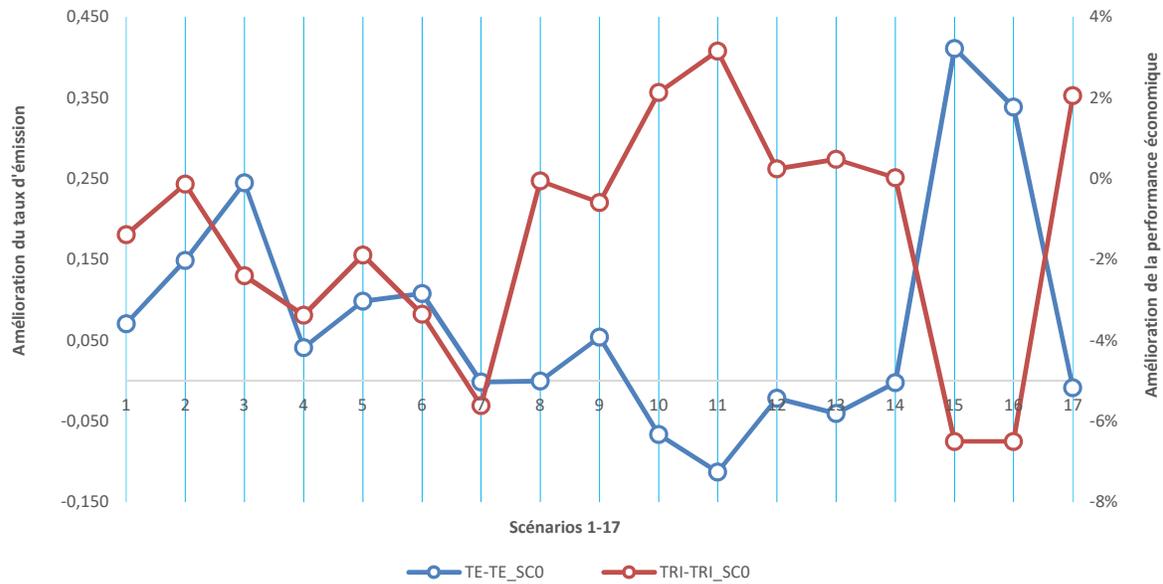


**Figure 3.8 :** Variation du taux d'intégration interne et du taux de recyclage pour tous les scénarios

### 3.3.3.4. Impacts sur les indicateurs de performance

Les scénarios 10, 11 et 17 ont impacté positivement la performance économique. Les deux premiers scénarios concernent l'augmentation du prix de l'éthanol ou l'amélioration du TRI a été maximale, à savoir 2.13% et 3.15%. Pour le scénario 17, imposant une diminution de 5% des émissions générées par la production de l'éthanol, la performance économique est améliorée de 2% à la hausse. Cependant, la dégradation de la performance économique a marqué les sept premiers scénarios, correspondant aux difficultés du marché de P&P, selon des taux variant entre 1% et 5.6%. La dégradation extrême de la performance économique est enregistrée au niveau des scénarios 15 et 16 selon un taux de 6.5% pour chaque scénario.

Concernant la performance environnementale, l'amélioration positive du taux d'émission a été enregistrée au niveau des scénarios 10 à 14 enregistrant une diminution respective de 67, 113, 22, 41 et 2 kg CO<sub>2</sub> éq. par 1000\$ de CF. Dans la plupart des autres scénarios l'amélioration a été négative notamment pour les scénarios 15 et 16 enregistrant une augmentation extrême des émissions de 411 et 338 kg CO<sub>2</sub> éq. par 1000 \$ de CF. la figure 3.9 décrit toutes les variations des indicateurs de performance par rapport au scénario de référence.



**Figure 3.9 :** Variation du TRI et du TE pour tous les scénarios

**Tableau 3.9 :** Évolution des indicateurs de performance, du taux d'intégration interne et du taux de recyclage pour tous les scénarios

SOLUTION 3	TE-TE_SCO	TRI-TRI_SCO	Intégration Électricité	Intégration Biogaz	Recyclage des déchets
SC1 Prix PP -5%	0,071	-1,39%	1,89%	0,00%	0,00%
SC2 Prix PP -10%	0,149	-0,14%	1,89%	0,00%	0,00%
SC3 Prix PP -15%	0,245	-2,40%	1,89%	0,00%	0,00%
SC4 dde PP -10%	0,041	-3,38%	7,65%	1,90%	0,64%
SC5 dde PP -20%	0,098	-1,89%	15,60%	1,77%	1,36%
SC6 dde PP -30%	0,108	-3,35%	37,01%	1,59%	21,70%
SC7 offre IR -30%	-0,002	-5,61%	0,00%	0,00%	0,00%
SC8 offre IR -50%	-0,001	-0,06%	2,16%	0,00%	0,05%
SC9 offre MR -50%	0,054	-0,60%	-4,21%	-3,36%	-7,97%
SC10 prix Eth + 10c	-0,067	2,13%	6,40%	3,44%	0,27%
SC11 prix Eth + 15c	-0,113	3,15%	7,17%	6,87%	-4,11%
SC12 prix Elect + 1c	-0,022	0,24%	0,00%	0,00%	0,00%
SC13 prix Elect + 2c	-0,041	0,48%	-0,85%	2,85%	0,00%
SC14 dde biogaz +50%	-0,002	0,02%	1,07%	-3,36%	0,00%
SC15 dde PP -30% Prix PP -15%	0,411	-6,50%	31,69%	4,53%	0,27%
SC16 offre RM -50% dde P&P -30%	0,338	-6,50%	33,92%	-3,36%	-4,61%
SC17 GHG ETH -5%	-0,009	2,05%	0,00%	0,00%	0,00%

### 3.3.4. Interprétations de l'analyse de sensibilité

Conformément aux objectifs de l'analyse de sensibilité, les trois aspects analysés concernent la robustesse du modèle, les recommandations à adresser aux preneurs de décision et les perspectives d'amélioration de la performance du modèle.

### **3.3.4.1. Analyse de robustesse**

La robustesse du modèle, proposant la planification soutenable des investissements bioénergétiques, se manifeste au niveau de la pertinence du choix des investissements et de la sécurisation de l'énergie nécessaire pour en assurer l'exploitation.

#### **- Pertinence du choix des investissements**

L'analyse du comportement des différents scénarios proposés, permet de déceler des éléments, liés aux choix d'investissement, qui renforcent la robustesse du modèle. Nous citons certains de ces éléments :

##### **▪ Le capital investi augmente en cas d'incitations économiques**

Ce comportement, observé au niveau des scénarios 10 et 11, tel qu'expliqué dans la sous-section de l'analyse de sensibilité, est accompagné d'une amélioration de performance économique et environnementale en plus de l'amélioration du taux d'intégration des produits finis. Le système, transforme une perturbation purement économique en un ensemble d'impacts touchant les deux aspects de la soutenabilité. Ainsi, l'augmentation du prix de l'éthanol améliore l'investissement et la capacité de production et fait migrer l'approvisionnement de la fermentation vers la biomasse la plus propre (+60.6% de résidus forestiers), d'où l'amélioration remarquable des émissions. Ce comportement prouve que le modèle se manifeste conformément à la logique transactionnelle en considérant les deux aspects de la soutenabilité. Ainsi, l'amélioration économique constitue un levier de soutenabilité.

##### **▪ Le capital investi dans la production bioénergétique augmente dans un contexte défavorable pour l'activité incubatrice**

Ce comportement prouve la synergie entre l'activité incubatrice et la bioraffinerie intégrée. Le scénario 6, qui concerne la dégradation de la demande de pâte commerciale de 30%, entraîne une chute de la production des P&P diminuant sa part dans le CFA de 20.6%. Au titre de ce scénario, le capital investi en bioénergie a marqué une augmentation de 13.2% répartie entre la production de l'éthanol (+11% par rapport à l'investissement en éthanol du scénario de référence) et la digestion anaérobie (+28.6% par rapport à l'investissement en

digestion anaérobie du scénario de référence). Ce scénario impacte le taux d'intégration de l'électricité vers la hausse (+37%) et améliore le recyclage des déchets de 21.7%.

Le même comportement s'est produit pour le scénario 15 qui considère la dégradation de la demande de P&P de 30% et la diminution du prix de 15%. En effet, une augmentation du capital investi de 33.3% dans la voie éthanol est constatée pour équilibrer la baisse dans la production de P&P. Le taux d'intégration de l'électricité de du biogaz ont augmenté respectivement de 31.7% et 4.5%. Ce comportement prouve que la planification des investissements cadre bien en faveur de la synergie avec l'activité incubatrice. Ainsi, l'augmentation de la production de l'éthanol conforte la situation difficile de récession de l'activité de P&P et la production supplémentaire du biogaz sécurise la cogénération en remplaçant partiellement le manque de la liqueur noire.

- **Le capital investi diminue en faveur de l'équilibre énergétique**

Au niveau du scénario 16 on a combiné la variation de deux paramètres afin de déceler l'impact sur l'investissement en cas de difficulté l'approvisionnement de la cogénération. Pour réduire la quantité de liqueur noire disponible on a prévu la dégradation de 30% de la demande de P&P, simultanément, pour réduire la production du biogaz, considéré comme intrant de soutien à la cogénération, on a prévu la dégradation de l'offre en résidus municipaux de 50%. Ce contexte réduit la capacité de production de la cogénération de 40 à 20 MWh avec une dégradation du capital horizon investi de 39%. Le même phénomène est observé au niveau de la voie de digestion anaérobie où le capital investi a chuté de 50% et la capacité a passé de 120 à 40 millions de m<sup>3</sup>. L'éthanol, concerné lui-même par la consommation de l'énergie, a enregistré une chute d'investissement de 11% en passant de la capacité de 90 à 60 millions de litres par an. On constate, d'après le comportement du système, que la planification de l'investissement dépend du contexte de la production de l'énergie et ses intrants en synergie parfaite avec l'activité incubatrice. Le système limite la production de l'énergie en fonction des intrants disponibles et limite en même temps la demande par la diminution de la capacité de production au niveau des autres voies de conversion. Ce comportement prouve la robustesse du modèle qui considère l'équilibre énergétique dans l'implémentation des composantes de la bioraffinerie.

De ce qui précède, le comportement du système en termes d'investissement et du choix de la capacité de production est sensible pour la plupart des scénarios étudiés. Toutefois, le système manifeste des comportements de robustesse en s'adaptant aux paramètres touchant notamment la capacité de production de l'énergie ou les conditions favorables de marché pour la production de l'éthanol.

- **Sécurité d'approvisionnement de l'unité de cogénération**

Le comportement du modèle prouve sa robustesse en matière de sécurité énergétique comme nous l'avons montré dans la section de l'analyse des résultats. Ci-après, on explique les éléments assurant la stabilité du système évalué vis-à-vis de cette composante fondamentale :

- **Le taux d'intégration interne du biogaz augmente pour sécuriser l'approvisionnement de la cogénération dans le contexte d'une dégradation extrême de l'activité de P&P**

Ce comportement est constaté au niveau des scénarios 4, 5 et 6 qui prévoient la dégradation du marché de P&P de 10%, 20% et 30%. En effet, le taux d'intégration interne du biogaz a augmenté de 1.9%, 1.8% et 1.6% respectivement au titre ces des derniers scénarios. Le même comportement est constaté au niveau du scénario 15 qui prévoit la dégradation de la demande de P&P de 30% et la diminution du prix de 15%. Le taux d'intégration a augmenté de 4.5%, au titre de ce dernier scénario, afin de renforcer la sécurisation énergétique par suite du manque de la liqueur noire générée par l'activité incubatrice.

- **Le taux d'intégration interne du biogaz augmente pour sécuriser l'approvisionnement de la cogénération dans le cas d'une augmentation de la demande interne en énergie**

C'est le cas de l'augmentation du taux d'intégration de 3.5% et 6.9% par suite de l'augmentation de la capacité de production de l'éthanol et la nécessité de la production de l'énergie interne pour satisfaire la demande supplémentaire de l'unité de fermentation (SC10 et SC11).

- **Le taux d'intégration du biogaz augmente afin de renforcer la préférence pour la vente de l'électricité**

Ce comportement se manifeste par l'augmentation du taux d'intégration du biogaz de 2.9% à la suite de l'augmentation du prix de l'électricité et la préférence à la vente de ce dernier produit au marché. Pour stabiliser l'équilibre entre demande et offre d'énergie, l'intégration du biogaz augmente en conséquence.

- **Le taux d'intégration interne en l'électricité augmente pour satisfaire l'équilibre énergétique**

À la suite de la dégradation du marché de l'activité incubatrice, le taux d'intégration interne en électricité augmente de 2%, 7.7%, 15.6% et 37% respectivement au titre des scénarios SC1-3, SC4, SC5 et SC6. Ces situations sont produites dans le cas où l'activité incubatrice subit une détérioration du marché et aussi en cas d'augmentation de la production de l'éthanol par suite des incitations à l'investissement. Pour ce dernier cas, le taux d'intégration a augmenté de 6.4% (SC10) et 7.2% (SC10). Le même comportement s'est produit dans le cas des scénarios combinés (SC15 et SC16) *stressant* au maximum le contexte d'approvisionnement de l'unité de cogénération. Pour ces derniers cas, le taux d'intégration atteint 32% et 34%. Ce phénomène se produit en réponse à une demande supplémentaire d'énergie ou en raison d'un manque d'approvisionnement en liqueur noire, en cas de difficulté de l'activité incubatrice.

- **Amélioration du taux de recyclage des déchets**

Le taux de recyclage des déchets s'est amélioré de 21.7% dans le contexte du SC6 pour augmenter la production du biogaz et remédier au manque de la liqueur noire destinée à l'approvisionnement de la cogénération.

De ce qui précède, on constate que la sécurité énergétique est bien considérée par le modèle. Le système manifeste un comportement de robustesse en s'adaptant aux différents contextes à travers le taux d'intégration des produits finis et à travers la régulation de la capacité de production pour parvenir à l'équilibre énergétique.

### **3.3.4.2. Canevas à communiquer aux preneurs de décision**

L'acceptabilité d'un modèle, conçu comme un outil d'aide à la décision, nécessite sa 'délivrabilité' avec des recommandations assorties. En effet, certains aspects doivent être clarifiés sur le comportement du modèle par rapport aux perturbations observées avec les éclaircissements nécessaires pour chaque cas.

L'équilibre énergétique et les facteurs qui influencent cette contrainte est le premier point à clarifier aux décideurs.

- En termes d'exportation d'électricité supplémentaire, il est recommandé d'opter pour un contrat de vente flexible. Cette option de vente permet de faire de la propension de l'énergie exportée un véritable facteur de flexibilité entre la production et l'utilisation interne de l'énergie propre ;
- En termes de sécurisation de l'approvisionnement de l'unité de cogénération par le biogaz, nous proposons, par récurrence, la sécurisation de l'approvisionnement de l'unité de digestion anaérobie par les résidus municipaux. Un contrat à long terme est requis pour la soutenabilité de l'approvisionnement de l'unité de digestion anaérobie en résidus municipaux ;
- Il est à signaler qu'une dégradation plus sérieuse de l'activité incubatrice associée à un problème d'approvisionnement de l'unité AD peut entraîner un risque d'équilibre énergétique. Dans ce dernier cas, la combustion directe de la biomasse de différentes catégories est recommandée pour résoudre le problème.

En outre, il est à signaler que le modèle renforce le système d'information sur les émissions et que l'analyse de sensibilité mette en évidence l'importance des incitations à l'investissement.

- Le système fournit tous les détails nécessaires pour respecter les obligations relatives aux déclarations des émissions. En cas d'attribution a priori des droits d'émission, il est recommandé d'acquérir les droits nécessaires tant que la marge bénéficiaire nette d'un produit dépasse le coût d'acquisition des droits d'émission ;

- L'analyse de sensibilité des incitations à l'investissement renforce la capacité de négocier des incitations plus appropriées pour la production bioénergétique. La restructuration du marché, par l'homologation des prix de l'éthanol et les mandats de mélange de l'éthanol avec la gazoline, est très recommandée.
- Par analogie au secteur des hydrocarbures, la négociation d'un mode de dépréciation accélérée des investissements est l'une des incitations les plus recommandées. Cette avenue sera explorée d'une façon plus détaillée dans le chapitre quatre.

### **3.3.4.3. Perspectives d'amélioration du modèle**

Certains points méritent d'être repensés afin d'améliorer la performance du modèle :

- La satisfaction énergétique, adoptée par hypothèse dans notre modèle, est une contrainte discutable. Dans les zones où l'énergie est autorisée à faible coût et à faible teneur en carbone, la satisfaction énergétique interne peut ne pas être imposée comme contrainte si les objectifs ne concernent que la soutenabilité. En effet, les émissions générées par la production de l'électricité au Canada varient de 22 g de CO<sub>2</sub> eq.KWh<sup>-1</sup> au Québec à 684 g de CO<sub>2</sub> eq.KWh<sup>-1</sup> au Nouveau-Brunswick. Cependant, si l'on considère la gouvernance de la transition énergétique, et spécifiquement la production des énergies renouvelables par la valorisation de biomasses, on peut se permettre d'imposer des contraintes pour transformer les consommateurs des énergies à base de combustibles fossiles en fournisseurs d'énergies propres et renouvelable ;
- En ce qui concerne la gestion des risques d'approvisionnement de l'unité de cogénération, il est recommandé d'explorer la voie de gazéification de la biomasse ligneuse à côté de la liqueur noire comme alternative pour sécuriser l'approvisionnement de cette unité ;
- Des études sur la soutenabilité de l'approvisionnement des BRFI sont demandées dans le cas de l'émergence de la production bioénergétique à grande échelle au Canada. La gouvernance dans l'allocation des ressources entre les différents acteurs de l'industrie forestière ainsi que la logistique du transport sont des avenues à explorer ;
- L'intégration verticale de certains processus industriels peut être explorée pour améliorer leur teneur en émission. La production sur place des enzymes et des produits chimiques aurait une plus grande importance pour le cas des bioraffineries ;

- L'équilibre entre les incitations potentielles pour la production bioénergétique et les gains escomptés en émissions reste une question polémique tant que les règles de monétisation de l'impact environnemental n'obéissent à aucun standard ni référence solide ;
- Il est à noter que la capacité de cogénération n'a pas été sensible à la majorité des scénarios étudiés. Les capacités proposées en tant que paramètres au modèle étaient de 20, 40 et 60 MWh. Cela signifie que le choix est limité aux paramètres des capacités prédéfinies. Toutefois, la capacité obtenue permet la satisfaction des besoins internes avec une marge de sécurité comprise entre 26% et 48% destinée à la vente. Le système trouve son équilibre en manipulant la marge de sécurité par l'augmentation ou la diminution du taux d'intégration. Une capacité de 20 MWh, fait que le système soit sous-dimensionnée en matière d'équilibre énergétique. Alors qu'une capacité de 60 MWh le rend surdimensionné avec un problème éventuel d'approvisionnement. Proposer des capacités supplémentaires de 35 et 45 MWh pour le cas canadien peut aboutir à des solutions plus avantageuses. La capacité optimale de 40 MWh est raisonnable et conforme à (Goortani et al., 2010) qui suggère qu'une capacité de 44,5 MW peut être attribuée aux unités de cogénération dans les usines canadiennes de pâte Kraft.

### **3.4. Conclusion**

L'équilibre énergétique impose le rythme de l'intégration verticale, la synergie avec l'activité incubatrice et la capacité d'investissement pour chaque voie implémentée de la bioraffinerie intégrée. La perturbation du système selon les scénarios et les thèmes analysés confirme la robustesse du modèle. Cependant, la mise en œuvre réussie des bioraffineries dépend de la soutenabilité de l'approvisionnement de l'unité de cogénération. Ce dernier nécessite l'exploration d'autres voies notamment la gazéification. Les incitations à l'investissement améliorent la performance générale de soutenabilité des bioraffineries et leur permettent d'atteindre les objectifs de transition énergétique au niveau national. Cependant, l'équilibre entre les incitations et les gains d'émissions induite reste une question polémique tant que les règles de monétisation de l'impact environnemental n'obéissent à aucun standard ni référence solide.

# Chapitre 4 : Impact des amortissements dérogatoires sur la planification soutenable des investissements bioénergétiques

## 4.1. Introduction

La stabilité technologique n'est pas encore atteinte pour la production bioénergétique et le bioraffinage de deuxième génération d'une façon générale. C'est pour cela que les investisseurs n'ont pas été en mesure de justifier le lancement de projets bioénergétiques à grande échelle sur la biomasse ligneuse (Phillips et al., 2013). L'éthanol, considéré comme *une voie* prometteuse, ne fait que commencer à émerger en raison des risques élevés associés au coût d'investissement et à sa viabilité économique. En outre, pour cadrer avec la stratégie de transition énergétique, les solutions alternatives capables d'atténuer les changements climatiques et de réduire la consommation d'énergies fossiles devraient être encouragées (Cherubini, 2010).

La politique fiscale est considérée par excellence comme un instrument de politique économique pouvant favoriser l'incitation à l'investissement par des mesures diverses. Elle est, à ce titre, invoquée pour améliorer la performance environnementale grâce aux incitations qu'elle crée d'après les interprétations du code canadien des impôts sur le revenu des sociétés. En outre, et d'après le chapitre précédent, la prospérité économique due aux incitations économiques induit une amélioration de la performance environnementale du fait de la compensation transactionnelle entre les deux aspects de la soutenabilité. Il importe ainsi de vérifier *une première hypothèse soutenant que les incitations fiscales en matière des amortissements dérogatoires améliorent la soutenabilité de l'investissement.* La définition de la notion, des types et des modes d'amortissements figure en annexe 4.A.

Femminis (2008) considère qu'en prenant en compte des valeurs réalistes pour le paramètre de dépréciation, la relation investissement-incertitude devient négative pour l'aversion au risque d'investissement. Ce résultat met l'accent sur l'importance de l'amortissement en tant que levier d'incitation à l'investissement sachant que les charges du capital d'investissement constituent la principale part des coûts pour les entités économiques.

Adkins and Paxson (2013) renforcent cette idée en mettant en exergue l'influence critique de la dépréciation fiscale sur la politique de remplacement en réduisant les seuils des coûts d'exploitation. En effet, en étudiant la politique de remplacement optimale pour un actif assujéti à une détérioration du coût d'exploitation, ils ont déduit qu'un calendrier d'amortissement accéléré peut encourager le remplacement précoce dans un contexte déterministe.

Koowattanaiachai et al. (2012) affirment que l'amortissement accéléré a été utilisé dans de nombreux pays à partir de la première guerre mondiale en tant qu'incitation à encourager l'investissement dans l'infrastructure ou l'équipement. Ce mode d'amortissement dérogatoire permet des déductions plus élevées dans les premières années que celles permises par la dépréciation linéaire (Lee and Lee, 2006). Magni (2016) a étudié la synergie entre la dépréciation du capital, par le choix du mode d'amortissement, et le taux de rendement dans le cadre d'une perspective unificatrice entre le comptable, le financier et l'économique. Ainsi, le choix de la méthode d'amortissement par les entreprises est susceptible d'influencer les décisions d'investissement en capital. Jackson et al. (2009) constatent, dans leur étude en question, que les entreprises qui pratiquent une dépréciation accélérée font des investissements en capital nettement plus importants que les entreprises qui pratiquent un amortissement linéaire. Cependant, malgré l'importance de la variation des prix des actifs, dans de nombreux systèmes de réglementation, la dépréciation linéaire des coûts historiques d'acquisition est obligatoire (Küpper and Pedell, 2016). Shrimali et al. (2017) ont étudié les politiques fédérales indiennes d'incitations pour l'installation de l'énergie éolienne en utilisant des régressions linéaires multi-variables sur un échantillon d'environ 40 usines. Les politiques étudiées concernent l'éligibilité aux amortissements accélérés et les incitations basées sur la génération de courant électrique, offrant une prime pour chaque unité générée. Le résultat prouve que l'amortissement accéléré semble être plus efficace à partir des perspectives de déploiement et de coût alors que l'incitation basée sur les unités de courant généré est plus efficace pour stimuler la génération de courant. Les auteurs comparent le passage entre les deux incitations suscitées au passage du crédit d'impôt à l'investissement au crédit d'impôt à la production aux États-Unis.

Ainsi, l'adoption d'un type d'amortissement dérogatoire paraît plus bénéfique que l'amortissement se basant sur une dévaluation constante de la valeur des investissements bioénergétiques. Accélérer l'amortissement fiscal de ces biens constitue une incitation qui peut encourager l'investissement dans le domaine de bioraffinage. Il s'agit de notre deuxième hypothèse qu'on propose de vérifier. D'après Park (2016), le modèle d'investissement néoclassique implique que les investissements répondent aux changements dans les économies d'amortissement. Toutefois, il affirme qu'il y a eu peu de tentatives qui ont enquêté sur cette implication. Les résultats de l'application du raccourcissement des périodes de récupération de l'amortissement, impliquent une augmentation relative des investissements de 15% à 23% dans (Park, 2016). Toutefois, Küpper and Pedell (2016) considèrent que dans la pratique réglementaire, il n'existe aucune méthode de dépréciation universellement acceptée. Les auteurs ont comparé les méthodes les plus couramment utilisées pour l'évaluation et la dépréciation des actifs en fonction des incitations adéquates à l'investissement, de leur compatibilité avec l'évolution du marché et de leur cohérence avec les principes comptables et financiers. Les résultats indiquent que les différences entre les méthodes d'amortissement restent très importantes pour les investissements ayant une longue durée de vie et où les prix changent substantiellement. Keating and L. Zimmerman (1999) évoquent la dualité de la notion d'amortissement entre l'aspect comptable et celui fiscal et les effets de leur application. Ils font allusion aux difficultés d'application lorsque l'éligibilité concernent les acquisitions nouvelles et pour des types d'amortissement différents selon les biens concernés.

L'application de la déduction pour amortissement accéléré aux industries pétrochimiques, des sables bitumineux et de la valorisation, ainsi qu'aux activités de fabrication ou de transformation, est connue au Canada. En vertu de la Déduction Pour Amortissement Accéléré (DPAA), comme son nom l'implique, on peut amortir les coûts réguliers des immobilisations en fonction des revenus du projet au lieu de les reporter. Comme les sociétés recouvrent leurs investissements initiaux plus rapidement, la DPAA diminue le risque d'investissement associé à la mine ou au projet, augmentant ainsi sa viabilité économique. Toutefois, il faut signaler que l'amortissement économique déterminé en fonction des conditions d'utilisation et du marché est celui couramment réglementé et pratiqué au Canada. Il s'agit généralement de l'amortissement du type dégressif s'appliquant

sur la valeur résiduelle des biens amortissables. En tant que charge déductible du revenu imposable, la législation fiscale prévoit des taux d'amortissement préférentiels pour les investissements prioritaires. Les types et taux d'amortissement sont répartis selon les catégories de biens amortissables en fonction des décisions d'incitation aux investissements souvent limitées dans le temps (voir section 4.2.).

L'analyse financière portant sur l'aspect fiscal est quasi-absente dans les travaux de recherche touchant l'évaluation économique, et ce, pour plusieurs raisons. La première raison est liée à la négligence de l'amortissement comme paramètre de modélisation influençant la charge fiscale en matière de l'impôt direct. Une telle situation enflé substantiellement le résultat économique étudié et fausse les analyses conséquentes. La deuxième raison est liée aux complications de l'aspect fiscal considéré comme domaine d'experts. Ainsi, même dans le cas où l'aspect de l'imposition est retenu au niveau de la modélisation, les analyses se basant sur cet aspect font défaut pour la raison liée au non spécialisation. Ainsi, on considère que le choix de l'investissement couplé au choix de sa façon de dépréciation offre à l'investisseur une visibilité plus complète sur les conséquences pratiques de l'investissement dans le domaine bioénergétique. En d'autres termes, l'éligibilité à un type d'amortissement favorable pour l'investissement dans un domaine d'activité peut inciter les preneurs de décision à investir dans ce domaine.

Dans ce travail, une première section sera consacrée à l'étude du régime fiscal des amortissements au Canada tout en ciblant le secteur de fabrication et de transformation. Une deuxième section présentera la méthodologie adoptée pour parfaire une analyse d'impacts se basant sur les amortissements dérogatoires. Dans une dernière section les résultats seront discutés et interprétés.

#### **4.2. Le régime fiscal des amortissements au Canada**

Aux termes du sommaire de l'exposé général sur la déduction pour amortissement (DPA) du folio de l'impôt sur le revenu canadien<sup>5</sup>, «la DPA remplace l'amortissement comptable aux fins du calcul de l'impôt. Un contribuable qui acquiert et utilise un bien

---

<sup>5</sup> L'Agence du revenu du Canada (ARC) publie des folios de l'impôt sur le revenu afin de fournir des interprétations et des positions techniques à l'égard de dispositions précises contenues dans la législation fiscale.

amortissable, pour tirer un revenu, peut déduire de la base imposable au fil du temps une partie de son coût en capital. En effet, un bien amortissable se détériore au fil du temps ou devient obsolète ». Selon le régime de la DPA, la législation fiscale groupe les biens amortissables par catégories. La DPA se calcule ainsi à l'aide d'un taux stipulé par la loi et « reflétant généralement la vie utile des biens appartenant à une catégorie ». Les catégories d'amortissement 29, 43 ou 53 regroupent le matériel de fabrication et de transformation<sup>6</sup> admissibles aux amortissements dérogatoires règlementés dans le temps. Les catégories suscitées permettent l'application de l'amortissement accéléré pour ces types de biens selon leur date d'acquisition.

- La catégorie 29 concerne les machines ou le matériel admissible servant principalement à la fabrication ou à la transformation au Canada de marchandise en vue de la vente ou de la location, acquis entre le 19 mars 2007 et le 31 Décembre 2015, qui seraient autrement compris dans la catégorie 43. Le calcul de la DPA pour cette catégorie se fait au moyen de la méthode de l'amortissement linéaire à la limite de 25 % pour la première année, 50 % pour la deuxième année et les 25 % restants pour la troisième année ;
- La Catégorie 43 concerne les machines et le matériel admissibles servant principalement à la fabrication ou à la transformation au Canada de marchandise en vue de la vente ou de la location, et qui ne sont pas compris dans les catégories 29 ou 53. Les biens de cette catégorie sont assujettis à un taux de DPA de 30 % applicable sur un solde dégressif. En outre, les mesures fiscales relatives au régime de déduction pour amortissement telles que stipulé au niveau du budget 2017<sup>7</sup> prévoient que les catégories 43.1 et 43.2 de l'annexe II au règlement de l'impôt sur le revenu prévoient des taux de déduction pour amortissement accéléré de 30 % et 50 % respectivement, selon la méthode de

---

<sup>6</sup> Le chapitre 1 du folio 15 de la section 4 traitant le thème de la fabrication et transformation affirme que la fabrication de biens ou de marchandises implique ordinairement la création de quelque chose (p. ex., confectionner ou assembler une machine, des vêtements, faire de la soupe) ou le façonnage, l'estampage ou le formage d'un objet à partir de quelque chose (p. ex., la fabrication de rails métalliques, de clous de broche, de balles de caoutchouc, de moulures en bois). En revanche, on entend généralement par la transformation d'une marchandise, une technique de préparation, de manipulation ou une autre activité destinée à produire une transformation physique ou chimique dans un article ou une substance, autrement que par croissance naturelle.

<sup>7</sup> Annexe qui présente des renseignements détaillés sur chacune des mesures fiscales proposées dans le budget au site du gouvernement : <http://www.budget.gc.ca/2017/docs/tm-mf/si-rs-fr.html>

l'amortissement dégressif, et ce, pour les investissements dans du matériel de production et de conservation d'énergie propre désigné. Les deux catégories comprennent le matériel admissible qui produit ou conserve de l'énergie soit :

- À partir d'une source d'énergie renouvelable (par exemple, éolienne, solaire ou petite centrale hydroélectrique) ;
- À partir de combustibles dérivés de déchets (par exemple, gaz d'enfouissement, déchets de bois ou fumier) ;
- Grâce à un usage efficace de combustibles fossiles (par exemple, systèmes de cogénération à rendement élevé produisant simultanément de l'électricité et de la chaleur utile).

La catégorie 43.2 est disponible à l'égard des biens acquis avant 2020. Ces mesures favoriseront l'investissement dans des technologies qui peuvent contribuer à réduire les émissions de GES et les polluants atmosphériques, à l'appui des cibles énoncées dans la stratégie fédérale de développement durable. Le matériel désigné pour la production d'énergie propre acquis après le 22 février 2005 et avant le 1er janvier 2020, et qui répond à la norme de rendement plus élevée, peut bénéficier d'un taux de déduction pour amortissement au taux dégressif de 50 % (catégorie 43.2). Cette déduction accélérée constitue un avantage financier pour les entreprises qui souhaitent faire un virage vert et investir dans l'achat de nouveaux équipements plus performants et moins énergivores.

- La catégorie 53 concerne la machinerie et l'équipement admissibles utilisés au Canada principalement dans la fabrication et la transformation de marchandises à vendre ou à louer acquis après 2015, mais avant 2026 (qui seraient par ailleurs inclus dans la catégorie 29). Le taux de DPA applicable est de 50% applicable sur un solde dégressif.

L'octroi d'une déduction pour amortissement accéléré constitue une exception à la pratique générale consistant à établir les taux de déduction pour amortissement en fonction de la durée de vie utile des actifs. Une déduction pour amortissement accéléré procure un avantage financier en raison du report de l'impôt.

Il ressort de ce qui précède, que l'activité de conversion de déchet ligneux en bioénergie fait partie des activités de transformation et de fabrication et peuvent bénéficier

d'un taux de DPA de 50% jusqu'au 2025 sous la catégorie 53. À partir de l'année 2026 le taux de DPA sera de 30% sous l'égide de la catégorie 43.

L'étude du régime fiscal canadien des amortissements a permis, d'une part d'identifier les variétés des modes de dépréciation en vigueur qui peuvent servir d'alternatives pour l'étude d'impact et d'autre part, d'identifier le ou les types applicables sur les immobilisations bioénergétiques.

### **4.3. Méthodologie**

Une méthodologie par étape, se basant sur l'analyse des scénarios, est suivie pour parfaire l'étude d'impacts des modes d'amortissements dérogatoires sur l'investissement en bioénergie :

- Dans une première étape, on détermine l'impact de l'amortissement linéaire sur la planification soutenable des investissements. Le résultat de ce mode d'amortissement sera considéré comme scénario de référence (scénario de base). Il est à signaler que le mode d'amortissement qui s'applique actuellement est un mode dérogatoire limité dans le temps et dans la portée des biens éligibles. Ainsi, ce mode fait partie des modes objet de l'étude et ne peut servir de référence. En effet, notre étude porte sur l'impact des amortissements dérogatoires par rapport à l'amortissement du droit commun qui est l'amortissement linéaire en suivant (Machani et al., 2014) ;
- Dans une seconde étape on recense les différents types d'amortissement applicables durant la dernière décennie au Canada pour analyser et interpréter leurs impacts par rapport au scénario de référence. L'interprétation considère les hypothèses proposées pour la vérification, à savoir, l'impact des modes d'amortissements dérogatoires sur l'investissement et sur la soutenabilité.

#### **4.3.1. Impact de l'amortissement linéaire**

Au cours de cette étape, on applique l'amortissement linéaire pour déterminer la charge fiscale déductible au titre de l'amortissement des investissements bioénergétiques. L'amortissement linéaire est appliqué sur une durée de vie fiscale de 20 ans selon un taux égal à l'inverse de la durée de vie, soit 5%.

Les dix premières solutions de la frontière de Pareto seront retenues pour l'analyse, et ce, en se référant à la même hypothèse telle que motivée au chapitre deux. Les résultats de l'analyse constituent la référence selon laquelle on évalue l'impact des amortissements dérogatoires sur le choix soutenable des investissements bioénergétiques.

### 4.3.2. Recensement et application des amortissements dérogatoires

Dans cette étape, on recense les différents types d'amortissements applicables au Canada, durant la dernière décennie, pour comparer leurs impacts par rapport au scénario de référence. Ces types concernent l'amortissement linéaire, dégressif, accéléré et massif.

Le champ d'application de chaque type dépend des catégories de biens amortissables en plus du facteur temporel. Le tableau 4.1 récapitule les différents scénarios proposés pour l'étude et illustre les taux effectifs utilisés pour déterminer l'annuité de l'amortissement fiscalement déductible.

**Tableau 4.1 :** Taux effectif pour les différents modes d'amortissements dérogatoires (le calcul des taux effectifs découle des règles comptables et fiscales prévues par la réglementation pour chaque discipline<sup>8</sup>)

Taux d'amortissement effectif appliqué sur la valeur d'origine								
Année	LIN_5%	DEG_2xL	DEG_2,5xL	AC_25.50.25	DEG_30	DEG_50-30	DEG_50	Massif_100
1	5%	10,000%	12,50%	25%	30,000%	50,000%	50,000%	100%
2	5%	9,000%	10,94%	50%	21,000%	25,000%	25,000%	0%
3	5%	8,100%	9,57%	25%	14,700%	12,500%	12,500%	0%
4	5%	7,300%	8,37%	0%	10,290%	6,250%	6,250%	0%
5	5%	6,600%	7,33%	0%	7,203%	3,125%	3,125%	0%
6	5%	5,900%	6,41%	0%	5,042%	1,563%	1,563%	0%
7	5%	5,300%	5,61%	0%	3,529%	0,781%	0,781%	0%
8	5%	4,800%	4,91%	0%	2,471%	0,391%	0,391%	0%
9	5%	4,300%	4,30%	0%	1,729%	0,195%	0,195%	0%
10	5%	3,900%	3,76%	0%	1,211%	0,098%	0,098%	0%
11	5%	3,500%	3,29%	0%	0,847%	0,029%	0,049%	0%
12	5%	3,100%	2,88%	0%	0,593%	0,021%	0,024%	0%
13	5%	2,800%	2,52%	0%	0,415%	0,014%	0,012%	0%
14	5%	2,500%	2,52%	0%	0,291%	0,010%	0,006%	0%
15	5%	2,300%	2,52%	0%	0,203%	0,007%	0,003%	0%
16	5%	2,100%	2,52%	0%	0,142%	0,005%	0,002%	0%
17	5%	4,625%	2,52%	0%	0,100%	0,003%	0,001%	0%
18	5%	4,625%	2,52%	0%	0,070%	0,002%	0,000%	0%
19	5%	4,625%	2,52%	0%	0,049%	0,002%	0,000%	0%
20	5%	4,625%	2,52%	0%	0,034%	0,001%	0,000%	0%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
AMA (*)	10	8	6	2	2	2	2	1

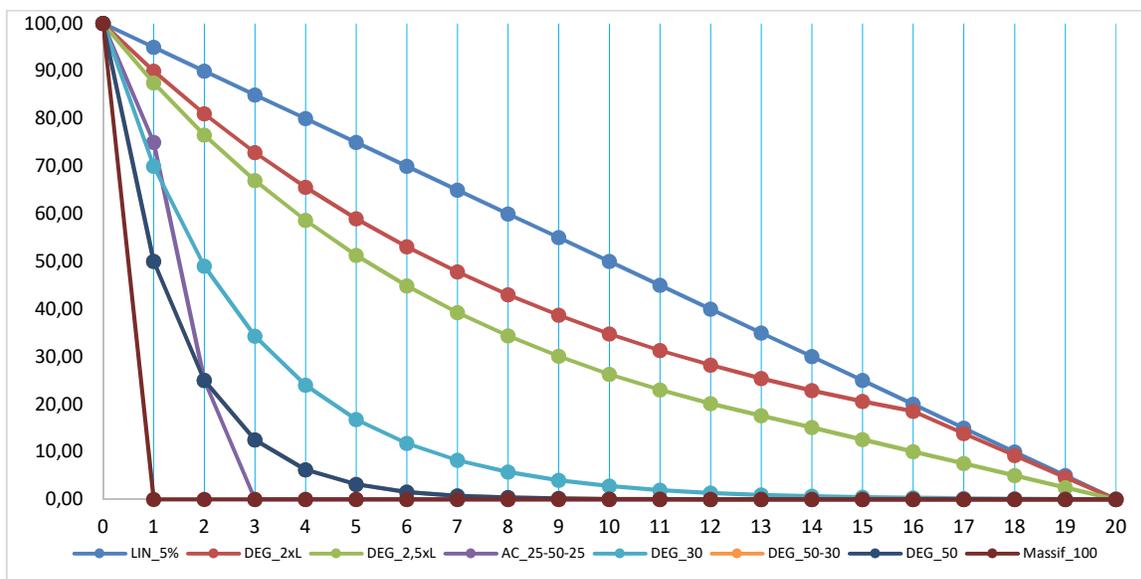
(\*) Année moyenne de l'amortissement ; DEG : Dégressif ; AC : Accéléré ; LIN : Linéaire

<sup>8</sup> Le calcul du mode linéaire se fait en appliquant le taux linéaire à la valeur d'origine durant toute la durée de vie (taux linéaire = 1/(durée de vie)). Le calcul du mode accéléré se fait selon un ou plusieurs taux qui s'appliquent, durant les premières années, à la valeur d'origine. L'amortissement massif est une variété de l'amortissement accéléré ou le taux applicable est 100% durant la première année. L'amortissement dégressif s'applique selon un ou plusieurs taux durant la durée de vie à la valeur résiduelle et non à la valeur d'origine.

La valeur de l'amortissement fiscal constitue une charge déductible de la base imposable en matière de l'impôt direct sur le revenu des sociétés. A ce titre, toute déduction supplémentaire va procurer un gain d'impôt égal à l'impôt épargné sur ce supplément déduit par rapport au mode linéaire. Ainsi, l'avantage de l'application d'un type d'amortissement dérogatoire réside au niveau de la répartition de la charge déductible sur la durée de vie fiscale de l'immobilisation. La figure 4.1 et le tableau 4.2 illustrent la répartition de la valeur résiduelle des biens amortissables selon le mode d'amortissement pratiqué.

**Tableau 4.2 :** Valeur résiduelle des différents modes d'amortissements d'après les taux du tableau 4.1

Valeur résiduelle (sur la base d'une valeur de 100).								
Année	LIN_5%	DEG_2xL	DEG_2,5xL	AC_25-50-25	DEG_30	DEG_50-30	DEG_50	Massif_100
0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1	95,00	90,00	87,50	75,00	70,00	50,00	50,00	0,00
2	90,00	81,00	76,56	25,00	49,00	25,00	25,00	0,00
3	85,00	72,90	66,99	0,00	34,30	12,50	12,50	0,00
4	80,00	65,60	58,62	0,00	24,01	6,25	6,25	0,00
5	75,00	59,00	51,29	0,00	16,81	3,13	3,13	0,00
6	70,00	53,10	44,88	0,00	11,76	1,56	1,56	0,00
7	65,00	47,80	39,27	0,00	8,24	0,78	0,78	0,00
8	60,00	43,00	34,36	0,00	5,76	0,39	0,39	0,00
9	55,00	38,70	30,07	0,00	4,04	0,20	0,20	0,00
10	50,00	34,80	26,31	0,00	2,82	0,10	0,10	0,00
11	45,00	31,30	23,02	0,00	1,98	0,07	0,07	0,00
12	40,00	28,20	20,14	0,00	1,38	0,05	0,05	0,00
13	35,00	25,40	17,62	0,00	0,97	0,03	0,03	0,00
14	30,00	22,90	15,11	0,00	0,68	0,02	0,02	0,00
15	25,00	20,60	12,59	0,00	0,47	0,02	0,02	0,00
16	20,00	18,50	10,07	0,00	0,33	0,01	0,01	0,00
17	15,00	13,88	7,55	0,00	0,23	0,01	0,01	0,00
18	10,00	9,25	5,04	0,00	0,16	0,01	0,01	0,00
19	5,00	4,63	2,52	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00



**Figure 4.1 :** Valeur résiduelle des différents modes d'amortissements sur la durée de vie fiscale de 20 ans

La formulation mathématique de l'amortissement fiscal, dans notre modèle mathématique, changera comme indiqué ci-après :

$$AFD = \sum_{c=0}^{C-3} \sum_{t=c}^T \frac{f(t-cPC) \sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,c+1} \cdot (Y_{o,e,c+1} - Y_{o,e,c})}{(1+r)^t} + \sum_{c=2}^{C-1} \sum_{t=c}^T \frac{g(t-cPC) \sum_{e=1}^3 \sum_{o=1}^3 IC_{o,e,c+1} \cdot (Y_{o,e,c+1} - Y_{o,e,c})}{(1+r)^t} \quad (52)$$

Les termes de cette formule sont :

- $AFD$  : dépréciation fiscale actualisée
- $C$  : nombre de cycle (4 cycle) ;  $c$  cycle = 1, ...,  $C$
- $T$  : durée d'amortissement fiscale (20 ans) ;  $t = 1, \dots, T$
- $PC$  : durée d'un cycle (5 ans)
- $IC_{o,e,c+1}$  : Coût d'investissement selon l'option de capacité  $o$  de la technologie  $e$  durant le cycle  $c+1$
- $Y_{o,e,c+1}$  : Variable booléenne concernant le choix de l'option  $o$  pour la technologie  $e$  Durant le cycle  $c+1$
- $r$  : taux d'actualisation.
- $f(t)$  et  $g(t)$  sont les vecteurs des taux effectifs d'amortissement selon la période  $t$  de la durée de vie  $T$ , soient les colonnes du tableau 4.1. La fonction  $g(t)$  correspond au deuxième taux dégressif, dans le cas où plusieurs taux s'appliquent (Cas du mode DEG\_50\_30 où le taux de 50% s'applique au titre des acquisitions des deux premiers cycles et le taux de 30% pour les acquisitions des deux derniers cycles). S'il s'agit d'un seul taux qui s'applique donc la fonction  $f(t)$  est égale à  $g(t)$ .

#### 4.4. Étude d'impact : résultats et interprétations

Conformément aux deux étapes décrites par la méthodologie suscitée, on présente en premier lieu l'étude d'impacts du mode d'amortissement linéaire. Ce dernier résultat servira de référence à la deuxième étape qui analysera l'impact des modes d'amortissements dérogatoires sur la planification soutenable de l'investissement bioénergétique. Les interprétations relateront les résultats de la vérification des hypothèses proposées.

#### **4.4.1. Impact de l'application de l'amortissement linéaire**

Le résultat relatif à cette étape constitue le scénario de référence par rapport auquel on évalue l'impact des amortissements dérogatoires sur le choix des investissements bioénergétiques. Le taux linéaire est appliqué sur une durée de vie fiscale de 20 ans selon un taux égal à l'inverse de la durée de vie (LIN\_5%). Le capital investi et la performance économique-environnemental de l'investissement sont les principaux agrégats analysés au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto. Toutefois, l'analyse réservée à la deuxième étape portera sur un ensemble de critères plus élargie.

##### **4.4.1.1. Planification des investissements**

Cette analyse couvre la technologie, la capacité de production, la période d'implémentation sélectionnée et le capital investi. Les résultats obtenus, pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto, sont illustrés par le tableau 4.3. Selon ce tableau, la capacité de production de la voie cogénération sélectionnée est stable à 40 MWh. Cependant, la voie de digestion anaérobie implémente une capacité annuelle de 120 millions (M) de mètres cubes ( $m^3$ ) de biogaz dont 80 M  $m^3$  implémentés au deuxième cycle et 40 M  $m^3$  implémentés au quatrième cycle. Pour la voie éthanol, la capacité de production implémentée diminue d'une solution à l'autre. Pour la première solution, la capacité implémentée au premier cycle d'investissement s'élève à 90 M litres. Au début du troisième cycle d'investissement une capacité supplémentaire de 30 M litres a été ajoutée. Toutefois, la capacité totale de production, pour la septième solution, a diminué à 30 M litres implémentée au troisième cycle d'investissement. A la huitième solution, la voie éthanol devient non viable. Le détail de la planification des investissements, en termes de technologies, capacité de production, période d'implémentation et capital investi, pour les solutions concernées, est explicité par le tableau 4.3.

**Tableau 4.3:** Planification de l'investissement (technologie sélectionnée, capacité de production, période d'implémentation et capital investi pour chaque technologie) pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto selon le scénario de référence

Technologie		Cogénération								Total	
Cycle	1	2		3		4					
Solutions de la frontière de Pareto	Capacité MWh	Capital Million \$									
1	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
2	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
3	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
4	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
5	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
6	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
7	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
8	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
9	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	
10	40	150,4	0	0	0	0	0	0	40	150,4	

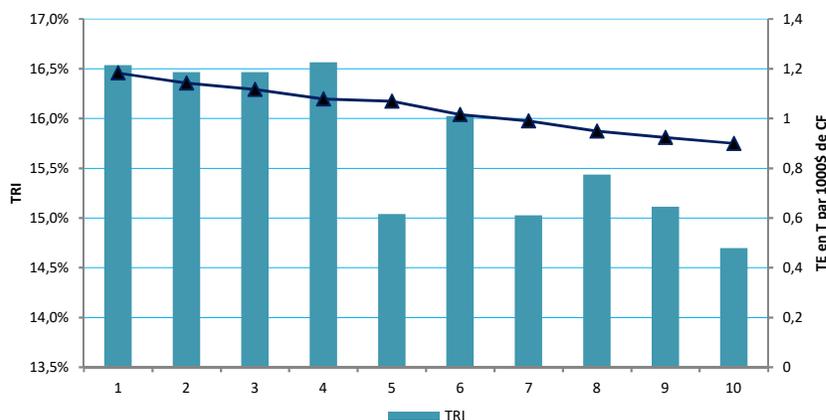
Technologie		Digestion anaérobie								Total	
Cycle	1	2		3		4					
Solutions de la frontière de Pareto	Capacité Mm cube	Capital Million \$	Capacité Mm cube	Capital Million \$	Capacité Mm cube	Capital Million \$	Capacité Mm cube	Capital Million \$	Capacité Mm cube	Capital Million \$	
1	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
2	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
3	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
4	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
5	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
6	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
7	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
8	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
9	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	
10	0	0	80	160	0	0	40	80	120	240	

Technologie		Fermentation								Total	
Cycle	1	2		3		4					
Solutions de la frontière de Pareto	Capacité ML	Capital Million \$	Capacité	Capital	Capacité	Capital	Capacité	Capital	Capacité	Capital	
1	90	108,9	0	0	30	36,3	0	0	120	145,2	
2	60	72,6	30	36,3	0	0	0	0	90	108,9	
3	60	72,6	0	0	0	0	30	36,3	90	108,9	
4	60	72,6	0	0	0	0	0	0	60	72,6	
5	0	0	60	72,6	0	0	0	0	60	72,6	
6	30	36,3	0	0	0	0	0	0	30	36,3	
7	0	0	0	0	30	36,3	0	0	30	36,3	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

#### 4.4.1.2. Analyse économique-environnementale

D'après la tendance illustrée par la figure 4.2, le taux de rentabilité interne, favorise les quatre premières solutions pour le scénario de référence. En revanche, le taux d'émission s'améliore en passant de la première à la dixième solution du fait des contraintes du modèle lors de la transaction entre les différents objectifs.



**Figure 4.2 :** TRI et TE pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto (scénario de référence)

Ces résultats caractérisent le scénario de référence pour l'étape suivante. Notre objectif, pour l'étape concernée, serait de déceler l'impact de l'application des modes d'amortissement dérogatoires sur le choix d'investissement et sur la soutenabilité de l'intégration de la production énergétique par le secteur des P&P.

Il est à signaler que ce scénario est analysé au chapitre deux concernant les différents aspects relatifs à l'investissement, au taux d'intégration interne, au taux de recyclage des déchets et au choix de la solution optimale.

#### 4.4.2. Impacts de l'application des modes d'amortissements dérogatoires

Les différents types d'amortissements dérogatoires applicables au cours de la dernière décennie concernent l'amortissement accéléré selon plusieurs taux, l'amortissement dégressif selon un ou deux taux et l'amortissement massif. Les modes d'amortissements sont répartis selon les catégories des biens amortissables en fonction des décisions d'incitations aux investissements souvent limitées dans le temps par la législation fiscale. Les types recensés concernent les modes énumérés ci-après :

- Amortissement accéléré durant les trois premiers exercices selon les taux 25%, 50% et 25% (AC\_25-50-25) ;
- Amortissement dégressif selon le taux de 30% (DEG\_30) ;
- Amortissement dégressif selon le taux de 50% (DEG\_50) ;

- Amortissement dégressif selon deux taux applicables chacun sur une période déterminée. Ces taux sont respectivement de 50% et 30% (DEG\_50-30) ;
- Amortissement Massif selon un taux de 100%. (Massif\_100).

Nous ajoutons d'autres modes d'amortissements appliqués usuellement, selon les pratiques comptables et fiscales, dans plusieurs pays dont le Canada. Il s'agit des amortissements dégressifs, déterminés en appliquant un coefficient multiplicateur au taux linéaire, soient, 2 × taux linéaire (DEG\_2xL) et 2,5 × taux linéaire (DEG\_2,5xL).

L'analyse, par rapport au scénario de référence, concerne le capital investi, la performance économique-environnemental de l'investissement en plus de l'analyse financière relative à l'impact des modes d'amortissements sur le trésor public.

#### **4.4.2.1. Impact sur le capital investi**

Les résultats présentés par le tableau 4.4 prouvent clairement que les modes d'amortissement dérogatoires influencent le capital investi. D'après le classement des modes d'amortissement, les modes accélérés (ACC\_25\_50\_25 et Massif\_100) et ceux dégressifs forts (DEG\_30, DEG\_50, DEG\_50-30) l'emportent en termes de capital investi. Toutefois, l'analyse doit porter sur l'impact de ces modes d'amortissement dérogatoires sur le choix d'investissement soutenable et sur le trésor public. Si le mode dérogatoire permet un gain certain d'impôt, provenant des déductions supplémentaires au début de la période d'amortissement, on se pose alors la question sur le sort de ce gain financier sur les critères et indicateurs de performance. Pour répondre à cette question, on examinera le comportement du système étudié vis-à-vis des indicateurs de performance économique, et environnemental. **Il est à signaler, que pour une lecture plus claire des tableaux, nous avons adopté une mise en forme des données selon des couleurs dégradées du vert (plus favorable) au rouge (plus défavorable).**

**Tableau 4.4 :** Capital total investi et capital relatif à l’horizon de planification pour les différents scénarios

	Solutions de la frontière de Pareto	Modes d'amortissement							
		ACC_25_50_25	DEG_2,5LIN	DEG_2LIN	DEG_30	DEG_50	DEG_50_30	LIN	M_100
Investissement Total	1	761	536	536	761	761	761	536	761
	2	725	499	499	725	725	725	499	725
	3	725	499	499	725	725	725	499	725
	4	725	463	463	725	725	725	463	725
	5	725	499	499	725	725	725	463	725
	6	725	499	427	725	725	652	427	725
	7	652	463	463	652	652	652	427	652
	8	616	390	390	616	616	616	390	616
	9	616	390	390	616	616	616	390	616
	10	616	390	390	616	616	616	390	616
	Moyenne	689	463	456	689	689	681	448	689
	Rang	1	6	7	1	1	5	8	1
	Investissement Horizon	Solutions Pareto	ACC_25_50_25	DEG_2,5LIN	DEG_2LIN	DEG_30	DEG_50	DEG_50_30	LIN
1		494	417	417	494	494	494	417	494
2		467	390	390	467	467	467	390	467
3		448	372	372	448	448	448	372	448
4		430	363	363	430	430	430	363	430
5		412	345	345	412	412	412	345	412
6		403	327	327	403	403	394	327	403
7		376	309	309	376	376	376	309	376
8		367	290	290	367	367	367	290	367
9		367	290	290	367	367	367	290	367
10		367	290	290	367	367	367	290	367
Moyenne		413	339	339	413	413	412	339	413
Rang		1	6	7	1	1	5	8	1

#### 4.4.2.2. Impact sur la performance économique

La figure 4.3 montrent que l’impact des différents scénarios sur la performance de l’investissement se manifeste de la même façon qu’au niveau du capital investi. En effet, la performance économique des investissements est emportée par les amortissements dégressifs forts. Pour le mode massif, l’amélioration du taux de rentabilité interne TRI atteint remarquablement 2.7% en moyenne pour les dix premières solutions. La figure 4.3 permet aisément de faire la liaison entre le mode d’amortissement, le schéma d’investissement correspondant illustré par le tableau 4.4, le gain en performance (tableau 4.5) et le choix des solutions sur la frontière de Pareto (solution de 1 à 10).

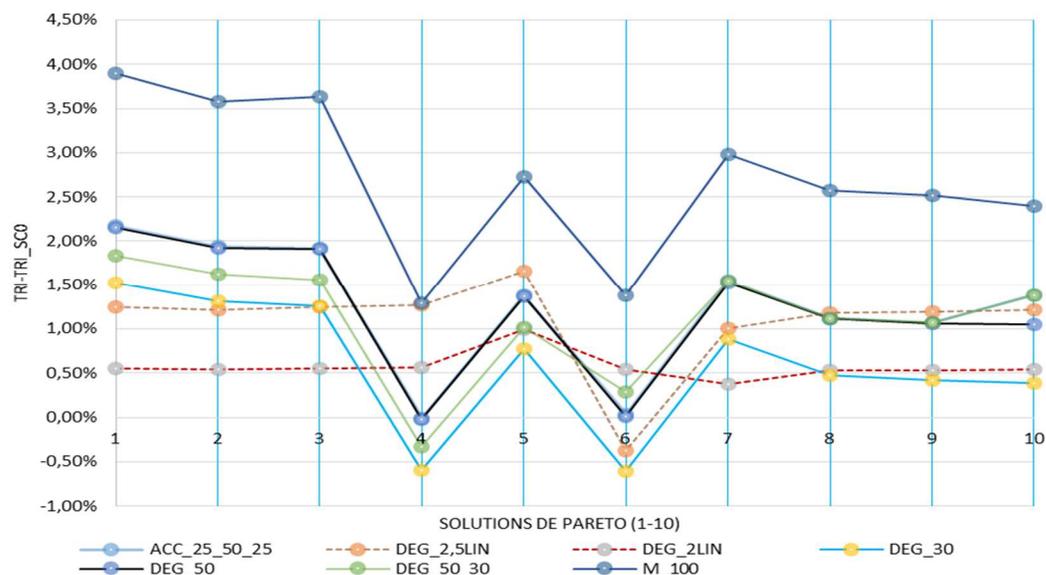


Figure 4.3 : Variation du TRI par rapport au scénario de référence

#### 4.4.2.3. Impact sur le taux d'émission

En se basant sur la variation du taux d'émission illustrée par le tableau 4.5, tous les scénarios enregistrent une amélioration positive de l'impact environnemental sauf les modes dégressifs faibles (2LIN et 2,5LIN). Toutefois, les solutions de 4 à 7 sont recommandées pour la plupart des scénarios à part les deux derniers scénarios. Les scénarios accélérés et dégressifs forts enregistrent la meilleure amélioration avec une diminution des émissions de l'ordre de 28 kg CO<sub>2</sub> éq. par 1000\$ de CF, pour les quatre solutions sus-indiquées. Cette amélioration s'élève à 21 CO<sub>2</sub> éq. par 1000\$ de CF en moyenne au titre des sept premières solutions.

On constate ainsi, que les modes d'amortissements accélérés et dégressifs forts impactent positivement l'environnement par la relaxation financière qu'ils procurent au système évalué. L'analyse des courbes de la figure 4.4 prouve que les scénarios qui présentent la meilleure amélioration au niveau de l'investissement (Tableau 4.4) sont ceux qui impactent positivement l'environnement. Donc, il y avait une corrélation entre les deux aspects.

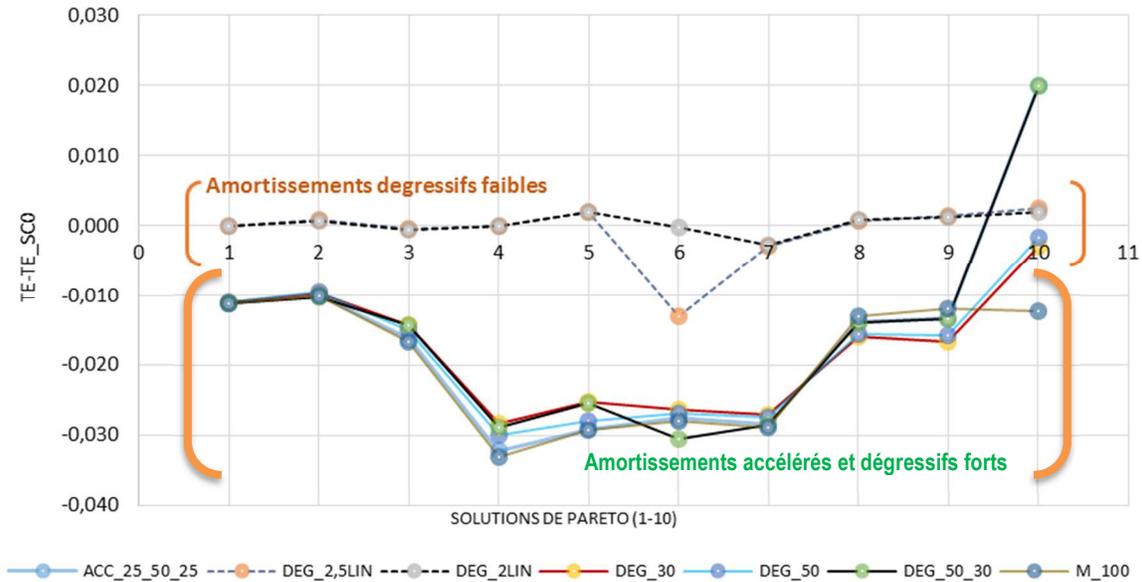


Figure 4.4 : Variation du TE par rapport au scenario de référence

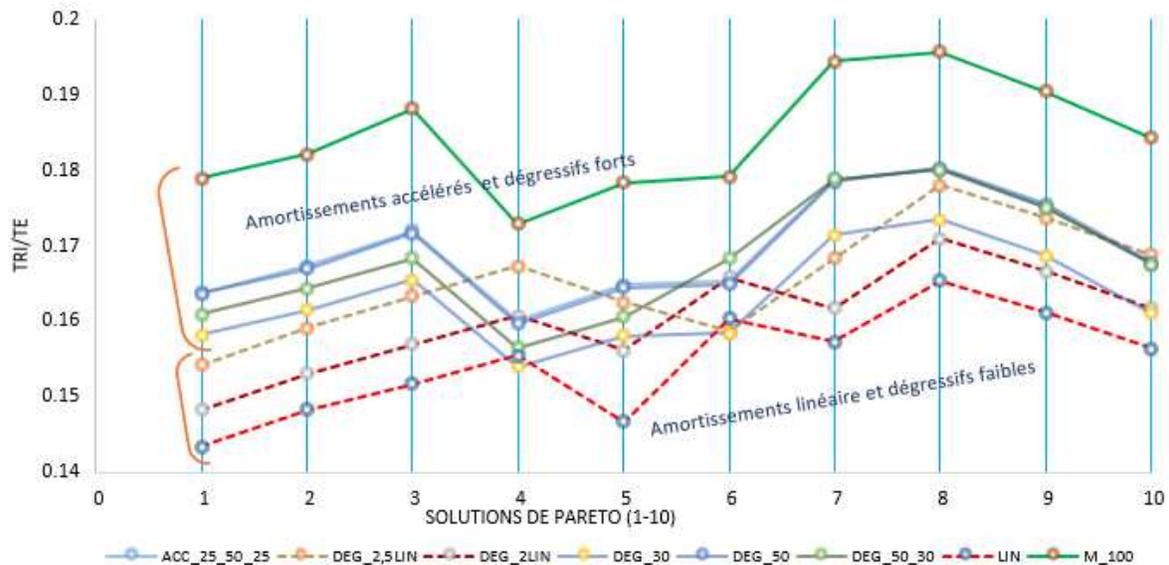
Tableau 4.5 : TRI, TE, TRI-TRI\_SCO et TE-TE\_SCO pour les différents scénarios au niveau des dix premières solutions de la frontière de Pareto (la couleur<sup>9</sup> change pour indiquer les zones favorables (couleur verte) ou défavorables (couleur rouge) selon l'indicateur)

	Taux de rentabilité interne (TRI)										Taux d'émission (TE)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ACC_25_50	18.71%	18.40%	18.39%	16.56%	16.42%	16.06%	16.57%	16.55%	16.18%	16.08%	1.142	1.100	1.069	1.034	0.996	0.972	0.926	0.919	0.924	0.960
DEG_2,5LIN	17.78%	17.68%	17.71%	17.83%	16.69%	15.65%	16.03%	16.62%	16.31%	15.91%	1.153	1.111	1.085	1.066	1.027	0.986	0.952	0.934	0.939	0.942
DEG_2LIN	17.09%	17.01%	17.02%	17.13%	16.04%	16.57%	15.40%	15.96%	15.64%	15.24%	1.153	1.111	1.085	1.066	1.027	0.999	0.952	0.934	0.939	0.942
DEG_30	18.06%	17.78%	17.72%	15.97%	15.81%	15.41%	15.91%	15.91%	15.53%	15.09%	1.142	1.100	1.071	1.037	1.000	0.973	0.928	0.917	0.921	0.937
DEG_50	18.68%	18.38%	18.37%	16.54%	16.41%	16.04%	16.55%	16.55%	16.18%	15.74%	1.142	1.101	1.070	1.036	0.997	0.973	0.927	0.917	0.922	0.938
DEG_50_30	18.37%	18.08%	18.03%	16.23%	16.06%	16.32%	16.57%	16.55%	16.18%	16.08%	1.142	1.100	1.071	1.037	1.000	0.969	0.926	0.919	0.924	0.960
LIN	16.53%	16.46%	16.47%	16.57%	15.04%	16.03%	15.02%	15.43%	15.11%	14.70%	1.153	1.110	1.085	1.066	1.025	0.999	0.955	0.933	0.937	0.940
M_100	20.44%	20.04%	20.10%	17.86%	17.77%	17.41%	18.00%	18.00%	17.63%	17.10%	1.142	1.100	1.069	1.033	0.996	0.971	0.926	0.920	0.926	0.928
TRI-TRI_SCO										TE-TE_SCO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ACC_25_50	2.17%	1.94%	1.92%	-0.01%	1.38%	0.04%	1.54%	1.12%	1.07%	1.39%	-0.011	-0.010	-0.016	-0.032	-0.029	-0.027	-0.028	-0.014	-0.013	0.020
DEG_2,5LIN	1.25%	1.22%	1.25%	1.27%	1.65%	-0.37%	1.00%	1.19%	1.20%	1.21%	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	-0.013	-0.003	0.001	0.001	0.002
DEG_2LIN	0.56%	0.54%	0.56%	0.56%	1.00%	-0.55%	0.37%	0.53%	0.53%	0.54%	0.000	0.001	-0.001	0.000	0.002	0.000	-0.003	0.001	0.001	0.002
DEG_30	1.53%	1.31%	1.26%	-0.59%	0.77%	-0.61%	0.89%	0.48%	0.42%	0.39%	-0.011	-0.010	-0.014	-0.028	-0.025	-0.026	-0.027	-0.016	-0.017	-0.003
DEG_50	2.15%	1.92%	1.91%	-0.02%	1.37%	0.02%	1.53%	1.11%	1.06%	1.04%	-0.011	-0.009	-0.015	-0.030	-0.028	-0.027	-0.027	-0.015	-0.016	-0.002
DEG_50_30	1.84%	1.62%	1.56%	-0.33%	1.02%	0.29%	1.54%	1.12%	1.07%	1.39%	-0.011	-0.010	-0.014	-0.029	-0.025	-0.030	-0.028	-0.014	-0.013	0.020
M_100	3.90%	3.58%	3.64%	1.29%	2.73%	1.38%	2.98%	2.57%	2.52%	2.40%	-0.011	-0.010	-0.017	-0.033	-0.029	-0.028	-0.029	-0.013	-0.012	-0.012
Ratio de la performance relative RPR (TRI/TE)										RPR-RPR_SCO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ACC_25_50	0.164	0.167	0.172	0.160	0.165	0.165	0.179	0.180	0.175	0.168	0.020	0.019	0.020	0.005	0.018	0.005	0.021	0.015	0.014	0.011
DEG_2,5LIN	0.154	0.159	0.163	0.167	0.163	0.159	0.168	0.178	0.174	0.169	0.011	0.011	0.012	0.012	0.016	-0.002	0.011	0.013	0.013	0.012
DEG_2LIN	0.148	0.153	0.157	0.161	0.156	0.166	0.162	0.171	0.167	0.162	0.005	0.005	0.005	0.005	0.009	0.005	0.004	0.006	0.005	0.005
DEG_30	0.158	0.162	0.165	0.154	0.158	0.158	0.171	0.174	0.169	0.161	0.015	0.013	0.014	-0.001	0.011	-0.002	0.014	0.008	0.007	0.005
DEG_50	0.164	0.167	0.172	0.160	0.164	0.165	0.178	0.180	0.175	0.168	0.020	0.019	0.020	0.004	0.018	0.005	0.021	0.015	0.014	0.011
DEG_50_30	0.161	0.164	0.168	0.157	0.161	0.168	0.179	0.180	0.175	0.168	0.017	0.016	0.017	0.001	0.014	0.008	0.021	0.015	0.014	0.011
LIN	0.143	0.148	0.152	0.155	0.147	0.160	0.157	0.165	0.161	0.156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_100	0.179	0.182	0.188	0.173	0.178	0.179	0.194	0.196	0.190	0.184	0.036	0.034	0.036	0.017	0.032	0.019	0.037	0.030	0.029	0.028

<sup>9</sup> L'analyse par les couleurs est utilisée pour faciliter la lecture des tables et identifier les zones hôtes sans confondre ça avec la théorie des couleurs utilisée en management ou en médecine (analyse par la méthode des couleurs).

#### 4.4.2.4. Impacts sur la performance relative

Pour affiner le résultat de l'analyse, on recourt au rapport des deux derniers indicateurs. Selon ce ratio, on peut associer les modes accélérés et dégressifs forts au choix de toutes les solutions de la frontière de Pareto. Toutefois, les solutions quatre à six sont les moins favorables selon ce ratio d'après la figure 4.5.



**Figure 4.5 :** TRI/TE pour les différents scénarios au niveau des dix premières solutions de la frontière de Pareto

Pour mettre en évidence la corrélation entre l'impact financier induit par les différents modes d'amortissements et l'aspect transactionnel entre les objectifs de la soutenabilité étudiés, on quantifie l'impact financier et on le met en exergue avec l'amélioration des performances économiques et environnementales.

#### 4.4.2.5. Impact financier

Pour analyser l'impact financier induit par l'application des modes d'amortissements dérogatoires on utilise deux indicateurs. Le premier c'est le gain d'impôt, permis par la déduction supplémentaire de l'amortissement fiscal ( $GI = TR.AFD$  (53)), alors que le deuxième c'est la perte sèche du trésor. On appelle perte sèche du trésor, la différence positive entre le gain d'impôt et le gain en profit net additionné à l'impôt supplémentaire payé par rapport au scénario de référence :

$(PST = GI - ([CFNA_{SC_i} - CFNA_{SC_0}] + TR[ACF_{SC_i} - ACF_{SC_0}]))$  (54));  $SC_i$  correspond au scénario  $i$  et  $SC_0$  est le scénario de référence. En effet, tout gain d'impôt pour le contribuable constitue une perte pour le trésor, mais la perte sèche constitue une charge publique non désiré par le preneur de décision public. Le tableau 4.6 quantifie la perte sèche du trésor, pour les différents modes d'amortissements, au niveau des solutions analysées.

**Tableau 4.6 :** Perte du trésor, par rapport au scénario de référence, au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto, pour tous les scénarios (Détail du calcul à l'annexe 4.B)

Perte du trésor (variation par rapport au SC_LIN)	DEG_2,5LIN	DEG_2LIN	DEG_30	DEG_50	DEG_50_30	ACC_25_50_25	M_100
1	(13)	(243)	18 194 525	18 194 675	18 195 465	18 195 308	18 195 183
2	(616 029)	(506 763)	17 568 100	17 314 364	17 874 171	17 744 767	17 736 423
3	220 972	349 378	20 688 939	21 379 753	20 793 999	22 398 484	22 749 925
4	(225 632)	74 523	29 714 086	30 631 778	29 967 302	32 073 112	32 693 404
5	1 790 345	1 335 660	29 570 001	31 432 243	29 622 206	33 461 905	34 441 983
6	7 993 187	681 996	35 468 103	37 845 795	26 139 170	40 294 453	41 726 964
7	3 689 162	3 164 938	26 702 579	27 916 520	30 632 785	30 632 785	31 872 653
8	1 128 393	1 289 469	25 812 062	26 499 991	29 469 717	29 469 717	30 944 925
9	2 258 994	2 078 266	29 081 310	30 310 066	33 688 438	33 688 438	35 734 323
10	3 389 596	2 867 063	32 350 558	34 120 141	40 717 867	40 717 867	40 523 722
Moyenne	1 962 898	1 133 429	26 515 026	27 564 533	27 710 112	29 867 684	30 661 950
Rang	2	1	3	4	5	6	7

L'analyse de la perte permet de distinguer, à priori, entre les modes d'amortissements qui impactent fortement le trésor de ceux qui l'impactent d'une façon plus modérée. Cet impact est corrélé, sans le dire, avec le schéma d'investissement lié au mode concerné. Les modes d'amortissements dégressifs faibles 2LIN et 2.5LIN impactent légèrement le trésor (perte respective de 1,1 et 2 Million \$ en moyenne par solution). Les pertes pour les modes d'amortissements forts varient entre 26,5 et 30,7 millions de \$ en moyenne par solution sur la période de l'horizon de planification. Le classement des différents modes, selon la préférence du décideur public, figure à la dernière ligne du tableau 4.6.

Pour avoir une idée plus complète sur le comportement des différents scénarios étudiés, nous présentons une matrice récapitulative illustrée par le tableau 4.7.

Nous retenons, pour chaque scénario, les indicateurs afférents au capital investi, le taux de rentabilité interne, le taux d'émission, le ratio de la performance relative et la perte du trésor. La moyenne des dix premières solutions de la frontière Pareto est prise en compte pour chaque scénario lors du calcul des indicateurs de la matrice.

**Tableau 4.7 : Impacts des différents modes d'amortissements**

Indicateurs/Scénarios	Modes d'amortissements							
	LIN	DEG_2LIN	DEG_2,5LIN	DEG_30	DEG_50	DEG_50_30	ACC_25_50_25	M_100
Capital investi (Million \$)	448,480	455,740	463,000	688,600	688,600	681,340	688,600	688,600
Capital Horizon (Million \$)	339,405	339,405	339,405	413,083	413,083	412,175	413,083	413,083
TRI	15,74%	16,31%	16,82%	16,32%	16,94%	16,85%	16,99%	18,43%
TE (en T CO2 éq. par 1000\$ CF)	1,020	1,021	1,019	1,003	1,002	1,005	1,004	1,001
TRI/TE	0,155	0,160	0,165	0,163	0,169	0,168	0,170	0,184
Perte du trésor (Millions \$)	0,000	1,133	1,963	26,515	27,565	27,710	29,868	30,662

La question qui se pose, si on se met au croisement des intérêts des partenaires publics-privés, concerne la justification de la perte du trésor lors de la pratique des modes d'amortissements dérogatoires. Pour répondre à cette question, on confronte, à la perte du trésor, le différentiel, par rapport au scénario de référence, des indicateurs de la matrice illustrée par le tableau 4.8.

Cette dernière matrice, confronte la perte du trésor aux impacts en termes de capital additionnel investi et en termes de différentiel de performance, à savoir l'amélioration de la rentabilité économique et environnementale des investissements.

En se référant à cette matrice, il est clair que le point d'équilibre entre les intérêts des partenaires public-privé se situe entre le mode dégressif 2LIN et le mode massif M\_100. Le premier a le plus faible impact sur le trésor, tout en améliorant la performance économique de l'entité en termes de capital investi et en termes de rentabilité économique, et le deuxième qui, malgré l'impact sur le trésor (perte 29 Millions de \$), permet un supplément d'investissement total de 240 million de \$ en plus d'une amélioration générale en termes de soutenabilité.

**Tableau 4.8 : Perte du trésor et impacts sur le capital investi et sur la performance économique-environnementale en matière d'investissement**

Scénarios	Variation de la perte du trésor (Millions \$)	Variation du taux de rentabilité interne	Variation du taux d'émission	variation du capital investi (Million \$)	Variation du capital Horizon (Million \$)
DEG_2LIN	1.133	0.57%	0.000	7	0
DEG_2,5LIN	1.963	1.09%	-0.001	15	0
DEG_30	26.515	0.58%	-0.018	240	74
DEG_50	27.565	1.21%	-0.018	240	74
DEG_50_30	27.710	1.11%	-0.016	233	73
ACC_25_50_25	29.868	1.26%	-0.016	240	74
M_100	30.662	2.70%	-0.019	240	74

Ce premier niveau d'analyse a permis de classer les différents scénarios selon différents critères et indicateurs. Toutefois, une analyse plus approfondie englobera d'autres aspects qui décrivent davantage le comportement du système vis-à-vis de la structure des investissements par technologie et selon la capacité de production, le taux de déchet recyclé, l'approvisionnement par voie de conversion et le taux d'intégration interne. Ces analyses peuvent dévoiler d'autres soucis de la soutenabilité.

#### 4.4.2.6. Autres impacts à analyser

Il s'agit des impacts relatifs au taux d'intégration interne (intégration verticale) et au taux de recyclage des déchets. En effet, les aspects relatifs à l'intégration interne et au recyclage total de la biomasse sont considérés comme attributs intrinsèques aux bioraffineries de deuxième génération. Selon ces critères, les modes dégressifs faibles n'ont pas d'effet positif sur le taux d'intégration en biogaz. Toutefois, les modes accélérés et dégressifs forts améliorent le taux d'intégration du biogaz de 100% par rapport au scénario de référence. Quant au recyclage des déchets, les modes accélérés et dégressifs forts améliorent, selon le même ordre de 16% à 35%, la valorisation des boues papetières par la digestion anaérobie. Cette amélioration est liée au besoin de l'intégration interne du biogaz pour approvisionner l'unité de cogénération comme illustré par le tableau 4.9.

**Tableau 4.9 :** Taux d'intégration interne et taux de recyclage des déchets selon les différents scénarios (les valeurs correspondent à la moyenne des dix premières solutions de la frontière de Pareto)

	Taux de recyclage des déchets	Taux d'intégration interne des produits finis	
		Biogaz	Électricité
ACC_25_50_25	34.6%	9.1%	50.9%
DEG_2,5LIN	15.7%	4.1%	51.3%
DEG_2LIN	16.0%	4.2%	51.3%
DEG_30	34.7%	9.3%	51.0%
DEG_50	34.7%	9.2%	51.0%
DEG_50_30	34.6%	9.1%	50.7%
LIN	15.8%	4.2%	51.3%
M_100	34.5%	9.3%	51.1%

### **4.4.3. Interprétation**

#### **- Choix des solutions soutenables et planification des investissements**

Chaque mode d'amortissement est lié à un schéma d'investissement sous-jacent qui représente la décision stratégique en matière de la planification des investissements bioénergétiques. En outre, chaque solution de la frontière de Pareto manifeste une décision différente qui obéit à la logique transactionnelle entre les objectifs des différents aspects de la soutenabilité. Les indicateurs de la soutenabilité changent d'une solution à l'autre et d'un mode d'amortissement à l'autre. Notre objectif est d'explicitier les attributs des différentes solutions, en termes d'impacts, pour clarifier les implications des différents choix. Ceci permet de localiser la solution qui répond aux attentes des décideurs et de négocier le mode d'amortissement assorti au contexte intrinsèque de l'entité microéconomique en question.

Le tableau figurant à l'annexe 4.C décrit les schémas d'investissement selon les modes d'amortissements, les technologies, les cycles d'investissement, la capacité et le capital total investi pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto. Le choix d'un schéma d'investissement, pour un mode d'amortissement bien déterminé, implique des conséquences en termes de soutenabilité, de sécurité énergétique et de synergie avec l'activité incubatrice. Ce qui permet à l'investisseur ou au décideur d'avoir un outil d'aide à la décision qui relie les différents aspects de l'investissement en termes de coût (capital investi), de charge environnemental (émission de GES et rejet des déchets), de performance économique (rentabilité interne), de mode de dépréciation (type d'amortissement), de planning d'implémentation (cycle d'investissement ou d'augmentation de la capacité de production par technologie) afin de planifier l'investissement soutenable. Il suffit ainsi, d'établir une liaison entre le schéma d'investissement et les implications en termes d'investissement (sous-section 4.4.2.1), de performance économique (sous-section 4.4.2.2), d'émission (sous-section 4.4.2.3), de performance relative (sous-section 4.4.2.4) et d'impact financier sur le trésor (sous-section 4.4.2.5) pour avoir une idée sur la solution la plus adaptée au contexte de l'activité incubatrice. En outre, le décideur public trouve dans l'analyse financière toutes les implications des décisions fiscales, en termes d'amortissement dérogatoire, sur le choix

d'investissement en bioénergie. Ce qui permet de nouer un partenariat constructif avec les décideurs du secteur des P&P.

D'après les tableaux 4.7 et 4.8, on peut déduire que les modes d'amortissements accélérés et dérogatoires forts impactent négativement le trésor mais ils permettent, en revanche, une amélioration notable en matière du capital investi qui atteint 240 Million de \$ par rapport au mode linéaire, soit une amélioration de 54%. Le capital relatif à l'horizon de planification atteint 74 Million de \$ soit une augmentation de 21.7%. Selon (Park, 2016), les résultats de l'application du raccourcissement des périodes de récupération de l'amortissement, impliquent une augmentation relative des investissements de 15% à 23%. En outre, ces types d'amortissements diminuent l'émission et le taux de rejet des déchets. Toutefois, la performance économique a été améliorée d'une façon générale pour les modes dégressifs forts et les modes accélérés notamment le mode Massif M\_100. Le scénario DEG\_50\_30 est le mode applicable actuellement au Canada pour l'investissement bioénergétiques. Ce dernier impacte fortement le trésor public et présente les avantages des modes d'amortissements dégressifs forts. Le mode concerné permet une réduction des émissions de l'ordre de 16 kg CO<sub>2</sub> eq. Par 1000\$ de CF en plus de l'augmentation de la performance économique des investissements de 1.1%.

**- Outil pour le choix d'investissement soutenable en fonction du mode d'amortissement et du ratio de la performance relative**

**▪ Présentation de l'outil de choix**

Au titre des dix premières solutions de la frontière de Pareto, le plan d'affaires dépend du mode d'amortissement appliqué. Le plan d'investissement, les indicateurs de performance en dépendent aussi. Le choix du mode d'amortissement, pour une solution bien déterminée, implique ainsi le choix d'un contexte avec tous les attributs relatifs au plan d'affaires.

Comment choisir un plan d'affaires soutenable en tenant compte du choix d'investissement et du mode d'amortissement fiscal y afférent ? Nous présentons, pour répondre à cette question, un outil qui permet de nous guider au choix convenable.

Dans un contexte multi-objectif :

- On identifie la frontière de Pareto ;
- On calcule la matrice TRI/TE pour les différentes solutions et amortissements y afférents (lignes (solutions de la frontière de Pareto) et colonnes (modes d'amortissements) ou le contraire) ;
- On choisit les limites pour les différents niveaux d'acceptation de la solution (Non recommandé, peu recommandé, recommandé, très recommandé) en se basant sur les valeurs de la matrice ;
- On applique ce choix à la matrice TRI/TE (Le résultat permet de marquer tous les éléments de la matrice avec (Non recommandé, peu recommandé, recommandé, très recommandé) ;
- Pour chaque solution choisie de la matrice (ligne ou colonne selon le cas) il y avait un schéma d'investissement et un plan d'affaires différents.

▪ **Application de l'outil de choix**

- La frontière de Pareto (pour toutes les solutions) est donnée par le tableau suivant :

**Tableau 4.10 :** Frontière de Pareto (objectif économique et environnemental par solution et par mode d'amortissement)

Frontière de Pareto	ACC_25_50_25		DEG_2,5LIN		DEG_2LIN		DEG_30		DEG_50		DEG_50_30		LIN		M_100	
	Émission	CFNA & SV	Émission	CFNA & SV	Émission	CFNA & SV	Émission	CFNA & SV	Émission	CFNA & SV	Émission	CFNA & SV	Émission	CFNA & SV	Émission	CFNA & SV
1	2115084	593602000	2107700,9	552380000	2107704,5	545321000	2115096,1	580974000	2115093,8	593192000	2106449,3	587120000	2107700,8	534830000	2106453,7	601192000
2	1929755,2	563412421,1	1920285,4	524069105	1919807,3	517249368	1928759,2	551166053	1929656,3	562971368	1918923,8	556988579	1917589,8	507310526	1921186	570584421
3	1772042,7	53222842,1	1776422,3	495758211	1775832,3	489177737	1775364,6	521358105	1772448,5	532750737	1766665,1	526857158	1777450	479791053	1762297,8	539976842
4	1627710,6	503083263,2	1641651,4	467447316	1640804,5	461106105	1633247,2	491550158	1628088,8	502530105	1623914,8	496725737	1641014,8	452271579	1616526	509369263
5	1470447,5	472843684,2	1499632,4	439136421	1500965,4	433034474	1478737	461742211	1471137,3	472309474	1470657,6	466594316	1505399,9	424752105	1459332,4	478761684
6	1333029	442645105,3	1358591,3	410825526	1358885,1	404962842	1340942,2	431934263	1333547	442088842	1332680,1	436462895	1360667,7	397232632	1320976,9	448154105
7	1188078,4	412464526,3	1216176,2	382514632	1217655,2	376891211	1192370,4	402126316	1188073,4	411868211	1184053,7	406331474	1223180,9	369713158	1176747	417546526
8	1080745,7	382274947,4	1096800,2	354203737	1096525,2	348819579	1082128,2	372318368	1080409,4	381647579	1074068,4	376200053	1098727,2	342193684	1071199,7	386938947
9	988283,26	352085368,4	1006219,4	325892842	1006502,5	320747947	990661,16	342510421	987874,51	351426947	982762,65	346068632	1009657,5	314674211	978702	356331368
10	909834,2	321895789,5	921082,14	297581947	921995,76	292676316	912829,57	312702474	909465,98	321206316	904913,85	315937211	926551,45	287154737	900348,69	325723789
11	827110,2	291706210,5	849277,04	269271053	850488,81	264604684	831136,32	282894526	826431,32	290985684	823239,84	285805789	855537,6	259635263	817209,18	295116211
12	754797,76	261516631,6	772924,88	240960158	775142,68	236533053	759151,15	253086579	754216,37	260765053	751095,08	255674368	782527,14	232115789	743330,77	264508632
13	683865,74	231327052,6	706119,43	212649263	708526,87	208461421	688336,52	223278632	683176,8	230544421	680168,37	225542947	716302,2	204596316	673451,59	233901053
14	616370,41	201137473,7	642261,52	184338368	644897,1	180389789	620585,11	193470684	615747,15	200323789	613009,09	195411526	653087,83	177076842	607005,89	203293474
15	549184,53	170947894,7	577954,36	156027474	579444,42	152318158	552179,49	163662737	548544,19	170103158	547399,07	165280105	586496,6	149557368	542171,68	172685895
16	478773,96	140758315,8	508287,5	127716579	511229,56	124246526	482387,52	133854789	478096,33	139882526	477548,61	135148684	520277,03	122037895	472000,68	142078316
17	410264,99	110568736,8	443277,72	99405684	444710,24	96174895	416125,94	104046842	409519,75	109661895	410932,05	105017263	456930,28	94518421	402616,69	111470737
18	343481,02	80379157,89	379334,91	71094789	381218,28	68103263	348930,69	74238895	342700,17	79441263	347250,01	74885842	394583,05	66998947	335623,04	80863158
19	279941,17	50189578,95	318102,02	42783895	320464,57	40031632	285989,11	44430947	279130,22	49220632	283349,94	44754421	334196,19	39479474	271786,01	50255579
20	226927,61	20000000	267081,12	14473000	271837,12	11960000	234503,97	14623312	227544,62	19648505	232040,54	14623312	278375,86	11960000	220424,04	19648505

- On calcule la matrice TRI/TE pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto :

**Tableau 4.11:** Matrice TRI/TE pour les dix premières solutions de la frontière de Pareto par mode d'amortissement

TRI/TE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ACC_25_50_25	0,164	0,167	0,172	0,160	0,165	0,165	0,179	0,180	0,175	0,168
DEG_2,5LIN	0,154	0,159	0,163	0,167	0,163	0,159	0,168	0,178	0,174	0,169
DEG_2LIN	0,148	0,153	0,157	0,161	0,156	0,166	0,162	0,171	0,167	0,162
DEG_30	0,158	0,162	0,165	0,154	0,158	0,158	0,171	0,174	0,169	0,161
DEG_50	0,164	0,167	0,172	0,160	0,164	0,165	0,178	0,180	0,175	0,168
DEG_50_30	0,161	0,164	0,168	0,157	0,161	0,168	0,179	0,180	0,175	0,168
LIN	0,143	0,148	0,152	0,155	0,147	0,160	0,157	0,165	0,161	0,156
M_100	0,179	0,182	0,188	0,173	0,178	0,179	0,194	0,196	0,190	0,184

c. Choix des limites pour les différents niveaux d'acceptation de la solution

Ce choix, pour le cas d'application en l'occurrence, est systématique selon l'outil de mise en forme d'Excel. Toutefois, on peut spécifier manuellement les limites pour les niveaux de choix adoptés.

d. Application des niveaux d'acceptation à la matrice TRI/TE

Le résultat permet de marquer tous les éléments de la matrice avec (Non recommandé, peu recommandé, recommandé, très recommandé) comme illustré par le tableau 4.12.

IRR/ER	Méthodes de dépréciation							
Frontière de Pareto	ACC_25_50_25	DEG_2,5LIN	DEG_2LIN	DEG_30	DEG_50	DEG_50_30	LIN	M_100
1	0.164	0.154	0.148	0.158	0.164	0.161	0.143	0.179
2	0.167	0.159	0.153	0.162	0.167	0.164	0.148	0.182
3	0.172	0.163	0.157	0.165	0.172	0.168	0.152	0.188
4	0.160	0.167	0.161	0.154	0.160	0.157	0.155	0.173
5	0.165	0.163	0.156	0.158	0.164	0.161	0.147	0.178
6	0.165	0.159	0.166	0.158	0.165	0.168	0.160	0.179
7	0.179	0.168	0.162	0.171	0.178	0.179	0.157	0.194
8	0.180	0.178	0.171	0.174	0.180	0.180	0.165	0.196
9	0.175	0.174	0.167	0.169	0.175	0.175	0.161	0.190
10	0.168	0.169	0.162	0.161	0.168	0.168	0.156	0.184

**Tableau 4.12 :** Matrice TRI/TE avec les préférences de choix de la solution optimale

e. Schéma d'investissement et plan d'affaires correspondant au choix de la solution et du mode d'amortissement convenable

On remarque que le choix d'une solution dépend du mode d'amortissement du fait que la performance relative change d'un mode d'amortissement à l'autre. D'après cette matrice, le mode massif est très recommandé pour toutes les solutions. En outre, on constate que le mode linéaire et les modes dégressifs faibles sont les moins recommandés. Toutefois,

pour chaque solution on peut choisir le mode d'amortissement selon le niveau de recommandation y assigné.

À titre d'exemple, le choix de la solution trois peut se faire avec le mode Massif (très recommandé), le mode accéléré AC\_25\_50\_25 (recommandé) et le mode dégressif DEG\_50 (recommandé). Les autres modes sont peu recommandés ou non recommandés.

Si notre préférence cadre avec le mode accéléré AC\_25\_50\_25, notre plan d'affaires sera déterminé conformément à ce choix. Le plan d'affaires englobe les décisions stratégiques liées au choix du schéma d'investissement avec toutes les déclinaisons tactiques sur la planification de la production, de l'énergie et des émissions.

L'outil présenté permet de guider le preneur de décision au choix du mode d'amortissement en connivence avec le choix de la solution optimale. Ce choix se base sur le ratio de la performance relative qui détermine le niveau de performance économique-environnementale du schéma d'investissement concerné au niveau de chaque solution selon le mode d'amortissement appliqué.

Le schéma d'investissement relatif à la solution concernée (technologie, capacité de production, cycle d'investissement et capital total investi) figure au tableau 4.13.

**Tableau 4.13** : Schéma d'investissement par solution pour le mode d'amortissement accéléré 25-50-25

Mode amort	Technologie cycle	Cogénération (C: Capacité en MWh; K: Capital en M de \$)										Digestion A. (C: Capacité en M de mc; K: Capital en M de \$)										Fermentation (C: Capacité en M de L; K: Capital en M de \$)										Total Capital investi		
		1		2		3		4		Total		1		2		3		4		Total		1		2		3		4		Total				
		C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K			
ACC_25_50_25	Solution Pareto																																	
	1	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	90	109	0	0	30	36	0	0	120	145	761		
	2	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	60	73	30	36	0	0	0	0	90	109	725		
	3	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	60	73	0	0	0	0	30	36	90	109	725		
	4	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	0	0	60	73	0	0	30	36	90	109	725		
	5	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	0	0	30	36	0	0	60	73	90	109	725		
	6	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	0	0	0	0	0	0	30	36	60	73	90	109	725
	7	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	0	0	0	0	0	0	30	36	30	36	652		
	8	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	616	
	9	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	616	
10	40	150	0	0	0	0	60	226	100	376	0	0	80	160	40	80	0	0	120	240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	616		

Les résultats du modèle permettent de déterminer tous les détails possibles des flux physiques, financiers, énergétiques et d'émission relatifs aux différentes voies de conversion et différents produits au titre de chaque année de la période de l'horizon de planification.

Nous constatons, en guise de conclusion pour cette étape d'analyse, que l'hypothèse sur l'amélioration de l'investissement des modes d'amortissements dérogatoires peut ne pas être rejetée. De même, il est clair qu'il y avait une corrélation positive entre le mode

d'amortissement et la soutenabilité de l'intégration des BRFI. Ce constat permet de ne pas rejeter l'hypothèse qui suppose que les incitations fiscales en matière des amortissements dérogatoires améliorent la performance de la soutenabilité. La question qui se pose est donc, à quel niveau le décideur public va accepter, en accordant un mode d'amortissement dérogatoire, de transiger la moins-value de financement public avec l'amélioration de la soutenabilité du secteur de P&P qui désire intégrer la production bioénergétique. La résolution de cette question contribue à baliser le partenariat public-privé pour améliorer la soutenabilité du secteur des P&P vue le rôle escompté du secteur dans la réussite de la stratégie de transition énergétique à côté de son rôle historique dans le développement socioéconomique régional.

#### **4.5. Conclusion**

Dans le présent chapitre, une analyse a été menée pour démystifier l'impact d'un confort de trésorerie permis par l'application des modes d'amortissements dérogatoires sur la soutenabilité et l'investissement en bioénergie. Les résultats de l'analyse confirment le non rejet des hypothèses selon lesquelles les modes d'amortissements dérogatoires améliorent positivement la soutenabilité de l'investissement en bioénergie et impactent positivement le capital investi. Les analyses ont mis en évidence, en outre, l'importance du mode d'amortissement dérogatoire applicable actuellement par la législation fiscale sur l'investissement bioénergétique au sens des catégories 43 et 53 publiées par les folios d'impôt de l'Agence du Revenu du Canada.

L'analyse fiscale apporte des éclaircissements aux preneurs de décision en relatant la synergie entre les décisions d'incitation à l'investissement et l'évaluation de la soutenabilité de l'investissement en bioénergie. En outre, cette discipline met en évidence le partenariat public-privé. En effet, le partenaire privé vise à maximiser la rentabilité des investissements en matière de *cash-flow* tout en se conformant aux règles de l'aménagement de l'environnement. En revanche, le preneur de décision à l'échelle macroéconomique vise à minimiser les dégâts pour le trésor et à maximiser la soutenabilité des entités microéconomiques. Ainsi, la question qui se pose concerne l'identification du point d'équilibre entre les d'intérêts des deux acteurs. A quel niveau le décideur public puisse payer

pour améliorer la soutenabilité en termes de performance économique, environnementale et sociale ? Ou autrement, à quel niveau le public intervient, auprès du privé, pour soutenir une performance élevée au niveau de la durabilité ? Au point d'équilibre des intérêts, on définit le prix de soutenabilité que doit payer le partenaire public pour promouvoir l'objectif socioéconomique et environnemental assuré par le privé.

Il va sans dire, qu'il faut considérer implicitement la répercussion sociale induite par la prospérité économico-environnementale et son poids dans la soutenabilité. Pour un secteur impliqué dans la stratégie de transition énergétique à côté des implications socioéconomiques tout au long de l'histoire de l'industrie canadienne, il est impérativement recommandé de considérer le partenariat public-privé lors de la discussion de l'évaluation de la soutenabilité de l'investissement en bioénergie. En fait, les zones de protection de la soutenabilité sont balisées en fonction du rôle assigné au secteur concerné dans la stabilité économique et sociale, la consommation des ressources renouvelables, la transition vers la production des énergies propres et le respect de l'environnement et des écosystèmes.

L'application des mesures favorables à l'investissement constitue un engagement proactif de partenariat public pour faire conférer au secteur des conditions favorables à la soutenabilité selon un plan d'affaires robuste. Il est à signaler ainsi que la soutenabilité du secteur reste un sujet difficile à traiter notamment au niveau de son évaluation. Toutefois, l'analyse approfondie des différents aspects, en connivence avec les différents partenaires, permet de baliser les chemins qui puissent faciliter l'acheminement des indicateurs d'impact des différents aspects locaux de la soutenabilité vers les aspects globaux et de gouvernance. Il est à considérer, à ce propos, les spécificités sectorielles, le degré de l'engagement du secteur public et la potentialité du secteur de P&P à jouer un rôle favorable pour conforter les zones de protection de la soutenabilité (santé humaine, justice sociale, stabilité économique et respect de l'environnement).

## Chapitre 5 : Conclusion générale

Ce travail n'a pas la prétention d'être complet surtout qu'on traite avec un concept compliqué et dont les attributs ne sont pas suffisamment démystifiés. Nous pouvons dire même qu'il s'agit d'un effort qui s'inscrit dans le cadre des initiations à l'intégration d'une méthode pour évaluer la soutenabilité des réseaux de création de valeur pour la planification stratégique des investissements bioénergétiques. Dans une première section, nous résumons nos contributions objet des chapitres deux, trois et quatre. Quant à la deuxième section, nous faisons allusion aux idées qui incitent à instaurer un partenariat constructif avec le décideur public à côté des consignes à considérer lors de l'établissement d'un compromis entre les aspects de la soutenabilité. Une dernière sous-section sera réservée à la présentation de certaines limites du présent travail et aux perspectives de dépassement pour pousser vers une méthode d'évaluation de la soutenabilité des bioraffineries forestières intégrées.

### 5.1. Résumé des contributions

Notre travail de recherche propose d'évaluer la soutenabilité que peut se voir conférer une entité, initialement non soutenable, qui incube un modèle par définition soutenable. Il s'agit des compagnies de P&P, souffrant de crise de soutenabilité, qui peuvent réduire l'utilisation de l'énergie fossile en exploitant les déchets industriels de leurs usines tout en diversifiant leurs activités en intégrant la production bioénergétique dans le cadre des bioraffineries de deuxième génération. Notre hypothèse centrale, pour traiter l'évaluation de l'opportunité d'intégrer les bioraffineries aux P&P, était de vérifier si l'intégration de bioraffinerie de deuxième génération, définie comme soutenable de fait, puisse conférer ce label au secteur de P&P qui souffre déjà d'une crise chronique de soutenabilité? La vérification de ladite hypothèse passe par la confection d'une méthode d'évaluation de la soutenabilité qui soit, robuste, convaincante et suffisamment explicités aux preneurs de décision à différents niveaux.

Toutefois, l'absence de méthodes normatives d'évaluation constitue un handicap pour parfaire cette mission. Il s'agit de la problématique qui lui manque des heuristiques

convenables pour être solutionnée. La fameuse citation de George Box<sup>10</sup> « Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles » exprime bien la situation actuelle de l'évaluation de la soutenabilité.

Notre contribution, pour aborder cette problématique, s'aligne aux efforts de l'école normative qui considère que la méthode LCA, devenue suffisamment mature au niveau de son application, peuvent servir de cadre pour incuber, sous l'égide de l'approche cycle de vie, les autres aspects de la soutenabilité. L'examen de la revue de littérature montre un manque flagrant au niveau des cas pratiques pour l'évaluation de la soutenabilité selon les initiatives de l'école normative.

Avant de répondre au résultat de l'hypothèse de départ, nous présentons les contributions objet de ce travail de recherche. Ces contributions, détaillées à la sous-section '1.6.' du chapitre premier, apportent de nouvelles approches méthodologiques d'aide à la décision pour accompagner efficacement la transformation soutenable des P&P vers la production bioénergétique. Les résultats obtenus amènent de nouvelles réflexions sur l'évaluation de la soutenabilité du réseau de création de valeur pour le secteur et constituent des initiatives pour analyser l'environnement réaliste des affaires impliquant le partenariat public-privé.

Du point de vue méthodologique, notre premier apport se situe au niveau de l'intégration de l'approche cycle de vie pour évaluer la composante environnementale dans l'optimisation du réseau de création de valeur. Une planification de l'énergie et des émissions est proposée pour enrichir le système d'information, gérer la comptabilité environnementale et faciliter l'exécution des exigences déclaratives prescrites par la réglementation sur l'émission des GES. Le deuxième apport concerne l'introduction d'outil d'analyse pour démystifier l'interaction entre les aspects disparates de la soutenabilité en vue de rationaliser le niveau transactionnel entre ces aspects. Un ratio de performance relative a été proposé et

---

<sup>10</sup> George Edward Pelham Box, né le 18 octobre 1919 à Gravesend, Kent et mort le 28 mars 2013 à Madison, Wisconsin, est un statisticien, qui a apporté d'importantes contributions aux domaines du contrôle qualité, des séries temporelles et de l'inférence bayésienne.

appliqué, entre autres indicateurs, pour classer les solutions sur la frontière de Pareto au niveau de la phase d'évaluation d'impact. Ce ratio met en évidence la synergie des aspects conflictuels étudiés à savoir, la performance économique de l'investissement et son impact sur l'environnement.

L'apport méthodologique majeur se situe au niveau de l'adoption de l'approche analytique par scénario pour expliciter d'une part l'interaction entre les objectifs locaux conflictuels de la soutenabilité dans un environnement incertain et d'autre part l'interaction au niveau du partenariat public-privé dans l'environnement des affaires. Cette dernière interaction permet de retracer les lignes de démarcation, dans le cadre de la responsabilité sociétale, pour réussir la mutation soutenable du secteur. La fiscalité, souvent négligée au niveau des analyses de recherche, est une discipline transversale qui met en évidence le partenariat du preneur de décision à l'échelle microéconomique avec celui de la politique macroéconomique. Nos contributions, proposent l'analyse du coût d'interventionnisme public pour assurer la performance soutenable du privé à travers l'instrument fiscal. Ainsi, le choix de l'investissement couplé avec le choix de sa façon de dépréciation fiscale offre à l'investisseur une visibilité plus complète sur les conséquences pratiques de l'investissement dans le domaine bioénergétique. En outre, l'analyse fiscale a permis de renforcer la robustesse du modèle en mettant clairement en évidence l'aspect transactionnel entre l'aspect économique et environnemental.

Notre dernier apport concerne l'adoption de la méthode émergente LCSA comme cadre de l'évaluation de la soutenabilité, en respectant formellement les étapes de cette méthode au titre des deux objectifs évalués. L'optimisation multi-objectif a été considérée comme partie intégrante de la phase d'évaluation d'impacts pour cette méthode.

Le résultat des différentes contributions confirme d'une part que la conception de bioraffinerie économiquement performante et à faible émission de GES est possible pour les P&P canadiens. Toutefois, il est à signaler que l'équilibre énergétique interne et l'indépendance aux carburants à base de combustibles fossiles constituent la clé de voute pour un plan d'affaires soutenable réussi. D'autre part, pour la configuration de la bioraffinerie, on considère que l'intégration de la production de l'éthanol lignocellulosique nécessite un partenariat public-privé avancé allant de la restructuration du marché jusqu'à

l'homologation des prix de vente de l'éthanol. Pour la cogénération, l'implémentation d'une capacité de 40 MW est raisonnable pour le cas des P&P canadiens dans le contexte du présent cas d'étude. Enfin, pour la digestion anaérobie, il faut tenir compte du contexte d'approvisionnement en déchets municipaux tout en évitant la concurrence avec les projets de méthanisation.

Dans nos contributions nous avons démontré que les tendances de recherche, traitant les problématiques du secteur des P&P, convergent avec les intentions du décideur public concernant l'intégration de la production bioénergétique. En effet, le décideur public considère le secteur de P&P comme composante de la stratégie fédérale de développement durable responsable de la réussite de la stratégie de transition énergétique. En plus que le rôle socioéconomique et de développement régional du secteur fait de lui un patrimoine prioritaire bien soutenu à l'échelle nationale. Ce constat nous a permis de travailler sur le niveau de partenariat à travers l'approche analytique. L'analyse de sensibilité et l'analyse d'impact des modes d'amortissements dérogatoires mettent en évidence l'importance des incitations économiques et fiscales pour l'amélioration de la performance générale de la soutenabilité lors de la planification des investissements bioénergétiques. A travers ces approches analytiques bien explicitées on a fourni aux preneurs de décision à l'échelle microéconomique et au niveau de la gouvernance des éclaircissements fondés afin de baliser le partenariat public-privé indispensable pour réussir un plan d'affaires soutenable pour l'intégration des bioraffineries.

Concernant la neutralisation des éventuelles interactions entre les aspects étudiés, nous avons considéré que le niveau d'interférence est faible entre l'aspect économique et environnemental. En effet il est assez compliqué de déterminer une corrélation directe à part la taxation écologique qui peut affecter le revenu ou bien les impacts environnementaux à long terme qui peuvent affecter l'activité économique selon le niveau de respect de l'environnement et des écosystèmes. Pour le niveau transactionnel des aspects étudiés, nous avons approfondi l'analyse multicritère en touchant les différents aspects de l'activité pour faire le classement des solutions à la frontière de Pareto. Il revient ainsi au décideur de choisir la solution qui convient avec le contexte de l'entité concerné. L'interprétation du résultat ne se limite pas à présenter les attributs de la configuration soutenable de la BRFI mais initie au

fondement d'un partenariat conscient qui considère la responsabilité sociétale pour réussir la planification de la production bioénergétique par le secteur des P&P. La figure 5.1 résume la démarche méthodologique adoptée tout au long des trois derniers chapitres. Cette démarche a le mérite de respecter les étapes reconnues pour la méthode LCA telle que modelé, par l'école normative dans (Valdivia et al., 2013), pour la méthode LCSA.

A propos de l'hypothèse de départ, Cette hypothèse n'est pas à rejeter ni à accepter. En effet, dans notre démarche, nous avons démontré que l'intégration de la production bioénergétique, selon la configuration initiale proposée, procure à l'activité incubatrice des améliorations certaines sur plusieurs plans. Sur le plan économique, la diversification de la production et l'ouverture aux marchés permet en l'occurrence de conforter la trésorerie et la rentabilité interne. Sur le plan environnemental, l'indépendance de l'énergie à base de combustibles fossiles permet de diminuer substantiellement l'émission des GES. En outre, la valorisation en biogaz des boues papetières a diminué le rejet des déchets organiques dans l'hydrosphère. La confirmation de la viabilité économique et écologique de l'intégration de l'éthanol lignocellulosique permet de contrecarrer la production des agro-carburants à partir de l'amidon ou des plantes sucrières qui menacent la sécurité alimentaire. Toutefois, la configuration finale de la bioraffinerie dépend de l'ensemble des voies de conversion proposée, des alternatives de choix envisagés concernant les technologiques, les capacités de production et les modes d'intégration verticale et du contexte intrinsèque à l'activité incubatrice. En effet, la bioraffinerie forestière n'est pas un standard mais plutôt une configuration à concevoir en respectant certaines caractéristiques dont l'autosuffisance énergétique et le recyclage total de la biomasse.

De ce qui précède, il est difficile de se prononcer sur l'acceptabilité de l'hypothèse de soutenabilité de l'intégration des bioraffineries forestières au sein des P&P. En effet, sachant que la soutenabilité est une notion globale, il est judicieux de se poser la question sur l'exploitation des forêts pour des raisons énergétiques à grande échelle. Il s'agit d'une question complexe tant que la soutenabilité demeure un concept multidisciplinaire et difficile à mettre en œuvre.

Sous le contexte de la soutenabilité, les décisions politiques stimulent en général l'exploitation et la valorisation des ressources forestières sous prétexte qu'elles sont

renouvelables. Cependant, la nature et l'étendue des biens et services de l'écosystème forestier à valoriser s'opère dans un contexte d'incertitude vue la complexité de l'évaluation de l'impact sur l'environnement de l'exploitation de ces ressources. Il suffit de rappeler qu'il est attribué à la forêt des enjeux écologiques (conservation de la biodiversité végétale et animale, régulation des ressources en eau, stockage du carbone, etc.), sociaux (amélioration des conditions de vie des populations qui en dépendent, valorisation des connaissances traditionnelles, maintien de l'existence de ces écosystèmes pour les générations futures, etc.) qu'économiques (production et exploitation des ressources ligneuses, source de revenus pour les populations locales, etc.). C'est la gouvernance qui peut avoir une visibilité plus globale sur ces questions et qui est habilitée à se prononcer sur le potentiel d'exploitation des ressources forestières en fonction des contraintes du développement durable. Le renouvellement des ressources ainsi que l'acceptation sociale des projets de bioraffinage pour des raisons énergétiques constituent deux éléments à en tenir compte. Nous rappelons que la capacité de régénération des ressources et d'assimilation des rejets doivent être considérées comme un capital naturel selon Daly (1990). L'échec de maintenir cette capacité doit être traitée comme consommation de capital, et donc une atteinte à la soutenabilité. La gouvernance peut admettre de tels principes lors du traitement avec le dossier de soutenabilité dans le cas d'espèce.

En outre, la mise en œuvre de l'interaction entre le niveau local et global pour valider la durabilité des projets d'intégration de BRFI nécessite une gouvernance se basant sur un ensemble d'heuristiques pour solutionner la situation de crise du secteur de P&P tout en cadrant avec les exigences de la cause sociale, du respect des écosystèmes et de l'aménagement de l'environnement selon la série des normes ISO 14000. Des modèles systémiques sont requis pour étudier les impacts à long terme sur les zones de protection de la soutenabilité pour les projets objet de ce travail.

## **5.2. Idées à retenir pour repenser l'évaluation de la soutenabilité des BRFI**

L'objectif de l'évaluation de la soutenabilité de l'intégration des BRFI au niveau de la composante technologie, capacité de production et période d'implémentation vise la planification soutenable des investissements bioénergétiques. Contribuer à concevoir cette planification à travers des outils d'aide à la décision, revient à fournir au preneur de décision

un modèle robuste garni de tous les outils d'analyse et les éclaircissements nécessaires pour assurer une intégration réussite des BRFI. Nous voulons signaler en l'occurrence certains points de réflexion à propos de l'évaluation de la soutenabilité. Le premier point concerne l'interaction entre le niveau global et local de la soutenabilité pour le cas du secteur des P&P. quant au deuxième point il concerne les consignes pour traiter les conflits des aspects qui composent la soutenabilité.

- La soutenabilité, comme démontré au premier chapitre, est une notion qui doit obéir à la règle 'penser globalement et agir localement'. Ainsi, l'interaction entre le niveau macroéconomique et le niveau microéconomique est à démystifier sans perdre de vue que la 'pensée globale' dépasse beaucoup le niveau macroéconomique. L'ampleur de la position de l'entité microéconomique au niveau macroéconomique détermine le rôle potentiel attribué à l'entité concernée par le décideur de la politique économique. Ce rôle, s'il est convenablement défini, retrace le niveau de partenariat avec le preneur de décision au niveau macroéconomique. Ce partenariat peut procurer à l'entité microéconomique un certain nombre d'avantages traduisant la part de l'interventionnisme public dans l'instauration de la soutenabilité. Les preneurs de décision au niveau microéconomique doivent avoir pleinement conscience de ce partenariat pour modeler l'interaction entre les niveaux micro et macro-économique en leur faveur. La responsabilité sociétale (ISO 26000) peut servir de cadre pour concrétiser les ententes entre les partenaires des deux niveaux cités. Ainsi, l'aspect analytique doit définir ce niveau de partenariat et outiller suffisamment les preneurs de décision pour promouvoir leur niveau de conscience à ce propos. L'interventionnisme public peut toucher la restructuration, le contrôle et la réglementation des marchés, la fiscalité et les incitations aux investissements, le marché financier et la bourse des valeurs mobilières, la législation sociale etc. En fait, la soutenabilité est une approche globale qui ne peut être défini seulement au niveau microéconomique. Le défi à ce niveau concerne la modélisation des aspects de ce partenariat pour délivrer aux preneurs de décision un produit conforme au contexte réel et éligible à l'action de la gouvernance ;
- La soutenabilité ne peut être conçue comme le résultat d'un simple compromis transactionnel entre les aspects disparates qui la compose, mais plutôt comme

l'articulation de ces aspects pour acquérir une meilleure position de l'entité microéconomique dans les zones de protection de la soutenabilité. L'éligibilité à la transaction suppose le respect au moins de deux consignes. La première consigne concerne la neutralisation préalable des interactions entre les différents aspects, avant de discuter de la transaction, afin d'assurer la transparence de l'évaluation. La deuxième consigne concerne la motivation suffisante de l'éligibilité transactionnelle entre les aspects concernés.

La première consigne pose un problème majeur avec l'aspect social qui interfère trop avec les aspects environnementaux et économiques. Pour la deuxième consigne elle pose un problème sérieux entre l'aspect économique et environnemental ou la monétisation de l'aspect environnemental à travers la taxation, l'échange en bourse des droits d'émission reste très insuffisant pour motiver l'aspect transactionnel.

### **5.3. Perspectives de recherche**

Comme tout travail de recherche, nos contributions présentent certaines limites. Il s'agit des limites imputées au système évalué, à la méthode d'évaluation dont le modèle et sa résolution ainsi qu'à l'analyse de l'inventaire. Aux vues de ces limites, il est judicieux de présenter de nouvelles idées sous forme de perspectives de recherche.

L'objectif recherché est d'améliorer les techniques métrologiques d'évaluation de la soutenabilité afin de pousser vers la normalisation de cette méthode tout en considérant les spécificités du secteur forestier. La définition de nouveaux protocoles intrinsèques à l'évaluation de la soutenabilité de l'industrie forestière paraît une urgence à considérer.

#### **- Concernant le système évalué**

On est parti, concernant le système à évaluer, d'une configuration initiale limitée à trois voies de conversion dont l'une concurrente à l'activité incubatrice au niveau de l'approvisionnement en biomasse, soit la production de l'éthanol. En outre, l'imposition de l'équilibre énergétique interne renforce la position de l'activité incubatrice qui approvisionne la production énergétique et impose des limites à la production de l'éthanol. Ce dernier se trouve pénalisé par sa performance relative de soutenabilité par rapport aux autres voies de conversion. Afin d'alléger cette contrainte pour la voie éthanol, il est possible d'éliminer

l'hypothèse sur l'autosuffisance énergétique ou bien de prévoir une nouvelle ligne pour approvisionner la cogénération. Pour cette dernière proposition, il est possible de choisir entre la combustion directe des résidus de biomasses ou bien d'intégrer une voie thermochimique de gazéification qui permet d'approvisionner la cogénération en gaz synthétique. Dans ce dernier cas, l'évaluation de l'extraction de l'hémicellulose à partir de la liqueur noire pour la fermentation en éthanol et la séparation de la lignine comme coproduit devient une alternative à évaluer.

Cette nouvelle configuration, qui considère l'ouverture de la production énergétique à l'approvisionnement extérieur, va renforcer l'indépendance du système à l'égard de l'activité incubatrice. Cette dernière activité encourt en conséquence des risques d'existence notamment si le marché de pâtes commerciales continue à se dégrader. Ainsi, pour trouver l'équilibre entre l'intégration de l'éthanol lignocellulosique et le maintien de l'activité incubatrice il faut jouer, d'une part, sur le degré d'indépendance de la voie cogénération à l'égard de l'activité incubatrice et d'autre part, sur la contrainte de satisfaction en énergie imposé par le modèle. En fait, ce sont les attributs de la voie cogénération qui vont influencer et articuler la configuration de la bioraffinerie.

#### - **A propos de la méthode d'évaluation**

A propos de la méthode d'évaluation il est à signaler les limites suivantes :

- La méthode proposée, pour évaluer la soutenabilité, intègre l'approche cycle de vie pour l'évaluation de l'aspect environnemental. Toutefois, cette approche n'est pas observée par l'aspect économique faute d'un inventaire dédié difficile à satisfaire ;
- La profondeur de l'inventaire environnemental est limitée au calcul de l'impact sur le changement climatique. Pour étendre l'évaluation à d'autres catégories d'impacts environnementaux, il faut chercher une profondeur qui offre le détail requis sur les émissions. En outre, l'utilisation du modèle GREET, pour définir la charge environnementale de certains types de biomasses ainsi que la charge de leur transport, fait un proxy à l'inventaire utilisé et limite ainsi les analyses, au titre des phases gérées par ce modèle, aux paramètres des émissions élémentaires offerts par agrégation ;

- L'absence d'une définition explicite des zones de protection de la soutenabilité pose un problème majeur pour évaluer cette notion. En effet, l'absence de la délimitation de ces zones fait de l'évaluation de la soutenabilité une question floue au niveau des résultats. Pour décider de l'évaluation de la soutenabilité, on se rabat aux analyses des améliorations constatées à propos du taux d'émission, de la diminution des rejets et de l'indépendance aux carburants à base de combustibles fossiles pour statuer sur une configuration présumée soutenable.

Au niveau des perspectives d'évaluation de la soutenabilité d'intégration des bioraffineries de deuxième génération dans les P&P, il est recommandé :

- Que les travaux de recherche s'alignent davantage aux tendances normatives, et ce, en accentuant les analyses du contexte de soutenabilité au niveau de chaque aspect tout en évitant les compromis des indicateurs de performance pour statuer sur la soutenabilité. En effet, la résolution des modèles d'optimisation multiobjectif diffère de celle des modèles qui optimisent la soutenabilité, en dépit du fait que ces derniers soient multiobjectif de fait ;
- De multiplier les cas d'application des esquisses de la méthode émergente LSCA en respectant l'approche cycle de vie pour évaluer des différents aspects de la soutenabilité ;
- D'intégrer la composante sociale et économique de la soutenabilité en respectant l'approche cycle de vie, et ce, en affinant la profondeur de l'analyse d'inventaire pour promouvoir la méthode LCSA déjà en cours de standardisation :
  - ✓ L'intégration de l'aspect social pour l'évaluation de la soutenabilité doit aborder les questions relatives à l'acceptabilité sociale des projets de bioraffinage et la consommation des ressources renouvelables et non renouvelables dans le cadre du respect des écosystèmes ;
  - ✓ Intégrer l'évaluation économique selon l'approche cycle de vie pour la phase manufacturière, la phase de distribution et le recyclage.
- De baliser le cheminement des indicateurs d'impacts vers les zones de protection de la soutenabilité. Les zones de protection intrinsèques au cas du sujet étudié sont aussi à définir en fonction des spécificités du secteur et de son rôle dans la

stabilité économique, la justice sociale, la santé humaine et le respect de l'environnement et des écosystèmes.

En plus des recommandations de recherche liées à l'amélioration de la méthode LCSA, le modèle doit intégrer les interactions potentielles entre les partenaires pour enrichir l'approche analytique. En effet, pour faire de l'outil d'aide à la décision une preuve scientifique capable de baliser un partenariat positif et conscient dans le cadre de la gouvernance du secteur, il est judicieux de tenir compte de :

- La modélisation de la fiscalité directe (imposition des revenus des sociétés), indirecte (différentes taxes sur la consommation et l'importation grevant les acquisitions et les achats ainsi que les ventes) et des avantages fiscaux (crédits d'impôt, exonérations, suspension de taxes, amortissements dérogatoires, incitation à l'épargne, etc.) ;
- Modélisation des interventions socio-économiques accordées sous forme d'avantages à l'emploi, de restructuration de marchés (administration des prix ou mandats pour le mélange de bioéthanol dans la gazoline), subvention d'équipement ou d'exploitation etc. ;
- La prise en compte du taux de rémunération du capital. En effet, dans le modèle on doit distinguer entre l'apport propre et le financement externe afin d'établir le taux de rémunération du capital en fonction de l'origine du financement. Cette défalcation permet d'étendre l'analyse aux marchés financiers où le taux d'intérêt bancaire influence les risques d'investissement. L'équilibre entre le financement propre et l'emprunt en fonction du taux d'intérêt bancaire influence le taux d'actualisation de l'entreprise. Sachant, en fait, que le marché financier est un partenaire de taille qui influence la stabilité socioéconomique à travers le financement des investissements et la création de l'emploi. En effet, les projets d'investissement en bioraffineries sont coûteux et le montage d'un schéma de financement représente le handicap le plus sérieux. Il faut ainsi promouvoir des outils d'aide à l'investissement tout en faisant allusion aux schémas de financement et au choix des modes de dépréciation en plus du choix des technologies propres et la capacité de production.

- **Concernant la résolution du modèle**

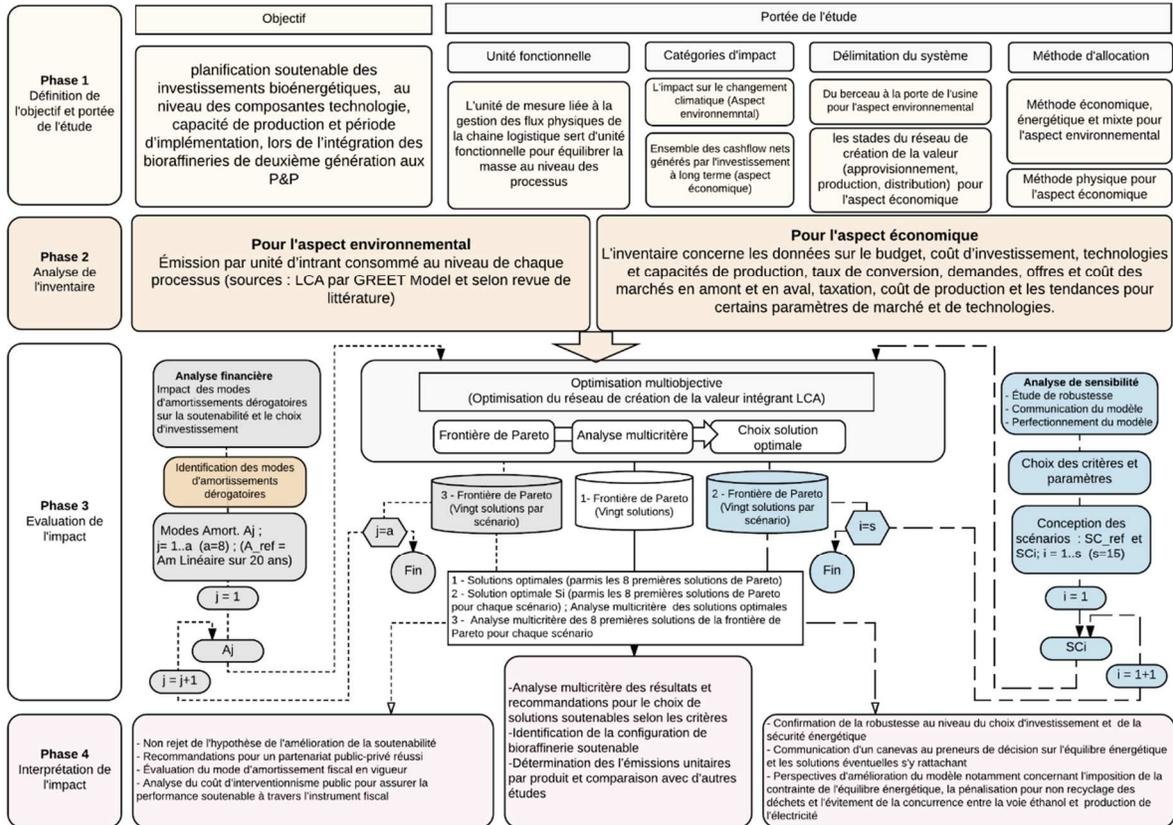
- L'intégration économique verticale des bioraffineries touche à la linéarité du modèle qui passe à la forme quadratique dès qu'une variable de décision se transforme en paramètre pour caractériser l'émission d'un intrant dans un processus bien déterminé. Le cas frappant est la valeur des émissions unitaires des produits énergétiques (électricité et chaleur) qui deviennent des paramètres lors de la consommation de ces intrants dans les autres processus de conversion. Pour continuer à se servir des solveurs dédiés aux modèles linéaires, il faut résoudre la question de non-linéarité ;
- Concernant le nombre de solutions de la frontière de Pareto, on a limité le choix de ce nombre à vingt puis aux dix premières solutions au niveau des analyses selon les motivations avancées au chapitre deux. Le choix de la qualité des solutions de Pareto peut être amélioré en détectant les seuils de changement de la décision d'investissement à la baisse. Ces points de changement correspondent à un niveau de rentabilité élevé.

- **Concernant l'analyse de l'inventaire**

L'analyse de l'inventaire est une étape fondamentale pour parfaire l'évaluation de la soutenabilité. Cette étape nécessite le développement de protocoles de calcul des émissions intégrant :

- La spécificité régionale de la biomasse et de la logistique de transport disponible en termes de charge environnementale ;
- L'identification des processus de conversion de la biomasse concernant les différentes activités de l'industrie forestière dont les bioraffineries ;
- La spécification de la consommation en intrants énergétique par processus ainsi que l'identification de l'origine de la production énergétique et des carburants utilisés par région ;
- Les sources des autres intrants et leurs empreintes environnementales ;
- La spécification des méthodes d'allocation entre produits, coproduits et déchets ainsi que leur taux de recyclage.

L'élaboration de ces protocoles et inventaires facilitera la recherche, réduira les divergences flagrantes entre les chercheurs et orientera les efforts vers l'apport scientifique au niveau de la confection des outils d'aide à la décision.



**Figure 5.1** : Application du modèle conceptuel pour l'évaluation de la planification soutenable de la production bioénergétique au sein des P&P avec le respect des phases de la méthode LCSA

# Références bibliographiques

1. Abboud, S., Aschim, K., Bagdan, B., Partha, S., Hongqi, Y., Brent, S., Christian, F., Shahrzad, R., Louis, M., Alberta Research Council, Canadian Gas Association, 2010. Potential Production of Methane from Canadian Wastes. *Alta. Innov. – Technol. Futur.*
2. Adkins, R., Paxson, D., 2013. The effect of tax depreciation on the stochastic replacement policy. *Eur. J. Oper. Res.* 229, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.050>
3. Agi, M.A.N., Nishant, R., 2017. Understanding influential factors on implementing green supply chain management practices: An interpretive structural modelling analysis. *J. Environ. Manage.* 188, 351–363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.081>
4. Alex Marvin, W., Schmidt, L.D., Benjaafar, S., Tiffany, D.G., Daoutidis, P., 2012. Economic Optimization of a Lignocellulosic Biomass-to-Ethanol Supply Chain. *Chem. Eng. Sci., Dynamics, Control and Optimization of Energy Systems* 67, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.055>
5. Ali, M., Sreekrishnan, T.R., 2001. Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. *Adv. Environ. Res.* 5, 175–196. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(00\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00055-1)
6. Amaeshi, K.M., Osuji, O.K., Nnodim, P., 2008. Corporate Social Responsibility in Supply Chains of Global Brands: A Boundaryless Responsibility? Clarifications, Exceptions and Implications. *J. Bus. Ethics* 81, 223–234. <https://doi.org/10.1007/s10551-007-9490-5>
7. Andiappan, V., Ko, A.S.Y., Lau, V.W.S., Ng, L.Y., Ng, R.T.L., Chemmangattuvalappil, N.G., Ng, D.K.S., 2015. Synthesis of sustainable integrated biorefinery via reaction pathway synthesis: Economic, incremental environmental burden and energy assessment with multiobjective optimization. *AIChE J.* 61, 132–146. <https://doi.org/10.1002/aic.14616>
8. Ansari, Z.N., Qureshi, M.N., 2015. Sustainability in supply chain management: an overview. *IUP J Supply Chain Manag* 24–46.
9. Arnaud, D., H. Ilbert, R. Mongruel, S. France, 1993. pour le progrès de l’homme, Biodiversité: le fruit convoité, ECLM. ed.
10. Bajpai, P., 2013a. Chapter 1 - Biorefinery Concept, in: Bajpai, P. (Ed.), *Biorefinery in the Pulp and Paper Industry*. Academic Press, Boston, pp. 1–9.
11. Bajpai, P., 2013b. Chapter 2 - Biorefinery Opportunities in the Pulp and Paper Industry\*, in: Bajpai, P. (Ed.), *Biorefinery in the Pulp and Paper Industry*. Academic Press, Boston, pp. 11–15.
12. Bajpai, P., 2012. *Integrated Forest Biorefinery*, in: *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*. Springer US, pp. 375–402.
13. Barla, P., 2007. ISO 14001 certification and environmental performance in Quebec’s pulp and paper industry. *J. Environ. Econ. Manag.* 53, 291–306. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2006.10.004>
14. Bautista, S., Narvaez, P., Camargo, M., Chery, O., Morel, L., 2016. A new hierarchical sustainability assessment framework of PC&I for biodiesel production – Part I. *Ecol. Indic.* 60, 84–107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.020>

15. Benali, M., Ajao, O., Jaaidi, J., Gilani, B., Mansoornejad, B., 2016. Integrated Lignin-Kraft Pulp Biorefinery for the Production of Lignin and Its Derivatives: Economic Assessment and LCA-Based Environmental Footprint, in: Fang, Z., Jr, R.L.S. (Eds.), *Production of Biofuels and Chemicals from Lignin, Biofuels and Biorefineries*. Springer Singapore, pp. 379–418. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1965-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1965-4_13)
16. Berglin, N., Berntsson, T., 1998. CHP in the pulp industry using black liquor gasification: thermodynamic analysis. *Appl. Therm. Eng.* 18, 947–961. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00038-6)
17. Boukherroub, T., LeBel, L., Ruiz, A., 2017. A framework for sustainable forest resource allocation: A Canadian case study. *Omega, New Research Frontiers in Sustainability* 66, Part B, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.10.011>
18. Boukherroub, T., Ruiz, A., Guinet, A., Fondrevelle, J., 2015. An integrated approach for sustainable supply chain planning. *Comput. Oper. Res.* 54, 180–194. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.09.002>
19. Brinkman, N., Wang, M., 2005. Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems — A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions. Argonne Natl. Lab.
20. Brundtland Commission, 1987. Our Common Future, also known as the Brundtland Report, from the United Nations World Commission on Environment and Development was published in 1987. Oxford University Press.
21. Budsberg, E., Crawford, J., Gustafson, R., Bura, R., Puettmann, M., 2015. Ethanologens vs. acetogens: Environmental impacts of two ethanol fermentation pathways. *Biomass Bioenergy* 83, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.019>
22. Budzianowski, W.M., Postawa, K., n.d. Total Chain Integration of sustainable biorefinery systems. *Appl. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.050>
23. California Environmental Protection Agency - Air Resources Board, S.S.D., 2009. Detailed California-Modified GREET Pathway for Cellulosic Ethanol from Forest Waste.
24. Cambero, C., Sowlati, T., Pavel, M., n.d. Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. *Chem. Eng. Res. Des.* <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.040>
25. Cardona-Valdés, Y., Álvarez, A., Ozdemir, D., 2011. A bi-objective supply chain design problem with uncertainty. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol., Freight Transportation and Logistics (selected papers from ODYSSEUS 2009 - the 4th International Workshop on Freight Transportation and Logistics)* 19, 821–832. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.04.003>
26. Carter, C.R., Jennings, M.M., 2004. The Role of Purchasing in Corporate Social Responsibility: A Structural Equation Analysis. *J. Bus. Logist.* 25, 145–186. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2004.tb00173.x>
27. CEPI- Confederation of European Paper Industries, 2011. A manifesto for competitiveness and employment. *Eur. Pulp Pap. Ind.*
28. CGA Canadian Gas Association, 2014. Feuille de route technologique sur le gaz naturel renouvelable pour le Canada.

29. Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M., 2012. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *Int. J. Prod. Econ., Advances in Optimization and Design of Supply Chains* 135, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.025>
30. Chauhan, S.S., Frayret, J.-M., LeBel, L., 2009. Multi-commodity supply network planning in the forest supply chain. *Eur. J. Oper. Res.* 196, 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.024>
31. Cherubini, F., 2010. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Convers. Manag.* 51, 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
32. Collette, Y., Siarry, P., 2003. *Multiobjective optimization : principles and case studies.* Springer, Berlin.
33. Consonni, S., Katofsky, R.E., Larson, E.D., 2009. A gasification-based biorefinery for the pulp and paper industry. *Chem. Eng. Res. Des.* 87, 1293–1317. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.07.017>
34. Cortés, E., Rivera, W., 2010. Exergetic and exergoeconomic optimization of a cogeneration pulp and paper mill plant including the use of a heat transformer. *Energy* 35, 1289–1299. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.011>
35. Daly, H.E., 1990. Toward some operational principles of sustainable development. *Ecol. Econ.* 2, 1–6. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(90\)90010-R](https://doi.org/10.1016/0921-8009(90)90010-R)
36. D'Amours, S., Carle, M.-A., Rönnqvist, M., 2014. Pulp and Paper Supply Chain Management, in: Borges, J.G., Diaz-Balteiro, L., McDill, M.E., Rodriguez, L.C.E. (Eds.), *The Management of Industrial Forest Plantations.* Springer Netherlands, pp. 489–516.
37. Doonan, J., Lanoie, P., Laplante, B., 2005. Determinants of environmental performance in the Canadian pulp and paper industry: An assessment from inside the industry. *Ecol. Econ.* 55, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.017>
38. Edwards, R., Larivé Concawe, J.-F., Beziat, J.-C., Eucar, R./, 2011. Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context WELL-to-WHEELS Report. JRC Sci. Tech. Rep. <https://doi.org/doi:10.2788/79018>
39. Ekşioğlu, S.D., Acharya, A., Leightley, L.E., Arora, S., 2009. Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Comput. Ind. Eng.* 57, 1342–1352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.003>
40. El-Halwagi, M., Linninger, A. (Eds.), 2009. *Design for Energy and the Environment: Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design.* CRC Press.
41. Eriksson, H., Harvey, S., 2004. Black liquor gasification—consequences for both industry and society. *Energy* 29, 581–612. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.09.005>
42. Farmer, M.C., 2005. The adaptable integrated biorefinery for existing pulp mills. *TAPPI Eng. Pulping Environ. Conf.*
43. Femminis, G., 2008. Risk-aversion and the investment–uncertainty relationship: The role of capital depreciation. *J. Econ. Behav. Organ.* 65, 585–591. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2006.03.003>

44. Fernando, S., Adhikari, S., Chandrapal, C., Murali, N., 2006. Biorefineries: Current Status, Challenges, and Future Direction. *Energy Fuels* 20, 1727–1737. <https://doi.org/10.1021/ef060097w>
45. Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J. Environ. Manage.* 91, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
46. Friedrich, E., Trois, C., 2016. Current and future greenhouse gas (GHG) emissions from the management of municipal solid waste in the eThekweni Municipality – South Africa. *J. Clean. Prod.* 112, Part 5, 4071–4083. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.118>
47. Galbe, M., Wallberg, O., Zacchi, G., 2011. 6.47 - Techno-Economic Aspects of Ethanol Production from Lignocellulosic Agricultural Crops and Residues, in: Moo-Young, M. (Ed.), *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*. Academic Press, Burlington, pp. 615–628. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00298-1>
48. Gauthier, F., Archibald, F., 2001. The Ecology of “fecal indicator” bacteria commonly found in Pulp and paper mill water systems. *Water Res.* 35, 2207–2218. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00506-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00506-6)
49. Ghezzaz, H., Stuart, P., 2011. Biomass availability and process selection for an integrated forest biorefinery. *Pulp Pap. Can.* 112, 19–26.
50. Giarola, S., Zamboni, A., Bezzo, F., 2012. Environmentally conscious capacity planning and technology selection for bioethanol supply chains. *Renew. Energy* 43, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.011>
51. Goortani, B.M., Mateos-Espejel, E., Paris, J., 2010. Integration of a cogeneration unit into a kraft pulping process. *Appl. Therm. Eng.* 30, 2724–2729. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.026>
52. Haanaes, K., Michael, D., Jurgens, J., Rangan, S., 2013. Making sustainability profitable. *Harv Bus Arev* 91, 110–115.
53. Hacatoglu, K., McLellan, P.J., Layzell, D.B., 2010. Production of bio-synthetic natural gas in Canada. *Environ. Sci. Technol.* 44, 2183–2188. <https://doi.org/10.1021/es901561g>
54. Hahn, H., Hartmann, K., Böhle, L., Wachendorf, M., 2015. Comparative life cycle assessment of biogas plant configurations for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresour. Technol.* 179, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.007>
55. Han, J., Elgowainy, A., Ignasi, P.-R., Dunn, J.B., Wang, M.Q., 2011. Well-to-Wheels Analysis of Fast Pyrolysis Pathways with GREET.
56. Henriques, A., Richardson, J., 2004. *The triple bottom line, does it all add up? assessing the sustainability of business and CSR*. Earthscan, London; Sterling, VA.
57. Hofmann Kay H., Theyel Gregory, Wood Craig H., 2012. Identifying Firm Capabilities as Drivers of Environmental Management and Sustainability Practices – Evidence from Small and Medium-Sized Manufacturers. *Bus. Strategy Environ.* 21, 530–545. <https://doi.org/10.1002/bse.739>

58. Huang, H.-J., Lin, W., Ramaswamy, S., Tschirner, U., 2009. Process Modeling of Comprehensive Integrated Forest Biorefinery—An Integrated Approach. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 154, 26–37. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8478-7>
59. Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Al-Dajani, W.W., Tschirner, U., 2010. Process modeling and analysis of pulp mill-based integrated biorefinery with hemicellulose pre-extraction for ethanol production: A comparative study. *Bioresour. Technol.* 101, 624–631. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.092>
60. IEA, 2008. IEA (International Energy Agency) Bioenergy Task 42 on Biorefineries. Minutes of the third Task meeting, Copenhagen, Denmark.
61. Jackson, S.B., (Kelvin) Liu, X., Cecchini, M., 2009. Economic consequences of firms' depreciation method choice: Evidence from capital investments. *J. Account. Econ.* 48, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.jacceco.2009.06.001>
62. Jean-Paul, G., 2014. L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIER SON INFLUENCE SUR LE DÉVELOPPEMENT DE LOCALITÉS AU QUÉBEC. *PRINTEMPS 2014* 43–51.
63. Jeurissen, R., 2000. John Elkington, Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. *J. Bus. Ethics* 23, 229–231. <https://doi.org/10.1023/A:1006129603978>
64. Karikallio, H., Mäki-Fränti, P., Suhonen, N., 2011. Competition in the global pulp and paper industries – An evaluation based on three approaches. *J. For. Econ.* 17, 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2010.09.004>
65. Karlsson, H., 2014. Biorefinery Systems for Energy and Feed Production - Greenhouse Gas Performance and Energy Balances. Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala - Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences Department of Energy and Technology.
66. Karlsson, H., Börjesson, P., Hansson, P.-A., Ahlgren, S., 2014. Ethanol production in biorefineries using lignocellulosic feedstock – GHG performance, energy balance and implications of life cycle calculation methodology. *J. Clean. Prod.* 83, 420–427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.029>
67. Keating, A.S., L. Zimmerman, J., 1999. Depreciation-policy changes: tax, earnings management, and investment opportunity incentives. *J. Account. Econ.* 28, 359–389. [https://doi.org/10.1016/S0165-4101\(00\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S0165-4101(00)00004-5)
68. Keller, H., Rettenmaier, N., Reinhardt, G.A., 2015. Integrated life cycle sustainability assessment – A practical approach applied to biorefineries. *Appl. Energy* 154, 1072–1081. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.095>
69. Kloepffer, W., 2008. Life cycle sustainability assessment of products. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 89–95. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
70. Koowattananachai, N., Wang, J., Charles, M.B., 2012. The merits of accelerated depreciation for promoting investment in clean transport technologies: A simulation study in the Australian rail freight industry. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 17, 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.06.007>
71. Kovacs, T.G., Martel, P.H., Voss, R.H., 2002. Assessing the biological status of fish in a river receiving pulp and paper mill effluents. *Environ. Pollut.* 118, 123–140. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00205-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00205-6)

72. Küpper, H.-U., Pedell, B., 2016. Which asset valuation and depreciation method should be used for regulated utilities? An analytical and simulation-based comparison. *Util. Policy* 40, 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.05.001>
73. Laan, T., Litman, T.A., Steenblik, R., 2009. BIOFUELS – AT WHAT COST? Government support for ethanol and biodiesel in Canada One of a series of reports addressing subsidies for biofuels in selected OECD countries. For the Global Subsidies Initiative (GSI) of the International Institute for Sustainable Development (IISD).
74. Lee, C.-F., Lee, A.C. (Eds.), 2006. Accelerated Depreciation, in: *Encyclopedia of Finance*. Springer US, pp. 4–4. [https://doi.org/10.1007/0-387-26336-5\\_7](https://doi.org/10.1007/0-387-26336-5_7)
75. Lee, S.-Y., 2015. The effects of green supply chain management on the supplier's performance through social capital accumulation. *Supply Chain Manag. Int. J.* 20, 42–55. <https://doi.org/10.1108/SCM-01-2014-0009>
76. Lehoux, N., LeBel, L., Elleuch, M., 2016. Benefits of inter-firm relationships: application to the case of a five sawmills and one paper mill supply chain. *INFOR Inf. Syst. Oper. Res.* 54, 192–209. <https://doi.org/10.1080/03155986.2016.1197538>
77. Lélé, S.M., 1991. Sustainable development: A critical review. *World Dev.* 19, 607–621. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(91\)90197-P](https://doi.org/10.1016/0305-750X(91)90197-P)
78. Leroy, M., Derroire, G., Vendé, J., Leménager, T., 2013. La gestion durable des forêts tropicales De l'analyse critique du concept à l'évaluation environnementale des dispositifs de gestion La gestion durable des forêts tropicales, Collection A Savoir. Agence Francaise de Développement (AFD).
79. Liew, W.H., Hassim, M.H., Ng, D.K.S., 2014. Review of evolution, technology and sustainability assessments of biofuel production. *J. Clean. Prod., Special Volume: PSE Asia for Cleaner Production* 71, 11–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.006>
80. Lin, T., Rodríguez, L.F., Shastri, Y.N., Hansen, A.C., Ting, K.C., 2014. Integrated strategic and tactical biomass–biofuel supply chain optimization. *Bioresour. Technol.* 156, 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.121>
81. Lundberg, V., Bood, J., Nilsson, L., Axelsson, E., Berntsson, T., Svensson, E., 2014. Converting a kraft pulp mill into a multi-product biorefinery: techno-economic analysis of a case mill. *Clean Technol. Environ. Policy* 16, 1411–1422. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0741-8>
82. Lythcke-Jorgensen, C., Haglind, F., 2015. Design Optimization of a Polygeneration Plant Producing Power, Heat, and Lignocellulosic Ethanol. *Energy Convers. Manag.* 353–366.
83. Machani, M., Nourelfath, M., D'Amours, S., 2015. A scenario-based modelling approach to identify robust transformation strategies for pulp and paper companies. *Int. J. Prod. Econ.* 168, 41–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.006>
84. Machani, M., Nourelfath, M., D'Amours, S., 2014a. A mathematically-based framework for evaluating the technical and economic potential of integrating bioenergy production within pulp and paper mills. *Biomass Bioenergy* 63, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.024>
85. Machani, M., Nourelfath, M., D'Amours, S., 2014b. A mathematically-based framework for evaluating the technical and economic potential of integrating bioenergy production

- within pulp and paper mills. *Biomass Bioenergy* 63, 126–139.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.024>
86. Machani, M., Nourelfath, M., D'Amours, S., 2013. A decision-support tool for evaluating the technical and economic potential of integrating bioenergy production within pulp and paper mills. CIRRELT.
  87. Magni, C.A., 2016. Capital depreciation and the underdetermination of rate of return: A unifying perspective. *J. Math. Econ.* 67, 54–79.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmateco.2016.09.007>
  88. Mahmood, T., Elliott, A., 2006. A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry. *Water Res.* 40, 2093–2112.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.04.001>
  89. Mansoornejad, B., Chambost, V., Stuart, P., 2010. Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Comput. Chem. Eng., Selected papers from the 7th International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design (FOCAPD, 2009, Breckenridge, Colorado, USA.* 34, 1497–1506.  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.02.004>
  90. Mansoornejad, B., Pistikopoulos, E.N., Stuart, P.R., 2013. Scenario-based strategic supply chain design and analysis for the forest biorefinery using an operational supply chain model. *Int. J. Prod. Econ.* 144, 618–634. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.029>
  91. Marinova, M., Mateos-Espejel, E., Jemaa, N., Paris, J., 2009. Addressing the increased energy demand of a Kraft mill biorefinery: The hemicellulose extraction case. *Chem. Eng. Res. Des., Special Issue on Biorefinery Integration* 87, 1269–1275.  
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.04.017>
  92. Martel, P., Kovacs, T., 1997. A comparison of the potential of primary- and secondary-treated pulp and paper mill effluents to induce mixed function oxygenase (MFO) activity in fish. *Water Res.* 31, 1482–1488. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00398-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00398-3)
  93. Mavrotas, G., 2009. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Appl. Math. Comput.* 213, 455–465.  
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
  94. McCarthy, P., Lei, L., 2010. Regional demands for pulp and paper products. *J. For. Econ.* 16, 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2009.11.001>
  95. McKechnie, J., JiaXin, C., Vakalis, D., MacLean, H., 2014. Energy use and greenhouse gas inventory model for harvested wood product manufacture in Ontario. *Clim. Change Res. Rep. - Ont. For. Res. Inst.*
  96. Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III, W.W., 1972. *The limits to growth.* Universe Books, USA.
  97. Meepetchdee, Y., Shah, N., 2007. Logistical network design with robustness and complexity considerations. *Int. J. Phys. Distrib. Log. Manage.* 201–222.
  98. Mentzer John T., DeWitt William, Keebler James S., Min Soonhong, Nix Nancy W., Smith Carlo D., Zacharia Zach G., 2011. Defining supply chain management. *J. Bus. Logist.* 22, 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>

99. Mohammadi, M., Najafpour, G.D., Younesi, H., Lahijani, P., Uzir, M.H., Mohamed, A.R., 2011. Bioconversion of synthesis gas to second generation biofuels: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 4255–4273. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.124>
100. Moshkelani, M., Marinova, M., Perrier, M., Paris, J., 2013. The forest biorefinery and its implementation in the pulp and paper industry: Energy overview. *Appl. Therm. Eng., Combined Special Issues: ECP 2011 and IMPRES 2010* 50, 1427–1436. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.038>
101. Mota, B., Gomes, M.I., Carvalho, A., Barbosa-Povoa, A.P., 2015. Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *J. Clean. Prod., Decision-support models and tools for helping to make real progress to more sustainable societies* 105, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>
102. Naqvi, M., Yan, J., Dahlquist, E., 2010. Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review. *Bioresour. Technol.* 101, 8001–8015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.013>
103. NCASI, 2011. Greenhouse gas and non-renewable energy benefits of black liquor recovery. Technical Bulletin No. 984. Research Triangle Park, N.C. Natl. Council. Air Stream Improv. Inc.
104. NCASI, 2005. Calculation Tools for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Wood Product Facilities 172.
105. Negny, S., 2004. Principaux aspects économiques liés aux forêts tropicales, in: IDDRI (Ed.), . Iddri-AfD, Paris.
106. Neugebauer, S., Forin, S., Finkbeiner, M., 2016. From Life Cycle Costing to Economic Life Cycle Assessment—Introducing an Economic Impact Pathway. *Sustainability* 8, 428. <https://doi.org/10.3390/su8050428>
107. Neugebauer, S., Martinez-Blanco, J., Scheumann, R., Finkbeiner, M., 2015. Enhancing the practical implementation of life cycle sustainability assessment – proposal of a Tiered approach. *J. Clean. Prod.* 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.053>
108. Nsca, 2006. Biogas as a road transport fuel. *Nsca Res. Undertaken Natl. Soc. Clean Air Environ. Prot.* 52.
109. Office National de l’Energie, 2016. Panorama de l’électricité renouvelable au Canada – Analyse des marchés de l’énergie 2016 - Octobre 2016.
110. Park, J., 2016. The impact of depreciation savings on investment: Evidence from the corporate Alternative Minimum Tax. *J. Public Econ.* 135, 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2016.02.001>
111. Pearce, D.W., Atkinson, G.D., 1993. Capital theory and the measurement of sustainable development: an indicator of “weak” sustainability. *Ecol. Econ.* 8, 103–108. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(93\)90039-9](https://doi.org/10.1016/0921-8009(93)90039-9)
112. Pezzey, J.C.V., Toman, M.A., 2002. The Economics of Sustainability: A Review of Journal Articles. *Resour. Future* 202–328.
113. Phillips, R.B., Jameel, H., Chang, H.M., 2013. Integration of pulp and paper technology with bioethanol production. *Biotechnol. Biofuels* 6, 13. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-13>

114. Pishvae, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A., 2011. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Appl. Math. Model.* 35, 637–649. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.013>
115. Pokhrel, D., Viraraghavan, T., 2004. Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review. *Sci. Total Environ.* 333, 37–58. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017>
116. Priadi, C., Wulandari, D., Rahmatika, I., Moersidik, S.S., 2014. Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Paper Sludge. APCBEE Procedia, 5th International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering - ICBEE 2013 & 2nd International Conference on Civil Engineering - ICCEN 2013 9, 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.012>
117. Quddus, M.A., Ibne Hossain, N.U., Mohammad, M., Jaradat, R.M., Roni, M.S., 2017. Sustainable network design for multi-purpose pellet processing depots under biomass supply uncertainty. *Comput. Ind. Eng.* 110, 462–483. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.001>
118. Rajeev, A., Pati, R.K., Padhi, S.S., Govindan, K., 2017. Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *J. Clean. Prod.* 162, 299–314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>
119. Sarimveis, H.K., Angelou, A.S., Retsina, T.R., Rutherford, S.R., Bafas, G.V., 2003. Optimal energy management in pulp and paper mills. *Energy Convers. Manag.* 44, 1707–1718. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00165-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00165-6)
120. Sarkis, J., Zhu, Q., Lai, K., 2011. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *Int. J. Prod. Econ.* 130, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.010>
121. Secrétariat central de l'ISO, 2009. La famille ISO 14000 des normes internationales pour le management environnemental.
122. Sharma, B., Ingalls, R.G., Jones, C.L., Huhnke, R.L., Khanchi, A., 2013. Scenario optimization modeling approach for design and management of biomass-to-biorefinery supply chain system. *Bioresour. Technol.* 150, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.120>
123. Shrimali, G., Pusarla, S., Trivedi, S., 2017. Did accelerated depreciation result in lower generation efficiencies for wind plants in India: An empirical analysis. *Energy Policy* 102, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.022>
124. Sjöde, A., Alriksson, B., Jönsson, L.J., Nilvebrant, N.-O., 2007. The potential in bioethanol production from waste fiber sludges in pulp mill-based biorefineries. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 137–140, 327–337. <https://doi.org/10.1007/s12010-007-9062-2>
125. Slade, R., Bauen, A., Shah, N., 2009. The greenhouse gas emissions performance of cellulosic ethanol supply chains in Europe. *Biotechnol. Biofuels* 2, 15. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-2-15>
126. Soam, S., Kapoor, M., Kumar, R., Borjesson, P., Gupta, R.P., Tuli, D.K., 2016. Global warming potential and energy analysis of second generation ethanol production from rice straw in India. *Appl. Energy* 184, 353–364. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.034>

127. Spatari, S., Bagley, D.M., MacLean, H.L., 2010. Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol conversion technologies. *Bioresour. Technol.* 101, 654–667. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.067>
128. Srivastava Samir K., 2007. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *Int. J. Manag. Rev.* 9, 53–80. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>
129. Statistique Canada, 2017. Evolution de l'indice de prix de consommation IPC au Canada 1996-2016.
130. Stephen, G., Peter, F., 2012. Interim technical report performance summary for anaerobic digestion of dairy cow slurry and grass silage at afbi, hillsbough. Agri-Food Biosci. Inst.
131. Subramanian, N., Gunasekaran, A., 2015. Cleaner supply-chain management practices for twenty-first-century organizational competitiveness: Practice-performance framework and research propositions. *Int. J. Prod. Econ.* 164, 216–233. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.002>
132. Sultana, A., Kumar, A., 2011. Optimal configuration and combination of multiple lignocellulosic biomass feedstocks delivery to a biorefinery. *Bioresour. Technol.* 102, 9947–9956. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.119>
133. Thomas, N.G., James, J.K., Tara-Shelomith, K., 1995. Shifting Paradigms for Sustainable Development: Implications for Management Theory and Research. *Acad. Manage. Rev.* 20, 874–907.
134. Thompson, G., Swain, J., Kay, M., Forster, C.F., 2001. The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresour. Technol.* 77, 275–286. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00060-2)
135. UICN, WWF, PNUE, 1980. Stratégie mondiale de la conservation : la conservation des ressources vivantes au service du développement durable.
136. Uihlein, A., Schebek, L., 2009. Environmental impacts of a lignocellulose feedstock biorefinery system: An assessment. *Biomass Bioenergy* 33, 793–802. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.12.001>
137. UNEP/SETAC, 2011. UNEP/SETAC (2011) Towards a life cycle sustainability assessment. Paris.
138. UNEP/SETAC, 2009. UNEP/SETAC (2009) Guidelines for social life cycle assessment of products, Paris. ed.
139. Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., Hildenbrand, J., Traverso, M., Mazijn, B., Sonnemann, G., 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment—our contribution to Rio+20. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1673–1685. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1>
140. Voiron-Canicio, C., 2005. Pour une approche systémique du développement durable. *Dév. Durable Territ. Économie Géographie Polit. Droit Sociol.* <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.261>
141. Wang, B., Gebreslassie, B.H., You, F., 2013. Sustainable design and synthesis of hydrocarbon biorefinery via gasification pathway: Integrated life cycle assessment and technoeconomic analysis with multiobjective superstructure optimization. *Comput. Chem. Eng.* 52, 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.12.008>

142. Wang, M., Han, J., Dunn, J.B., Cai, H., Elgowainy, A., 2012. Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. *Environ. Res. Lett.* 7, 045905. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>
143. Wetterlund, E., Pettersson, K., Harvey, S., 2011. Systems analysis of integrating biomass gasification with pulp and paper production – Effects on economic performance, CO<sub>2</sub> emissions and energy use. *Energy* 36, 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.017>
144. Wiktorian Tarnawski, 2004. Emission Factors for Combustion of Biomass Fuels in the Pulp and Paper Mills. Tech. Univ. Łódź 12.
145. WNA, Jamie, M., Brent, B., Harvey S., and Shane, B., 2011. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. WNA Rep.
146. Zhu, Q., Sarkis, J., 2004. Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *J. Oper. Manag.* 22, 265–289. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.01.005>
147. Zondervan, E., Nawaz, M., de Haan, A.B., Woodley, J.M., Gani, R., 2011. Optimal design of a multi-product biorefinery system. *Comput. Chem. Eng., Energy Systems Engineering* 35, 1752–1766. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.01.042>

# **Annexes**

**Annexe 1.A :** Cadre commenté de la réglementation internationale relative aux changements climatiques et à la couche d’ozone

### **1. La Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone et le protocole de Montréal**

Adoptée le 22 mars 1985, la Convention de Vienne est une convention cadre qui « reconnaît la nécessité d’accroître la coopération internationale en vue de limiter les risques que les activités humaines pouvaient faire courir à la couche d’ozone »<sup>11</sup>. Cette convention ne prévoit aucune disposition contraignante.

À la suite de la découverte d’un trou dans la couche d’ozone la tendance était d’imposer des règles contraignantes pour les États signataires. Ainsi, le protocole de Montréal a vu le jour entant qu’accord international modifiant la Convention de Vienne sur la protection de la couche d’ozone. Il a été baptisé « protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d’ozone ». L’objectif de ce protocole est de réduire en vue d’éliminer les substances qui détruisent la couche d’ozone. Son entrée en vigueur été au 1<sup>er</sup> janvier 1989. En 2009, 196 pays ont signé le protocole de Montréal, ce qui lui procure un aspect quasi-universel.

### **2. La Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et le protocole de Kyoto**

La convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques promulguée en 1992 a été le document de réglementation la plus marquante de la législation internationale en matière des changements climatiques. Il en découle de ce document un cadre institutionnel très actif pour la mise en vigueur, le suivi et la supervision de la réglementation dans ce domaine en fonction des orientations instaurées par ladite convention.

Ce texte cadre a été suivi le 11 décembre 1997 d’un protocole dit « protocole de Kyoto à la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ». Ces deux textes retracent et encadrent potentiellement et explicitement toute législation nationale dans ce domaine tout en respectant les spécificités et les souverainetés des pays.

Ci-après nous commentons les dispositions les plus importantes de cette législation cadre tout en insistant sur les notions ayant trait aux tendances futures visées par ces textes.

#### **a. La Convention des Nations Unies**

Nous explicitons les objectifs et l’exposé de motif de ces textes, le cadre institutionnel dévolu pour la mise en place et l’encadrement des démarches instaurées ainsi que l’aboutissement et les conséquences scientifiques et technologiques des différentes dispositions. Sans perdre de vue, et ça va de soi, les rôles assignés aux pays en voie de

---

<sup>11</sup> <https://treaties.un.org>

développement et les possibilités de coopération prévues à cet effet dans le domaine des changements climatiques.

*i. Exposé des motifs et objectifs*

La convention cadre a été une tentative positive et nécessaire reflétant un niveau de conscience international pour encadrer certains aspects du rythme spectaculaire de l'évolution économique et notamment industriel des pays développés.

Il s'agit d'une réponse, un peu tardive, imposée par suite des efforts scientifiques et de recherche qui mettent en corrélation directe les conséquences néfastes de l'industrie et de l'énergie sur la dégradation des écosystèmes et de la vie humaine, et ce, par l'accumulation des GES qui provoque l'échauffement du globe terrestre.

Les études météorologiques sont toujours pessimistes, ce qui a poussé le célèbre scientifique australien Frank Fenner<sup>12</sup> de dire que « "Il est déjà trop tard" : l'espèce humaine devrait s'éteindre ce siècle<sup>13</sup>».

Stephen Boyden ami de Frank réplique que "Nous sommes tous deux conscients de la gravité de la situation, mais je n'accepte pas qu'il soit forcément trop tard. Bien qu'il y n'ait qu'une lueur d'espoir, cela vaut la peine de résoudre le problème. **Nous avons la connaissance scientifique pour le faire, mais nous n'avons pas la volonté politique**"<sup>14</sup>.

Cette réplique ne reflète que du pessimisme tant que la volonté politique demeure une condition pour la résolution du dilemme. En effet, derrière la politique c'est toujours l'économie dirigé le plus souvent par des espèces qui comptent peu sur la science et sur le destin de l'humanité.

La convention impute, au niveau des exposés des motifs, les effets des changements climatiques essentiellement aux pays développés qui, par leurs stratégies de développement, ont besoin de produire davantage et d'émettre en conséquence plus de gaz dans l'atmosphère.

Les objectifs cadrent ainsi avec ce niveau de conscience pour instaurer un cadre réglementaire qui permet de contrôler la situation vers une vision de développement durable. Cela se manifeste à travers les législations nationales, la technologie et le contrôle de l'émission des GES.

La convention préconise les besoins de soutenir le rythme de développement au niveau des pays développés et la consommation conséquente de l'énergie mais incite à ce qu'un compromis doit être atteint vis-à-vis de la maîtrise de l'émission des gaz et la rentabilisation de la consommation énergétique. Ces suggestions ouvrent la voie à une révolution technologique sans précédent qui est en train d'être confectionnée à notre époque.

---

<sup>12</sup> Frank Fenner, professeur émérite de microbiologie à l'Université Nationale Australienne, prédit la disparition de l'Humanité dans les 100 prochaines années.

<sup>13</sup> [http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_2447\\_extinction\\_espece\\_humaine.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_2447_extinction_espece_humaine.php) (reconsultée le 19 décembre 2017)

<sup>14</sup> Op cit 12.

Le texte de la convention présume qu'« il est possible de parvenir à un meilleur **rendement énergétique** et de **maîtriser les émissions de GES** d'une manière générale et notamment **en appliquant des technologies nouvelles dans des conditions avantageuses du point de vue économique et du point de vue social** »<sup>15</sup>.

Ce dernier paragraphe a mis en réalité les bases fondamentales d'une révolution technologiques extraordinaire qui est en train de se matérialiser nos jours par le 'Smart Grid' comme riposte par excellence aux préoccupations grandissantes envers la question des changements climatiques.

L'article deux stipule explicitement les objectifs de la convention agrégés comme suit :

«

- Stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ;
- Atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques ;
- Que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable<sup>16</sup> ».

*ii. Les principales dispositions de la convention*

Les dispositions les plus importantes de cette convention concernent :

- L'instauration par les articles 7 à 11 d'un cadre institutionnel composé de :
  - La Conférence des Parties considéré comme l'organe suprême de la convention, chargé de la supervision le suivi et la mise en œuvre de son application ;
  - Le Secrétariat chargé de l'organisation des sessions de la Conférence des Parties et des organes subsidiaires et de l'élaboration et la diffusion des rapports d'activités ;
  - L'Organe Subsidiaire du Conseil Scientifique et Technologique chargé de fournir des renseignements et des avis sur les aspects scientifiques et technologiques de la Convention. Cet organe se charge en outre de « fournir des avis sur les programmes scientifiques, sur la coopération internationale et la recherche-développement en matière des changements climatiques et sur les moyens d'aider les pays en développement à se doter d'une capacité propre »<sup>17</sup>;
  - L'Organe Subsidiaire de mise en œuvre chargé d'une mission plutôt opérationnelle pour assister la Conférence des Parties à la mise en application des dispositions de la convention ;

---

<sup>15</sup> Dernier paragraphe de l'introduction de la convention cadre sur les changements climatiques de 1992

<sup>16</sup> Article deux de la convention cadre sur les changements climatiques de 1992

<sup>17</sup> Point 2 de l'article 12 de la convention cadre sur les changements climatiques

- Enfin, le Mécanisme Financier qui relève de la Conférence des Parties et qui est chargé du dossier financier relatif au transfert de technologie relative aux projets d'assistance aux pays en développement.
- Un ensemble d'obligations, prévues par l'article 12, relatives à la communication d'informations et inventaires périodiques concernant l'application et le suivi des données relatives à l'émission des GES et les programmes relatifs à la mise en œuvre de la convention. Cet article précise aussi la possibilité pour les pays en développement « de proposer des projets à financer, en précisant les technologies, les matériaux, l'équipement, les techniques ou les pratiques qu'il faudrait pour les exécuter et en donnant si possible une estimation de tous les coûts supplémentaires de ces projets, des progrès de la réduction des émissions et de l'absorption des GES ainsi qu'une estimation des avantages que l'on peut en attendre »<sup>18</sup> ;
  - Le règlement des différends, l'arbitrage, l'adoption et les amendements à la convention sont des questions aussi abordées par ladite convention.

### **b. Le protocole de Kyoto**

D'après les dispositions du premier point de l'article 17 de la convention cadre « La Conférence des Parties peut, à l'une quelconque de ses sessions ordinaires, adopter des protocoles à la Convention ». Ces prérogatives ont permis, pour une mise en œuvre plus explicite et plus efficace, d'élaborer le protocole de Kyoto en 1997 au Japon.

Ainsi, le protocole de Kyoto, signé le 11 décembre 1997 à Kyoto au Japon, est un traité international qui vise la réduction des émissions de GES. Ce protocole est entré en vigueur le 6 Février 2005. En janvier 2009, déjà 184 États avaient ratifiés ce protocole qui visait à :

- Diminuer les émissions de GES, considérées comme une cause possible du réchauffement climatique ;
- Réduire, entre l'année 2008 et 2012, de 5,2 % par rapport au niveau de 1990 les émissions de six GES : dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones ;
- Contraindre les pays développés et les pays en développement de respecter les programmes visant à diminuer l'émission des GES ;
- Prévoir une série de mécanismes obéissant aux lois du marché pour atteindre les objectifs escomptés ;
- Le protocole possède des organes de gestion dont la Conférence des Parties, le Conseil Scientifique et Technologique et l'Organe Subsidaire de mise en œuvre.

---

<sup>18</sup> Point 4 de l'article 12 de la convention cadre sur les changements climatiques

## **Annexe 1.B : Les dix principes du Pacte Mondial<sup>19</sup>**

« Ce pacte est annoncé par le Secrétaire Général de l'Organisation des Nations Unies lors du Forum économique mondial qui s'est tenu en janvier 1999 à Davos (Suisse) et officiellement lancé au siège de l'ONU en juillet 2000 ». « Le Pacte Mondial invite les entreprises à adopter, soutenir et appliquer dans leur sphère d'influence un ensemble de valeurs fondamentales, dans les domaines des droits de l'homme, des normes de travail et de l'environnement, et de lutte contre la corruption ». En d'autres termes, c'est seulement dans les domaines qui les concernent que l'on requiert des entreprises de véritables évolutions.

« Les dix principes sont tirés des instruments ci-après :

- Déclaration universelle des droits de l'homme ;
- Déclaration de l'Organisation Internationale du Travail relative aux principes et droits fondamentaux au travail ;
- Déclaration de Rio de Janeiro sur l'environnement et le développement ;
- Convention des Nations Unies contre la corruption ».

Les principes, catégorie par catégorie, sont pris du pacte mondial :

### **« Droits de l'homme**

1. Les entreprises sont invitées à promouvoir et à respecter la protection du droit international relatif aux droits de l'homme dans leur sphère d'influence ; et
2. A veiller à ce que leurs propres compagnies ne se rendent pas complices de violations des droits de l'Homme.

### **Droit du travail**

3. Les entreprises sont invitées à respecter la liberté d'association et à reconnaître le droit de négociation collective ;
4. L'élimination de toutes les formes de travail forcé ou obligatoire ;
5. L'abolition effective du travail des enfants ; et
6. L'élimination de la discrimination en matière d'emploi et de profession.

### **Environnement**

7. Les entreprises sont invitées à appliquer l'approche de précaution face aux problèmes touchant l'environnement ;
8. A entreprendre des initiatives tendant à promouvoir une plus grande responsabilité en matière d'environnement ; et
9. À favoriser la mise au point et la diffusion de technologies respectueuses de l'environnement.

### **Lutte contre la corruption**

10. Les entreprises sont invitées à agir contre la corruption sous toutes ses formes, y compris l'extorsion de fonds et les pots-de-vin ».

---

<sup>19</sup> <https://www.unglobalcompact.org/>

## Annexes 2.A : Notations relatives à la formulation mathématique du modèle

### Entités et indices

$B$	Types de biomasses, $B = \{IR, MR, FR, AR\}$ où IR désigne Résidus Industriels, MR désigne Résidus Municipaux, FR désigne Résidus Forestiers, et AR désigne Résidus Agricoles
$b$	Indice Biomasse, $b = 1, 2, \dots, 4$ où $b$ est égal à 1 pour IR, 2 pour MR, 3 pour FR, et 4 pour AR
$OI$	Autres inputs, $OI = \{Cellulase, Yeast, Chemical\ 1, Chemical\ 2\}$ où Chemical 1 désigne le NaOH, et Chemical 2 désigne le Na <sub>2</sub> S
$l$	Indice Autres Inputs, $l = 1, 2, \dots, 4$ où $l$ est égal à 1 pour Cellulase, 2 pour Yeast, 3 pour NaOH, et 4 pour Na <sub>2</sub> S
$PW$	Voies de production, $PW = \{ETH, WTF, EC, P\&P\}$ où ETH désigne Ethanol, WTF désigne ‘Waste To Fuel’, EC désigne Cogénération, et P&P désigne Pâtes et Papiers
$p$	Indice Voie de production, $p = 1, 2, \dots, 4$ où $p$ est égal à 1 pour ETH, 2 pour WTF, 3 pour EC, et 4 pour P&P
$TECH$	Technologies, $TECH = \{FERM, AD, CHP, KP\}$ où FERM désigne SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation), AD désigne Digestion Anaérobie, CHP désigne ‘Cogeneration Heat and Power’, et KP désigne ‘Kraft Pulp’
$e$	Indice Technologie, $e = 1, 2, \dots, 4$ où $e$ est égal à 1 pour FERM, 2 pour AD, 3 pour CHP, et 4 pour KP
$PD$	Produits, $PD = \{ETH, SNG, ELECT, PP, HEAT\}$ où ETH désigne Éthanol, ELECT désigne Électricité, SNG désigne Biogaz, PP désigne Pâtes et Papiers et HEAT désigne Chaleur
$i$	Indice Produit, $i = 1, 2, \dots, 5$ où $i$ est égal à 1 pour ETH, 2 pour SNG, 3 pour ELECT, 4 pour PP, et 5 pour HEAT
$CP$	Coproduits, $CP = \{LGN, PS, BL\}$ où LGN désigne Lignine PS désigne Boue Papetière, et BL désigne Liqueur Noire
$j$	Indice Coproduit, $j = 1, \dots, 3$ où $j$ est égal à 1 pour LGN, 2 pour PS et 3 pour BL
$OP$	Options de capacité, $OP = \{op1, op2, op3\}$ où op1 désigne option 1, op2 désigne option 2, et op3 désigne option 3
$o$	Indice Option, $o = 1, \dots, 3$ où $o$ est égal à 1 pour op1, 2 pour op2, et 3 pour op3
$T$	Nombre de périodes
$t$	Indice Periode, $t = 1, 2, \dots, T$
$C$	Nombre de cycles
$c$	Indice Cycle, $c = 1, 2, \dots, C$

### **Paramètres**

<i>ELT</i>	Durée de vie économique pour l'amortissement comptable
<i>FLT</i>	Durée de vie fiscale pour l'amortissement fiscal
<i>PC</i>	Nombre de périodes dans le cycle de planification
<i>BN</i>	Grand Nombre
<i>CC</i>	Coût de fermeture de l'activité de P&P
<i>FCPP</i>	Coûts opérationnels de l'activité de P&P
<i>r</i>	Taux d'intérêt annuel
<i>CR<sub>b,e</sub></i>	Taux de conversion de la biomasse <i>b</i> par la technologie <i>e</i>
<i>CRP<sub>i,e</sub></i>	Taux de conversion du produit <i>i</i> par la technologie <i>e</i>
<i>CRC<sub>j,e</sub></i>	Taux de conversion du coproduit <i>j</i> par la technologie <i>e</i>
<i>CT</i>	Tendance du taux de conversion
<i>a<sub>j,i</sub></i>	Fraction du coproduit <i>j</i> par rapport au produit <i>i</i>
<i>BST</i>	Tendance de l'offre en biomasses
<i>TR</i>	Taux d'imposition directe des sociétés
<i>AR<sub>j,i</sub></i>	Taux d'allocation d'émission entre le produit <i>i</i> et le coproduit <i>j</i>
<i>BUC<sub>b</sub></i>	Coût unitaire de la biomasse <i>b</i>
<i>PUC<sub>i</sub></i>	Coût de production unitaire du produit <i>i</i>
<i>IC<sub>o,e,c</sub></i>	Coût d'investissement relatif à l'implémentation de l'option <i>o</i> de la technologie <i>e</i> pendant le cycle <i>c</i>
<i>CO<sub>o,e</sub></i>	Capacité de l'option <i>o</i> relative à la technologie <i>e</i>
<i>CA<sub>p</sub></i>	Capacité installée au niveau de l'activité P&P
<i>CE<sub>e</sub></i>	Consommation d'électricité par unité de capacité installée de la technologie <i>e</i>
<i>SP<sub>i</sub></i>	Prix de vente (prix à la sortie de l'usine) du produit <i>i</i>
<i>SC<sub>j</sub></i>	Prix de vente (prix à la sortie de l'usine) du coproduit <i>j</i>
<i>DP<sub>i</sub></i>	Demande attendue du produit <i>i</i>
<i>DC<sub>j</sub></i>	Demande attendue du coproduit <i>j</i>
<i>BS<sub>b</sub></i>	Offre de biomasse <i>b</i>
<i>BD<sub>c</sub></i>	Budget disponible au cycle <i>c</i>
<i>DT</i>	Tendance de la demande des produits et coproduits
<i>C(t)</i>	Retour du cycle de planification lié à la période <i>t</i> de l'horizon
<i>GHG<sub>b,e</sub></i>	Emission générée au stade manufacturier par une unité de produit utilisant la biomasses <i>b</i> et la technologie <i>e</i>
<i>GHGO<sub>l</sub></i>	Emission d'une unité d'entrée <i>l</i>
<i>GHGP<sub>i,e</sub></i>	Emission générée au stade manufacturier par une unité de produit utilisant le produit <i>i</i> et la technologie <i>e</i>
<i>GHGC<sub>j,e</sub></i>	Emission générée au stade manufacturier par une unité de produit utilisant le coproduit <i>j</i> et la technologie <i>e</i>
<i>GHG_IF<sub>b</sub></i>	Emission d'une tonne de biomasses <i>b</i> dans le champ

$GHG_{TR_b}$  Émissions générées par le transport d'une tonne de biomasse  $b$   
 $GHG_b$  Somme de  $GHG_{IF_b}$  et  $GHG_{TR_b}$

***Autres notations liées à l'aspect environnemental***

$GHG_{TOTAL}$  Émissions totales durant l'horizon de planification  
 $GHG_{BIF}$  Émissions totales de biomasses dans le champ au cours de l'horizon de planification  
 $GHG_{TR}$  Émissions totales générées par le transport au stade d'approvisionnement au cours de l'horizon de planification  
 $GHG_{FTP}$  Émissions totales au stade d'approvisionnement (du champ à l'usine) au cours de l'horizon de planification  
 $GHGP_i$  Émissions du produit  $i$  au cours de l'horizon de planification  
 $GHGC_j$  Émissions du coproduit  $j$  au cours de l'horizon de planification  
 $GHGC_{j,t}$  Émissions du coproduit  $j$  au cours de la période  $t$   
 $GHG3M$  Émission du produit ELECT vendus sur le marché au cours de l'horizon de planification  
 $GHG3KWh_t$  Émissions générées par un KWh d'électricité produite au cours de la période  $t$   
 $GHG5KWh_t$  Émissions générées par un KWh de chaleur produite au cours de la période  $t$   
 $GHG2M$  Émissions générées par la production du Biogaz vendu sur le marché au cours de l'horizon de planification  
 $GHG2M3_t$  Émissions générées par un  $m^3$  de biogaz produit au cours de la période  $t$

***Autres notations liées à l'aspect économique***

$EOBJ$  Objectif économique  
 $CF$  Cash-flow  
 $CF_t$  Cash-flow relatif à la période  $t$   
 $ACF$  Valeur actuelle du cash-flow  
 $ACF_t$  Valeur actuelle du cash-flow à la période  $t$   
 $ANCF$  Valeur actuelle nette du cash-flow  
 $NCF$  Cash-flow net  
 $NCF_t$  Cash-flow net à la période  $t$   
 $SV$  Valeur résiduelle de la BRFI à la fin de l'horizon de planification  
 $D$  'Debt' de la BRFI à la fin de l'horizon de planification ( $T_{INV-INV_H}$ )  
 $ADBI$  Amortissement comptable des investissements bioénergétiques au cours de l'horizon de planification  
 $FD$  Depreciation fiscale  
 $AFD$  Valeur actualisée de l'amortissement fiscale des investissements au cours de l'horizon de planification

$T\_INV$	Coût total d'investissement pour toutes les voies (sauf l'activité de P&P) durant l'horizon de planification
$ACPR$	Valeur actuelle des revenus provenant des coproduits au cours de l'horizon de planification
$APC$	Valeur actuelle du coût de production de tous les produits au cours de l'horizon de planification
$ARMP$	Valeur actuelle des revenus de tous les produits destinés au marché au cours de l'horizon de planification
$AFCPP$	Valeur actuelle du coût opérationnel de l'activité de P&P au cours de l'horizon de planification
$ACCPP$	Valeur actuelle du coût de fermeture de l'activité de P&P au cours de l'horizon de planification
$ABC$	Valeur actuelle du coût de biomasses au cours de l'horizon de planification
$INV\_H$	Coût d'investissement pris en compte durant l'horizon de planification
$A\_INV\_H$	Valeur actuelle du coût d'investissement durant la période de planification

### **Variables de décision**

$Y_{o,e,c}$	= 1 si l'option de capacité $o$ , utilisée par la technologie $e$ , est ajoutée au cycle $c$ et 0 sinon
$W_t$	= 1 si la voie $p = P\&P$ est opérationnel à la période $t$ et 0 sinon
$FB_{b,e,t}$	Flux de biomasse $b$ utilisée par la technologie $e$ au cours de la période $t$
$FOI_{l,e,t}$	Flux, d'autres intrants $l$ utilisés par la technologie $e$ au cours de la période $t$
$IFCP_{j,e,e',t}$	Flux du coproduit $j$ généré par la technologie $e$ et utilisé par la technologie $e' \neq e$ au cours de la période $t$
$IFFP_{i,e,e',t}$	Flux du produit $i$ généré par la technologie $e$ et utilisé par la technologie $e' \neq e$ au cours de la période $t$
$MFFP_{i,t}$	Flux du produit $i$ expédié au marché au cours de la période $t$
$MFCP_{j,t}$	Flux du coproduit $j$ expédié au marché au cours de la période $t$
$QFP_{i,e,t}$	Quantité, en produit final $i$ , réalisée au cours de la période $t$
$QC_{j,t}$	Quantité, en coproduits $j$ , réalisée au cours de la période $t$

## **Annexe 4.A : Les différents types et modes d'amortissements**

### **I. Définition de l'amortissement**

L'amortissement d'un actif immobilisé est la constatation de sa dépréciation du fait de l'usure du temps ou de l'obsolescence durant sa durée de vie. Il existe plusieurs types et modes de constatation de la dépréciation. On désigne par amortissement dérogatoires, les modes prévus par la législation fiscale où l'éligibilité peut être limitée dans le temps, dans l'espace et pour des catégories d'immobilisations bien déterminées. En revanche les modes appliqués usuellement sont considérés des amortissements de droit commun.

### **II. Types d'amortissements**

Le système fiscal, dans de nombreux pays, comprend des règles d'amortissement fiscal distinctes de l'amortissement comptable<sup>20</sup>. Au niveau de l'amortissement fiscal, Le contribuable réclame généralement l'application du type économique pour une constatation réelle de la dépréciation. Toutefois, pour les projets spécifiques ou à risque, le contribuable réclame un mode d'amortissement dérogatoire qui lui procure plus d'aisance financière au cours des premiers exercices d'exploitation.

- Amortissement comptable : c'est l'amortissement accepté généralement par la législation comptable selon les normes qui décrivent la façon de constater la charge relative à la dépréciation des immobilisations amortissables imputée sur le résultat de l'exercice financier.
- Amortissement fiscal : c'est l'amortissement accepté par la législation fiscale pour constater la charge relative à la dépréciation des immobilisations amortissables déductible au titre de l'exercice fiscal pour déterminer la base de l'impôt sur le revenu ou sur le bénéfice.
- L'amortissement économique : c'est l'amortissement calculé en se référant aux conditions de marché concernant la dépréciation. L'usure est considérée comme la différence entre le prix comptable net de l'exercice précédent (l'année financier) et le prix du marché des biens d'occasion pour le même bien (se référer à la méthode appliquée au Canada par suite de l'enquête entrepris à ce propos<sup>21</sup>). Ce dernier type constitue un mode au croisement des intérêts des comptables et fiscalistes du fait qu'il se rapproche du mode réaliste.

### **III. Modes d'amortissements**

Il existe au moins quatre modes d'amortissements :

- L'amortissement linéaire ;

---

<sup>20</sup> S. H. Yussof, K. Isa, and R. Mohdali, "An Analysis of the Gap between Accounting Depreciation and Tax Capital Allowance in Malaysia," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 164, pp. 351–357, Dec. 2014.

<sup>21</sup> John Baldwin, Huju Liu et Marc Tanguay, 2015, « Une mise à jour des taux d'amortissement pour les Comptes canadiens de productivité », *La revue canadienne de productivité* (Statistique Canada), No 15-206-X ISSN 1710-5277 ISBN 978-0-660-23055-9.

- L'amortissement dégressif ;
- L'amortissement variable ; et
- L'amortissement exceptionnel (ou accéléré).

## 1. L'amortissement linéaire

Ce mode permet une répartition annuelle de la perte des valeurs des immobilisations en annuité équivalente durant sa durée de vie. Le taux de l'amortissement est égal dans ce cas à l'inverse de la durée de vie.

$Am = V_0 * 1/dv$  ; ( $Am$  = annuité d'amortissement ;  $V_0$  = Valeur d'origine de l'immobilisation amortissable ;  $dv$  = durée de vie de l'immobilisation)

## 2. L'amortissement dégressif

Ce mode permet une répartition annuelle des amortissements selon des annuités plus importante durant les premières années de la durée de vie des immobilisations. Pour calculer les annuités, il y avait plusieurs façons de déterminer le taux d'amortissement.

### 2.1. Taux corrélé au taux linéaire

Ce taux est égal au taux linéaire multiplié par un coefficient. Ce dernier est déterminé en se référant à la législation comptable ou fiscale selon le type d'amortissement. Les coefficients varient selon la législation et en fonction de la durée de vie du bien amortissable. Les coefficients les plus usuels sont, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3 et 3.5, selon le pays et la législation concernée. Comparé au mode linéaire, la base amortissable du mode dégressif est la valeur résiduelle ou la valeur comptable nette. Si le mode dégressif devient inférieur au mode linéaire, on continue avec ce dernier mode. Le mode linéaire, dans ce dernier cas, est déterminé en divisant la valeur comptable nette sur la période restant à parcourir pour parfaire la durée de vie de l'immobilisation.

Si le taux dégressif est déterminé en multipliant le taux linéaire par 3 pour une durée de vie de 20 ans :

- Taux :  $td = 3 * 1/dv$  ; ( $td$  = taux dégressif)
- Annuité d'amortissement :  $Am_j = 15\% VCN_{j-1}$  ; ( $VCN_j$  = valeur comptable nette de l'exercice  $j$ )
- Valeur comptable nette :  $VCN_j = V_0 - \sum_{i=1}^{n-j} Am_i$
- Condition de changement du mode dégressif au mode linéaire : Si  $\frac{VCN_{j-1}}{n-j+1} \geq Am_j$  , on change vers le mode linéaire pour le reste de la durée de vie selon l'annuité  $\frac{VCN_{j-1}}{n-j+1}$ .

### 2.2. Taux déterminé en se basant sur un ou plusieurs taux dégressifs

Si la législation prévoit un ou plusieurs taux dégressifs dans ce cas on les applique sur la valeur comptable nette au titre des périodes prévues par la législation. Par exemple, si le taux dégressif est de 30%, dans ce cas l'annuité est déterminée en appliquant chaque année le taux de 30% à la valeur comptable nette.

## 3. L'amortissement variable

Ce mode permet une répartition annuelle des amortissements selon des annuités corrélées avec l'utilisation des immobilisations. Généralement en utilise l'unité d'heures de travail ou le

nombre de pièces fabriquées pour les machines et le nombre de kilomètres pour les moyens de transport.

Annuité d'amortissement :  $Am_j = \frac{UE}{UEP} VCN_0$  ; ( $UE$  = unité d'œuvre de l'année concernée ;  $UEP$  = unités d'œuvres prévisionnels sur toute la durée de vie)

#### **4. L'amortissement exceptionnel (ou accéléré)**

Ce mode permet une répartition des amortissements selon des annuités réduites pour des dépréciations rapides. Le cas extrême est l'amortissement massif pratiqué selon un taux de 100% au titre de la première année. L'amortissement accéléré, constitue un régime de faveur accordée par l'administration fiscale ou réclamé par le contribuable. Ce mode constitue une incitation à l'investissement dans des domaines soutenus dont la production bioénergétique. À titre indicatif, le secteur des hydrocarbures qui engage des investissements énormes a réclamé le régime massif au titre des projets d'exploitation des hydrocarbures dans les sables bitumineux à Alberta au Canada.

Le calcul de la DPA (Déduction Pour Amortissement) pour la catégorie 29, au sens du folio de l'impôt sur le revenu Canadien, se fait au moyen de la méthode de l'amortissement accéléré à la limite de 25 % la première année, 50 % la deuxième année et les 25 % restants pour la troisième année. La catégorie 29 concerne les machines ou le matériel admissible servant principalement à la fabrication ou à la transformation au Canada de marchandise en vue de la vente ou de la location. Ainsi, les annuités sont réduites à trois ans au lieu de toute la durée de vie de l'immobilisation, ce qui rend ce mode accéléré.

## Annexe 4.B : Détail du calcul de la perte du trésor par rapport au scénario de référence

Perte trésor (Δ % SC_LIN)	ACC 25 50 25				DEG 2.5LIN			
	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)
1	58 772 000	3 680 701	80 648 009	18 195 308	17 550 000	4	17 549 991	(13)
2	55 818 895	3 815 864	77 379 525	17 744 767	16 758 579	184 809	16 327 359	(616 029)
3	52 865 789	2 419 749	77 684 022	22 398 484	15 967 158	(66 292)	16 121 838	220 972
4	49 912 684	(7 446 833)	74 538 963	32 073 112	15 175 737	67 690	15 017 794	(225 632)
5	46 959 579	(4 157 548)	76 263 936	33 461 905	14 384 316	139 314	16 313 975	1 790 345
6	44 006 474	(7 642 475)	76 658 452	40 294 453	13 592 895	(7 091 389)	14 494 693	7 993 187
7	41 053 368	(1 644 885)	70 041 269	30 632 785	12 801 474	(1 795 910)	14 694 726	3 689 162
8	38 100 263	298 379	67 868 358	29 469 717	12 010 053	(338 518)	12 799 928	1 128 393
9	35 147 158	(967 238)	67 868 358	33 688 438	11 218 632	(677 698)	12 799 928	2 258 994
10	32 194 053	(8 738 013)	64 173 907	40 717 867	10 427 211	(1 016 879)	12 799 928	3 389 596
	DEG 2LIN				DEG 30			
	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)
1	10 491 000	73	10 490 830	(243)	46 144 000	3 680 936	68 019 461	18 194 525
2	9 938 842	152 029	9 584 108	(506 763)	43 855 526	3 868 864	65 292 490	17 568 100
3	9 386 684	(104 814)	9 631 249	349 378	41 567 053	2 932 612	65 188 603	20 688 939
4	8 834 526	(22 357)	8 886 692	74 523	39 278 579	(6 739 125)	62 253 540	29 714 086
5	8 282 368	275 719	9 893 748	1 335 660	36 990 105	(2 989 976)	63 570 130	29 570 001
6	7 730 211	(204 599)	8 207 608	681 996	34 701 632	(6 194 570)	63 975 165	35 468 103
7	7 178 053	(1 638 643)	8 704 348	3 164 938	32 413 158	(465 823)	58 649 914	26 702 579
8	6 625 895	(386 841)	7 528 523	1 289 469	30 124 684	1 395 675	57 332 421	25 812 062
9	6 073 737	(623 480)	7 528 523	2 078 266	27 836 211	414 901	57 332 421	29 081 310
10	5 521 579	(860 119)	7 528 523	2 867 063	25 547 737	(565 874)	57 332 421	32 350 558
	DEG 50				DEG 50_30			
	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)
1	58 362 000	3 680 891	80 237 566	18 194 675	52 290 000	3 680 654	74 166 119	18 195 465
2	55 694 947	3 944 985	76 954 296	17 314 364	49 678 053	3 777 042	71 329 266	17 874 171
3	53 027 895	2 725 368	77 133 015	21 379 753	47 066 105	2 901 094	70 761 198	20 793 999
4	50 360 842	(7 014 433)	73 978 187	30 631 778	44 454 158	(6 815 090)	67 606 370	29 967 302
5	47 693 789	(3 548 649)	75 577 383	31 432 243	41 842 211	(3 005 638)	68 458 779	29 622 206
6	45 026 737	(6 907 877)	75 964 654	37 845 795	39 230 263	(2 637 145)	62 732 289	26 139 170
7	42 359 684	(830 005)	69 446 199	27 916 520	41 053 368	(1 644 885)	70 041 269	30 632 785
8	39 692 632	1 189 296	67 381 919	26 499 991	38 100 263	298 379	67 868 358	29 469 717
9	37 025 579	46 274	67 381 919	30 310 066	35 147 158	(967 238)	67 868 358	33 688 438
10	34 358 526	(1 096 749)	67 381 919	34 120 141	32 194 053	(8 738 013)	64 173 907	40 717 867
	M_100				LIN			
	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)	Δ(CFNA&SV)	Δ(Impôt payé)	Δ(Gain impôt)	Δ(Perte trésor)
1	66 362 000	3 680 739	88 237 922	18 195 183	-	-	-	-
2	63 009 421	3 818 367	84 564 211	17 736 423	-	-	-	-
3	59 656 842	2 314 316	84 721 083	22 749 925	-	-	-	-
4	56 304 263	(7 632 920)	81 364 747	32 693 404	-	-	-	-
5	52 951 684	(4 451 571)	82 942 096	34 441 983	-	-	-	-
6	49 599 105	(8 072 228)	83 253 841	41 726 964	-	-	-	-
7	46 246 526	(2 016 845)	76 102 334	31 872 653	-	-	-	-
8	42 893 947	(144 184)	73 694 688	30 944 925	-	-	-	-
9	39 541 368	(1 581 003)	73 694 688	35 734 323	-	-	-	-
10	36 188 789	(3 017 823)	73 694 688	40 523 722	-	-	-	-

