POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Outil d'aide à la décision pour distinguer les procédés de bioraffinage
Auteur: Author:	Georgiana Bele
Date:	2022
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Bele, G. (2022). Outil d'aide à la décision pour distinguer les procédés de bioraffinage [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/10544/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/10544/
Directeurs de recherche: Advisors:	Paul R. Stuart, & Marzouk Benali
Programme: Program:	Génie chimique

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

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Outil d'aide à la décision pour distinguer les procédés de bioraffinage

GEORGIANA BELE

Département de génie chimique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie chimique

Août 2022

© Georgiana Bele, 2022.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Outil d'aide à la décision pour distinguer les procédés de bioraffinage

présenté par **Georgiana BELE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

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

Robert LEGROS, président

Paul STUART, membre et directeur de recherche

Marzouk BENALI, membre et codirecteur de recherche

Patrice MANGIN, membre externe

DÉDICACE

À mes parents pour tous leurs efforts, leurs sacrifices et leur modèle de persévérance, qui m'ont permis de réaliser les études que je voulais

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire et projet de recherche a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude et ma reconnaissance. De près ou de loin, leur appui m'a permis de me développer tant sur le plan professionnel que sur le plan personnel.

Un grand merci à mon directeur de recherche, le professeur Paul Stuart et à mon codirecteur de recherche, Marzouk Benali, pour les conseils avisés et précieux que vous m'avez prodigués et pour le temps que vous avez consacré à nos réunions. Votre aide constante m'a orientée tout au long du projet à alimenter ma réflexion pour développer les outils méthodologiques nécessaires à la réalisation de cette recherche.

Merci à Cédric Diffo Téguia et à Nima Ghavidel pour toute l'aide que vous m'avez fourni et tout le temps que vous avez consacré à nos multiples réunions. Sans vos efforts, ma compréhension d'I-BIOREF n'aurait pas été aussi profonde. Vos explications et conseils ont contribué à l'amélioration de ce projet de recherche.

Merci à CanmetÉNERGIE à Varennes pour votre support financier.

Merci à mes collègues du groupe de recherche pour la motivation mutuelle et les discussions hebdomadaires que nous avons partagées. Plus précisément, merci à Émilie, Caroline, Alireza, Émanuelle et Francis.

Merci à mes amies de longue date pour votre soutien et vos encouragements de ces derniers mois. Plus précisément, merci à Ana, Néry, Salma, Hena et Dushi pour la relecture et la correction de mes travaux.

Merci à ma famille pour votre motivation et vos encouragements infaillibles de ces dernières années d'étude. Merci à mes parents pour leur soutien inconditionnel qui m'a permis de réaliser les études que je voulais.

Un grand merci à Max, pour ton soutien quotidien, émotionnel et moral, de ces derniers mois, ton écoute et ton réconfort et ton aide précieuse pour le nombre d'heures passées pour la relecture et la correction de ce mémoire.

RÉSUMÉ

La décarbonisation de l'industrie incluant celle des moyens de transport est nécessaire et doit être mise en place, afin de pouvoir atteindre l'objectif d'une carboneutralité d'ici 2050. Un des procédés permettant la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est le bioraffinage. Ce procédé, utilisant diverses sources de biomasse en tant que matière première, en l'occurrence, les résidus forestiers, permet l'obtention de différents biomatériaux, biocarburants ou produits biochimiques, selon la voie technologique utilisée. Au cours des dernières années, plusieurs voies technologiques de bioraffinage ont été développées dont le portfolio de produits est variable d'une voie à une autre. La mise en œuvre de ces procédés mène à beaucoup d'incertitudes liées à différents facteurs tels que la mise à l'échelle, le rendement ou la présence de règlementations politiques. Les industries ont besoin d'un système de prise de décision pour évaluer et déterminer les conditions de leur déploiement. En particulier, les outils d'aide à la décision multicritère sont les moyens les plus appropriés pour mener l'analyse, l'évaluation et la comparaison de ces voies technologiques. En outre, l'accès à une base de données et à des critères multidisciplinaires peut aider les parties prenantes (développeurs et fournisseurs de technologies, investisseurs, gouvernements, agences de réglementation, organismes de recherche, collectivités locales, autochtones, etc.) à prendre des décisions éclairées, en particulier à un stade précoce de la conception.

Cette problématique permet donc de soulever plusieurs questions de recherche, à savoir s'il est réellement possible de distinguer plusieurs variantes d'une même voie technologiques et quelles catégories de critères de décision seraient pertinentes à prendre en compte pour conclure quant à la rentabilité d'un projet et l'évaluation des voies technologiques existantes? De plus, y a-t-il un outil d'aide à la décision qui peut faciliter ces tâches, tout en fournissant l'accès aux informations nécessaires techniques, économiques et environnementales (bilans de masse et d'énergie, rendements en produits biosourcés, estimations des coûts, impacts environnementaux, etc.), ainsi qu'à des critères multidisciplinaires pour faciliter le processus de triage ?

L'objectif principal de ce mémoire était de choisir un outil d'aide à la décision (OAD) qui permettaient d'effectuer une évaluation complète de plusieurs voies technologiques et d'analyser de manière systématique et critique si le processus de triage réalisé est accéléré et éclairé, suite à la réalisation des études de cas. À la lumière de l'analyse de la littérature à ce sujet, l'outil d'aide à la décision choisi fut I-BIOREF, développé par CanmetÉNERGIE à Varennes de Ressources

naturelles Canada. À la suite d'une analyse critique des différents OAD disponibles actuellement, I-BIOREF est ressorti comme celui ayant les données les plus récentes sur les voies technologiques de bioraffinage existantes, tout en donnant accès à l'utilisateur à une variété des critères, des analyses techniques et économiques complète, ainsi que des analyses de sensibilité et de scénarios. Afin d'analyser son utilisation pour l'évaluation des voies technologiques et la convivialité de l'outil pour les besoins des spécialistes en bioraffinage, une méthodologie a été mise en place.

La méthodologie est divisée en trois différentes sections. À la suite du choix d'I-BIOREF, deux études de cas ont été définies afin d'évaluer différents aspects de son utilisation. La première section est donc représentée par la première étude de cas où l'objectif était de réaliser une analyse technico-économique pour des variantes d'une même voie technologique de bioraffinage. Pour donner suite à la revue de la littérature, le procédé de pyrolyse rapide et trois configurations différentes du procédé ont été choisis. Les configurations de CFB, RC et MFB ont été choisies chacune étant différentes l'une des autres tant au niveau du réacteur qu'au niveau du portefeuille de produits. Les données économiques ont été recueillies et une méthodologie a été appliquée pour ajuster les coûts sur la même base de coûts unitaires et du nombre d'unités fonctionnelles du procédé. Une fois la base de conception identifiée, avec le CFB en tant que cas de base, deux scénarios ont été identifiés : un pour évaluer la mise en œuvre d'un procédé de pyrolyse rapide seul et un deuxième où la mise en œuvre aura lieu en l'intégrant a une scierie déjà existante, afin d'utiliser les résidus de la scierie, en tant que matière première du procédé de pyrolyse rapide. L'obtention des résultats techniques et économiques, ainsi que l'analyse de rendement a, par la suite, été réalisée de deux différentes façons. Tout d'abord, de manière indépendante du logiciel, en calculant les fonds de roulement et les bilans de masse et d'énergie et ensuite, en entrant les données nécessaires dans I-BIOREF pour refaire les mêmes étapes, mais en simulant les différentes configurations. Dans I-BIOREF, il a fallu adapter le diagramme d'écoulement et les entrées nécessaires, qui étaient représentatifs de la configuration CFB, pour les deux autres configurations. De cette manière, une comparaison entre les deux types d'analyses a pu être réalisée.

La deuxième section de la méthodologie représente la deuxième étude de cas. Celle-ci avait comme but d'effectuer une analyse multicritère pour la comparaison de deux voies technologiques différentes. Pour cette étude de cas, il était important de choisir deux technologies différentes, tout en mettant l'accent sur la production de biocarburants. Cela étant dit, l'évaluation des stratégies prometteuses pour le développement de la production des biocarburants était nécessaire. Les

procédés de gazéification avec l'unité FT et de liquéfaction hydrothermale (HTL) ont été choisis. Une fois les données nécessaires pour la simulation ont été collectées, il a été important de réaliser une analyse critique des critères multidisciplinaires disponibles dans I-BIOREF, étant donné le grand nombre qui s'y retrouve. Après le triage et raffinement, cinq différents critères ont été choisis. Par la suite, la simulation a été réalisée pour les deux procédés et une comparaison entre les deux procédés sur la base des critères a été réalisée. Ceci a permis de confirmer si les valeurs de critères de décision calculés par I-BIOREF sont facilement interprétables pour les quantifier et faciliter ainsi la comparaison.

Finalement, la troisième section de la méthodologie a permis de réaliser une analyse critique des deux études de cas, afin d'évaluer l'efficacité du logiciel pour accélérer l'évaluation et le triage des voies technologiques. Une fois les principaux résultats des deux études de cas mis de l'avant, une conclusion quant à l'utilisation du OAD dans le contexte de bioraffinage, à un stade précoce de la conception, et sa convivialité avec les besoins de ses utilisateurs a été établie.

Résultats

La première étude de cas a permis d'arriver à différents résultats. Premièrement, les paramètres d'entrée nécessaires pour la simulation du procédé de pyrolyse rapide peuvent être adaptés pour les spécifications générales de chaque configuration, sans toutefois pouvoir changer les unités fonctionnelles spécifiques. Pour la configuration RC et MFB, il n'a pas été possible de récupérer tout le char produit tel que dans l'analyse indépendante du logiciel, étant donné que par défaut, la configuration définie dans I-BIOREF invoque une recirculation partielle du char seulement. Ainsi, pour les deux configurations il n'y a que 56% du char qui a été récupéré, qui a été valorisé. Dans le cas de la configuration RC, l'unité de production de vapeur pour la cogénération et les revenus associés n'ont pas pu être représentés, mais les revenus de la vente du char ont été pris en compte. Lors de la comparaison des résultats entre les deux types d'analyses effectuées, différents éléments ont été mis en évidence. Tout d'abord, une différence de 12% entre les deux bilans d'énergie a été observée, ce qui respecte les marges de ± 20% d'une évaluation à un stade précoce de conception. De plus, les résultats des bilans de masse ont démontré une différence de 5% pour la production de bio-huile et de 13% pour la production du char. En ce qui concerne les impacts économiques, une variation de 18% a été obtenue, étant donné que moins de revenus ont été obtenus pour la configuration RC et MFB. Cette variation respecte les marges de ± 30% pour une estimation de

coûts tôt dans le processus de conception. Pour le deuxième scénario, une variation de 18% dans les coûts d'exploitation reliés à la scierie a été observée, étant donné que le calcul réalisé dans I-BIOREF est plus détaillé que celui effectué avec la première analyse. Encore une fois, le respect des marges d'incertitudes est présent. Pour les deux analyses, les résultats ont mené aux mêmes conclusions. La configuration RC s'est avérée comme ayant la meilleure performance économique due à son coût d'investissement qui est petit. Finalement, des analyses de sensibilité pour quatre paramètres ont été réalisées lors des deux analyses technico-économiques. L'analyse effectuée avec I-BIOREF a permis d'obtenir les mêmes types de variation du TRI que dans l'analyse indépendante. L'analyse de sensibilité a principalement mis de l'avant l'importance du support pour le coût capital en investissement, ainsi que le coût de la bio-huile, qui peut impacter la rentabilité du projet positivement si leur valeur est élevée, mais aussi négativement lorsqu'un environnement règlementaire n'est pas présent.

La deuxième étude de cas a permis de démontrer que la définition, l'interprétation, ainsi que la base de calcul de l'indicateur de performance relié aux critères permettent de clairement différencier les voies technologiques, en quantifiant aisément les valeurs obtenues. Trois différentes catégories de critères ont été évaluées soit la performance économique, environnementale et socio-économique. HTL est ressorti avec sa performance économique et environnementale, ce qui démontre que le procédé peut être prometteur pour l'avenir, en raison des rendements et des études réalisées. Étant donné la variété de paramètres entrants qui peuvent être changés pour effectuer une analyse de sensibilité et de scénarios, il est facilement possible d'évaluer la sensibilité du TRI à différents paramètres et d'extraire les données pour aller plus loin dans l'analyse et assembler des données pour aller plus loin dans la comparaison. Par contre, comme la maturité technologique n'est pas prise en compte pour la simulation, il a fallu prendre en compte le NMT lors de l'analyse des résultats obtenus, étant donné que la gazéification est un procédé qui a un NTM plus élevé que HTL. La viabilité économique à l'échelle commerciale doit être démontrée pour le HTL, étant donné le NMT assez bas.

Finalement, l'analyse de sensibilité effectuée avec I-BIOREF permet de rapidement évaluer la variation de différents paramètres techniques et économiques, tout en ayant accès à une comparaison visuelle avec le cas de base. Ceci permet de directement analyser l'impact d'un paramètre spécifique sur la viabilité économique du projet ou sur les différents critères qui peuvent être pris en compte.

ABSTRACT

The decarbonization of industry, including transportation, is necessary and must be implemented in order to reach the goal of carbon neutrality by 2050. One of the processes allowing the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions is biorefinery. This process, using various sources of biomass as raw material, in this case forest residues, allows the production of different biomaterials, biofuels or biochemical products, depending on the technological pathway used. In recent years, several biorefinery technological routes have been developed with a product portfolio that varies from one route to another. The implementation of these processes leads to many uncertainties related to different factors such as scale-up, yield or presence of political regulations. Industries need a decision-making system to evaluate and determine the conditions for their deployment. In particular, multi-criteria decision support tools are the most appropriate means to conduct the analysis, evaluation and comparison of these technology pathways. In addition, access to a multidisciplinary database and criteria can help stakeholders (technology developers and providers, investors, governments, regulatory agencies, research organizations, local communities, indigenous people, etc.) make informed decisions, especially at an early stage of design.

This issue raises several research questions, such as whether it is really possible to distinguish between different variants of the same technology pathway, and what categories of decision criteria would be relevant to conclude on the cost-effectiveness of a project and the evaluation of existing technology pathways? Furthermore, is there a decision support tool that can facilitate these tasks, while providing access to the necessary technical, economic, and environmental information (mass and energy balances, biobased product yields, cost estimates, environmental impacts, etc.), as well as multidisciplinary criteria to facilitate the sorting process?

The main objective of this thesis was to select a decision support tool (DST) that would allow for a comprehensive evaluation of multiple technology paths and to systematically and critically analyze whether the triage process performed with its help is accelerated and informed, following the completion of the case studies. The decision support tool chosen was I-BIOREF, developed by CanmetENERGY at Varennes at Natural Resources Canada. Following a critical analysis of the different DSTs currently available, I-BIOREF emerged as the one with the most recent data on existing biorefinery technology pathways, while providing the user access to a variety of criteria, complete technical and economic analyses, as well as sensitivity and scenario analyses. To analyze

its use for technology pathway evaluation and the usability of the tool for the needs of biorefinery specialists, a methodology was developed.

The methodology was divided into three different sections. Following the selection of I-BIOREF, two case studies were defined to evaluate different aspects of its use. The first section is therefore represented by the first case study where the objective was to perform a techno-economic analysis for variants of the same biorefinery technology pathway. As a follow-up to the literature review, the fast pyrolysis process and three different process configurations were chosen. The CFB, RC and MFB configurations were chosen, each one being different another in terms of the reactor and product portfolio. Economic data was collected, and a methodology was applied to adjust the costs on the same basis as unit costs and the number of process functional units. Once the basis of the design was identified, with the CFB as the base case, two scenarios were identified: one to evaluate the implementation of a fast pyrolysis process alone and a second one where the implementation will take place by integrating it with an existing sawmill. The sawmill residues will be used as feedstock for the fast pyrolysis process. The technical and economic results, as well as the yield analysis, were then carried out in two different ways. First, independently of the software, by calculating the working capital and the mass and energy balances, and second, by entering the necessary data in I-BIOREF to repeat the same steps but simulating the different configurations separately. In I-BIOREF, it was necessary to adapt the flow diagram and the necessary inputs, which were representative of the CFB configuration, for the other two configurations. In this way, a comparison between the two types of analyses could be performed.

The second section of the methodology represents the second case study. The purpose of this case study was to perform a multi-criteria analysis for the comparison of two different biorefinery strategies. Thus, it was important to choose two different technologies, while focusing on biofuel production, which is why the evaluation of promising strategies for the development of biofuel production was necessary. The gasification process with the FT unit and the hydrothermal liquefaction (HTL) process were chosen. Once the necessary data for the simulation was collected, it was important to perform a critical analysis of the multidisciplinary criteria available in I-BIOREF, given the large number of criteria available. After sorting and refining, five different criteria were selected. Subsequently, the simulation for both processes and a comparison between the two processes based on the criteria were performed. This confirmed whether the decision

criteria values calculated by I-BIOREF are easily interpreted to quantify them and thus facilitate the comparison.

Finally, the third section of the methodology provided a critical analysis of the two case studies to assess the effectiveness of the software in accelerating the evaluation and triage of the technology pathways. Once the main results of the two case studies were put forward, a conclusion regarding the use of DST in the biorefinery context to enhance the efficiency of the triage process at an early stage of the design, and its usability with the needs of its users was established.

Results

The first case study has led to different sorts of results and conclusions. First, the input parameters required for the simulation of the fast pyrolysis process can be adapted for the general specifications of each configuration, without being able to change the specific functional units. For the RC and MFB configuration, it was not possible to recover all the char produced, as in the independent analysis, since by default, the configuration defined in I-BIOREF invokes partial char recirculation only. Thus, for both configurations there is only 56% of the char that has been recovered, which has been valorized. In the case of the RC configuration, the steam production unit for cogeneration and the associated revenues could not be represented, but the revenues from the sale of the char were considered. When comparing the results between the two types of analyses performed, different elements were highlighted. First, a 12% difference between the two energy balances was observed, which is within the ± 20% margins of an early design evaluation. In addition, the mass balance results showed a 5% difference for bio-oil production and 13% for char production. Regarding the economic impacts, a variation of 18% was obtained, as less revenue was obtained for the RC and MFB configuration. This variation respects the ± 30% margins for a cost estimate, early in the design process. For the second scenario, a variation of 18% for the operating costs related to the sawmill was observed, since the calculation performed in I-BIOREF is more detailed than the one performed with the first analysis. Once again, the uncertainty margins are respected. For both analyses, the results led to the same conclusions. The RC configuration was found to have the best economic performance due to its small investment cost. Finally, sensitivity analyses for four parameters were performed for both techno-economic analyses. The analysis performed with I-BIOREF resulted in the same types of IRR variations as in the independent analysis. The sensitivity analysis mainly highlighted the importance of the support for the capital

cost of the investment, as well as the cost of the bio-oil, which can impact the profitability of the project positively if their value is high, but also negatively when a regulatory environment is not available.

The second case study demonstrated that the definition, interpretation, and basis for calculating the performance indicators related to the criteria allow for a clear distinction between the biorefinery strategies, easily quantifying the values obtained. Three different categories of criteria were evaluated: economic, environmental, and socio-economic performance. HTL emerged with its economic and environmental performance, demonstrating that the process may be promising for the future, due to the yields and studies conducted. Given the variety of input parameters that can be changed to perform sensitivity and scenario analysis, it is easily possible to evaluate the sensitivity of the IRR to different parameters and extract data for an additional analysis and assemble data to go further in the comparison. On the other hand, since technological maturity is not taken into account for the simulation, it was necessary to consider the TRL when analyzing the results, since gasification is a process that has a higher TRL than HTL. Economic viability at commercial scale must be demonstrated for HTL, given the rather low TRL.

Finally, the sensitivity analysis performed with I-BIOREF allows to quickly evaluate the variation of different technical and economic parameters, while having access to a visual comparison with the base case. This allows to directly analyze the impact of a specific parameter on the economic viability of the project or on the different criteria that can be considered for a project.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIÈRES xiii

LISTE DES TABLEAUX xvi

LISTE DES FIGURES xviii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xix

LISTE DES ANNEXES xx

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Plan général du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE 4

2.1 Voies technologiques de bioraffinage 4

2.1.1 Pyrolyse rapide 5

2.1.2 Gazéification 9

2.1.3 Liquéfaction hydrothermale 11

2.1.4 Valorisation des bio-huiles 12

2.1.5 Analyse critique 12

2.2 Méthodes d'évaluation des stratégies de bioraffinage, incluant le risque 13

2.2.1 Types de risques existants lors de la mise en œuvre d'une voie technologique de bioraffinage 13

2.2.2 Équilibre du risque et du retour sur investissement 14

2.2.3 Atténuation du risque par l'implantation par phase 14

2.2.4 Estimation de coûts relatifs et méthodologie LBA pour un retour 16

2.2.5 Analyse de sensibilité et de scénarios 17

2.2.6 Analyse critique.....18

2.3 Méthodes et approches relatives aux processus de prises de décision pour la mise en œuvre des voies technologiques de bioraffinage.....18

2.3.1 Analyse de décision multicritère (ADMC) pour appuyer la prise de décision systématique 19

2.3.2 Critères ADMC pour la prise de décision d'une stratégie de bioraffinage 20

2.3.3 Analyse critique.....22

2.4 Systèmes et outils d'aide à la décision 23

2.4.1 Système d'aide à la décision : bénéfices et limitations 23

2.4.2 Catégories d'outils d'aide à la décision.....24

2.4.3 Exemples d'outils d'aide à la décision utilisés dans le contexte de la bioéconomie et du bioraffinage 25

2.4.4 Analyse critique.....30

2.5 Synthèse de la revue de la littérature.....31

2.5.1 Lacunes dans le corps de connaissance.....33

CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL 34

3.1 Hypothèses de recherche.....34

3.2 Objectifs des travaux.....34

3.2.1 Objectif principal.....34

3.2.2 Objectifs spécifiques 35

3.3 Présentation des études de cas.....35

3.4 Méthodologie du projet de recherche.....36

3.4.1 Approche globale 36

3.5 Analyse technico-économique de trois configurations du procédé de pyrolyse rapide .38

3.5.1 Présentation des trois configurations.....38

3.5.2 Choix des Indicateurs de Performance Clés (IPC) et estimations des coûts relatifs ..40

3.5.3 Présentation des scénarios de pyrolyse rapide et hypothèses.....43

3.5.4 Résultats de l'analyse technico-économique réalisée sans utilisation d'I-BIOREF ..45

3.5.5 Résultats de l'analyse technico-économique réalisée avec I-BIOREF 51

3.6 Aide à la décision multicritère pour distinguer deux différentes voies technologiques pour la production de biocarburants.....61

3.6.1 Présentation des deux voies technologiques de bioraffinage 61

3.6.2 Choix de critères parmi ceux disponibles dans le logiciel 63

3.6.3 Résultats techniques 65

3.6.4 Résultats de l'analyse multicritère 67

3.7 Retour sur les résultats obtenus pour les 2 études de cas pour valider l'hypothèse générale 72

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE 75

4.1 Utilisation d'I-BIOREF dans le génie de conception de procédés.....75

4.2 Enjeux et améliorations possibles pour l'outil d'aide à la décision 80

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 82

5.1 Contribution au corps de connaissances et recommandations 83

RÉFÉRENCES..... 85

ANNEXES 90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Technologies de pyrolyse rapides existantes et leurs propriétés 8

Tableau 2.2 Particularités et limitations des types de gazogènes existants 10

Tableau 2.3 Comparaison des outils d'aide à la décision existants 28

Tableau 3.1 Indicateurs de Performance Clés (IPC) choisis pour la première étude de cas 41

Tableau 3.2 Scénarios mis en place pour les trois configurations pour l'analyse technico-économique 44

Tableau 3.3 Hypothèses de la première étude de cas 44

Tableau 3.4 Conditions d'opération supposées pour les trois configurations de pyrolyse rapide .. 45

Tableau 3.5 Rendements et teneur en carbone présumés pour les configurations 46

Tableau 3.6 Bilans de masse calculés 47

Tableau 3.7 Bilans d'énergie obtenus 48

Tableau 3.8 Résultats économique du scénario 1 49

Tableau 3.9 Résultats économiques pour le scénario 2 50

Tableau 3.10 Données utilisées pour les intrants du procédé de pyrolyse rapide 53

Tableau 3.11 Bilans de masse obtenu avec I-BIOREF 54

Tableau 3.12 Bilans d’énergie obtenus avec I-BIOREF 55

Tableau 3.13 Résultats économiques du premier scénario d'implémentation 57

Tableau 3.14 Résultats économiques obtenus avec I-BIOREF pour le scénario 2 58

Tableau 3.15 Critères choisis comme étant significatifs pour l'étude de cas 64

Tableau 3.16 Hypothèses technico-économiques 65

Tableau 3.17 Résultats techniques obtenus avec la simulation sur I-BIOREF 66

Tableau 3.18 Résultats économiques obtenus avec I-BIOREF 66

Tableau 3.19 Valeurs des critères obtenus à la suite de la simulation 67

Tableau 3.20 Paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité.....68

Tableau 3.21 Impact du changement de la capacité sur les critères choisis pour le procédé HTL 71

Tableau 3.22 Impact du changement de la capacité sur les critères choisis pour le procédé de gazéification 71

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Implantation par phases pour les voies technologiques de bioraffinage (inspiré de [45]) 15

Figure 2.2 Méthodologie LBA pour l'estimation de coûts (adapté de [48]) 17

Figure 3.1 Méthodologie du projet de recherche 37

Figure 3.2 Diagramme d'écoulement des configurations de pyrolyse rapide étudiées. De haut en bas : Lit fluidisé Circulant (CFB), Cône Rotatif (RC), Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB).....40

Figure 3.3 Diagramme d'écoulement de la configuration de pyrolyse rapide présente dans I-BIOREF.....52

Figure 3.4 Analyse de sensibilité réalisée avec I-BIOREF.....59

Figure 3.5 Procédé de gazéification 61

Figure 3.6 Procédé de liquéfaction hydrothermale 62

Figure 3.7 Résultats de l'analyse de sensibilité pour les cinq paramètres.....69

Figure 4.1 Utilisation d'I-BIOREF pour la conception des procédés.....77

Figure 4.2 Conclusions quant à l'utilisation d'I-BIOREF pour les études de cas.....79

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV Analyse de cycle de vie

CFB Lit fluidisé circulant

FT Fischer-Tropsch

GES Gaz à effets de serre

HTL Liquéfaction hydrothermale

IPC Indicateurs de performance clés

LBA Méthodologie Large Block Analysis

MFB Lit fluidisé assisté mécaniquement

NCGs Gaz non-condensable

NMT Niveau de maturité technologique

OAD Outil d'aide à la décision

RC Cône rotatif

Tma Tonne métrique anyhdre ou tonne métrique sèche

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Article 1 : Comparative Analysis and Benchmarking of Commercial and Emerging Fast Pyrolysis Technologies 90

Annexe B Article 2 : Technology Pathways for the Production of Renewable and Sustainable Biofuels: Multi-criteria Assessment. 125

Annexe C Analyse technico-économique 154

Annexe D Analyse Multicritère 163

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

En juin 2021, le Gouvernement du Canada a fait passer la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* pour engager le pays à atteindre une carboneutralité d'ici 2050[1]. Dans un monde où les émissions de gaz à effet de serre (GES) ne cessent d'augmenter, cet objectif du Gouvernement peut sembler irréalisable. Afin d'atteindre cet objectif de carboneutralité, il est nécessaire de mettre en place des procédés pour la décarbonisation, notamment dans le milieu industriel. La mise en place de procédés qui permettent de participer à la réduction des émissions GES a commencé il y a plus de 10 ans et leur mise en œuvre aujourd'hui devient de plus en plus populaire. Parmi ces procédés permettant la décarbonisation, celui de bioraffinage prend de plus en plus d'ampleur. Le procédé de bioraffinage utilise comme matière première la biomasse et plus précisément les résidus forestiers. Au Canada, la biomasse est présente en grande quantité et est considérée comme une ressource renouvelable. Cette biomasse est caractérisée plus particulièrement par des résidus forestiers, que peu de procédés exploitent puisque ces résidus sont considérés comme étant de moindre qualité. La transformation de la biomasse peut permettre l'obtention de plusieurs bioproduits comme des biomatériaux, des biocarburants ou des produits biochimiques. Tous ces facteurs font en sorte que de plus en plus de compagnies prennent en compte la mise en œuvre de projets de bioraffinage.

Aujourd'hui, différents procédés de bioraffinage existent et d'une voie technologique à une autre, le portfolio des produits diffère. Cependant, l'implémentation d'un procédé de bioraffinage vient avec beaucoup d'incertitudes liées à différents facteurs comme l'accès à la biomasse, le prix des matières premières, le rendement et l'efficacité des technologies émergentes, le prix de bioproduits et leur volatilité sur le marché, les nouvelles politiques et réglementations mises en place par les gouvernements, la fiabilité économique du procédé à long terme ou l'impact socio-économique. Les compagnies qui, souvent, doivent prendre des décisions tôt dans la conception doivent être en mesure de prendre en compte toutes ces incertitudes.

Selon le choix que les compagnies doivent effectuer, plusieurs éléments sont à prendre en considération :

- Pour le choix d'une configuration d'une voie technologique de bioraffinage, les compagnies ont besoin de pouvoir distinguer les informations provenant des différents développeurs de technologie pour les variantes étudiées;

- Pour une sélection d'une stratégie de bioraffinage parmi toutes celles existantes, les compagnies ont besoin de pouvoir considérer différents critères dans leur processus de prise de décision, afin de pouvoir effectuer une analyse multicritère et prendre en compte tous les aspects importants de la mise en œuvre allant de la performance économique, à la performance environnementale ou celle socio-économique.

Afin d'aider les compagnies à faire un choix éclairé parmi un éventail de voies technologiques de bioraffinage, un système de prise de décision devrait être mis à leur disposition étant donné que leurs ressources sont souvent limitées lorsqu'il est question d'avoir accès aux informations technologiques ou économiques reliées aux procédés. L'utilisation d'outils d'aide à la décision peut permettre aux entreprises d'identifier des solutions viables pour les stratégies de bioraffinage et d'évaluer les avantages de la mise en œuvre de ces procédés à l'aide de critères de décision. Les compagnies seront ainsi capables de choisir les meilleures voies technologiques pour une mise en œuvre d'une stratégie de bioraffinage et de prendre des décisions de manière informée et éclairée, tôt dans les étapes de conception.

En établissant les différentes problématiques, quatre questions de recherche y ressortent :

1. Tôt dans le processus de conception, est-il réellement possible de distinguer entre les différentes variantes d'une même voie technologique de bioraffinage, pour effectuer un triage et arriver à un choix final ?

2. Si une mise en œuvre d'une stratégie de bioraffinage est nécessaire d'ici 2030, est-il possible d'examiner globalement les voies technologiques existantes, pour arriver à une décision finale et choisir une stratégie en particulier pour la mise en œuvre?

3. Quels seraient les critères précis à prendre en compte pour pouvoir conclure quant à la rentabilité d'un projet de bioraffinage?

4. Avec les catégories de critères existantes et l'éventail de critères dans chaque catégorie, y a-t-il un outil d'aide à la décision qui peut fournir l'aide nécessaire aux compagnies pour arriver à une décision finale de manière éclairée, tout en fournissant l'accès aux informations nécessaires, tôt dans le processus de conception (estimations de coûts robustes, entrants et sortants de procédé, etc.) ?

1.1 Plan général du mémoire

La présentation du travail de recherche et des résultats obtenus se fera à travers quatre différents chapitres. Le chapitre 2 abordera la revue de la littérature en lien avec les problématiques et les questions de recherche relevées dans ce premier chapitre. Les lacunes dans le corps de connaissances y seront également identifiées. Le chapitre 3 présentera la synthèse de l'ensemble du travail réalisé. La première partie de ce chapitre étalera les hypothèses de recherche, les objectifs du projet de recherche, ainsi que la méthodologie utilisée pour la réalisation des travaux et des études de cas. La deuxième partie sera composée de la présentation des résultats, qui permettra de valider les hypothèses de recherche. Le chapitre 4 abordera une discussion critique des résultats obtenus, ainsi que les forces et faiblesses des méthodes développées. Le chapitre 5 permettra de conclure quant aux contributions du mémoire à l'avancement des connaissances et servira à émettre des recommandations pour des travaux futurs. Finalement les annexes A et B seront composées des publications qui ont été rédigées à la suite de ces travaux et qui ont été soumis à des revues scientifiques.

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, il sera question de traiter les dilemmes présents lors de la sélection de voies technologiques de bioraffinage, ainsi que les outils d'aide à la décision et de décortiquer les travaux pertinents dans la littérature pour le mémoire. Dans un premier temps, les voies technologiques de bioraffinage existantes seront traitées et plus particulièrement, celles reliées à la production des biocarburants, qui est l'un des principaux sujets des études de cas traitées dans ce mémoire. Trois voies technologiques seront étudiées de manière plus détaillée, à savoir la pyrolyse rapide, la gazéification ainsi que la liquéfaction hydrothermale. Ensuite, les thèmes des risques de la mise en œuvre des procédés, la balance entre le risque et le retour, ainsi que l'évaluation des coûts d'opération et d'investissement seront traités. Ces sujets sont importants lors d'un choix d'une variante de voie technologique étant donné qu'il faut être en mesure de comparer les différentes configurations et stratégies disponibles. Le processus de prise de décision sera traité par la suite vu son importance lors de l'évaluation des différentes les stratégies de procédés biocarburants. L'importance des catégories multidisciplinaires de critères et l'implication des parties prenantes seront aussi traitées. Finalement, dans la dernière section, les outils d'aide à la décision seront présentés, plus précisément ceux propres à l'évaluation de procédés de bioraffinage et seront évalués, afin de pouvoir sélectionner celui qui sera utilisé pour les études de cas dans cadre de ce travail de recherche.

2.1 Voies technologiques de bioraffinage

Depuis l'apparition des procédés de bioraffinage et leur développement, trois différentes générations se sont succédé. La première génération produit des biocarburants à partir des huiles végétales et des graisses animales ce qui donne moins de souplesse aux procédés, mais leur confère un Niveau de Maturité Technologique (NMT) rendu à l'échelle commerciale étant donné que les procédés ont été mise en place depuis de longues années[2]. Il y a eu ensuite les biocarburants de deuxième génération qui ont une meilleure performance environnementale par rapport à la première génération et qui ont une utilisation plus durable des terres. Ces procédés plus avancés utilisent la biomasse lignocellulosique pour produire des biocarburants. L'utilisation de la biomasse lignocellulosique offre une plus grande flexibilité, mais il est important de noter qu'il existe encore des incertitudes liées à la variabilité de la composition chimique de la matière première et des défis

techniques pour adapter les technologies aux procédés de fabrication des biocarburants. Finalement, la troisième génération de biocarburants utilise une matière première fournie par des déchets agricoles et organiques ainsi que par des algues.

Pour cette recherche, l'accent a été mis sur la deuxième génération de biocarburants, qui ont un grand potentiel pour la réduction des GES.

Il existe deux types de conversions utilisées pour produire des biocarburants de deuxième génération : la conversion biochimique et la conversion thermochimique[2, 3]. La conversion biochimique peut être réalisée par des procédés comme la digestion anaérobie ou aérobie, la fermentation ou les procédés enzymatiques pour produire du bioéthanol et du biométhane. La conversion thermochimique est représentée par des procédés comme la pyrolyse, la liquéfaction hydrothermale, la torréfaction ou la gazéification qui sont utilisés pour produire du bio hydrogène, du gaz naturel biosynthétique et des hydrocarbures d'appoint. Une mise à niveau des huiles brutes obtenues avec ces procédés est nécessaire pour obtenir des biocarburants ayant des propriétés similaires aux carburants fossiles qui seront remplacés. Pour ce travail de recherche, l’emphase a été mise sur des procédés qui sont avancés du point de vue de leur NMT, mais aussi qui semble très prometteur pour le futur et la décarbonisation du secteur industriel. Trois différentes voies technologiques seront présentées dans cette sous-section, soit la pyrolyse rapide, la gazéification, ainsi que la liquéfaction hydrothermale. Pour chacune d’entre elles, les différentes configurations de réacteur seront présentées, ainsi que les propriétés des produits obtenus.

2.1.1 Pyrolyse rapide

Le procédé de pyrolyse existe depuis longtemps, mais le procédé de pyrolyse rapide n'a été développé pour les liquides qu'au cours des 40 dernières années. La pyrolyse rapide est un procédé de conversion thermochimique, en quasi absence d'oxygène, qui permet de liquéfier la biomasse solide en bio-huile liquide, avec un fort potentiel pour les applications énergétiques ainsi que pour les bioproduits à valeur ajoutée[4]. Comparé à d'autres types de pyrolyse, le procédé de pyrolyse rapide nécessite une température d'environ 500 °C, un court temps de séjour de la vapeur (moins de 2 secondes versus un temps de séjour variant de 5 secondes à plusieurs heures pour les autres types de pyrolyse) et un court temps de séjour du solide (jusqu'à 10 secondes).

Selon Bridgewater [5], il y a cinq caractéristiques fondamentales à prendre en compte pour le procédé de pyrolyse rapide. Tout d'abord, une teneur en eau de l'alimentation inférieure à 10% est nécessaire étant donné qu'une teneur en humidité plus élevée peut générer une séparation des phases dans le réacteur. Le fait d'assurer des taux de chauffage et des taux de transfert de chaleur élevés avec une biomasse finement broyée (moins de 3 mm) est aussi à prendre en considération puisque l'épaisseur des particules a un impact sur la surface de contact. Par la suite, une température contrôlée autour de 500 °C et un temps de résidence des vapeurs court (moins de 2 secondes) sont nécessaires. L'élimination rapide du char produit afin de minimiser le craquage des vapeurs chaudes, ainsi que le refroidissement rapide des vapeurs de pyrolyse pour produire de la bio-huile font aussi partie de la liste des propriétés à respecter pour le procédé.

La pyrolyse rapide permet d'obtenir trois produits principaux dont le rendement va varier dépendamment des réacteurs et des conditions d'opération [6, 7] :

- Liquide (bio-huile et eau) : 60-75 % en poids
- Char : 15-25 % en poids
- Gaz non condensables : 10-20 % en poids

Dans les dernières années, les technologies ont continué à évoluer dans le but d'amener certaines voies technologiques à l'échelle industrielle. Certains de ces développements ont été accélérés afin d'amener les technologies à un NMT de 6 et plus, comme les réacteurs à lit fluidisé circulant (CFB), à lit fluidisé bouillonnant (BFB), à cône rotatif, sous vide, à vortex ablatif, à lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB), les réacteurs à vis sans fin ou à micro-ondes. Un sommaire de ces technologies et des différentes particularités retrouvées dans la littérature est donné dans le Tableau 2.1. Les exigences pour obtenir un rendement maximal dépendent de la technologie et comme il est possible d'observer dans le tableau le rendement maximal n'est pas toujours représenté par les mêmes pourcentages pour toutes les configurations. Ces particularités d'un fournisseur de technologie à un autre, ce pour quoi il est important de bien examiner les informations fournies lors d'un projet de mise en œuvre.

Les tendances actuelles de la technologie de pyrolyse rapide modifient le paradigme historique du procédé avec des liquides à valeur ajoutée, du biochar à valeur ajoutée et de la modularisation de la technologie. Voici quelques exemples des tendances actuelles en matière de pyrolyse rapide :

- BTG Bioliquids et TechnipFMC en Suède ont établi le 31 janvier 2022 une usine de pyrolyse rapide, avec un réacteur à cône rotatif, pour convertir les résidus de scierie. L'usine a une capacité de production de 24 000 tonnes de bio-huile par an avec la technologie de pyrolyse rapide développée par BTG-BTL [8].
- En 2016, Vyterra a obtenu la licence de commercialisation d'une technologie de pyrolyse basé sur des réacteurs à lit fluidisé, à Port-Cartier, afin de produire 40 millions de L/an à partir de 65 000 tonnes métriques sèches de biomasse lignocellulosique par an[9].
- La compagnie Bio-TechFar a développé un nouveau réacteur, un réacteur à fluidisation mécanique qui a quatre sous-produits : l'huile de pyrolyse, le charbon, le gaz de pyrolyse et l'eau. Ce réacteur a été créé afin de traiter la biomasse de 2e génération comme les matériaux lignocellulosiques et les déchets[10].
- Le travail de recherche effectué à l'Université d'État de l'Iowa a permis de développer un nouveau réacteur autothermique et d'approfondir les connaissances sur la condensation progressive pour ajouter de la valeur aux produits. Une approche de modularisation et d'intensification des procédés est aussi étudiée au sein de l'institut RAPID (*Rapid Advancement in Process Intensification Deployment*)[11, 12].

Avec les avancements des dernières années de la pyrolyse rapide, son NMT est rendu à 8, ce qui signifie que la technologie a atteint une maturité pour la mise en œuvre à grande échelle[13, 14].

Tableau 2.1 Technologies de pyrolyse rapides existantes et leurs propriétés

Technologie de pyrolyse rapide	**Taille des particules (mm)**	**Temps de résidence (s)**	**Rendement de la bio-huile (%) (Sur une base sèche)**	**Particularités**	**Référence**
Lit Fluidisé Circulant (CFB)	1-2	0.5-1	60-70	○ Adapté pour les grands débits ○ La taille des particules du biocharbon est diminuée de manière progressive due à la vitesse de gaz plus élevée. (Séparation à l'aide d'un cyclone)	[15, 16]
Lit Fluidisé Bouillonnant (BFB)	2-3	2-3	70-75	○ Bon contrôle de la température ○ Facilité pour réaliser une mise à l'échelle ○ Temps de séjour des solides et des vapeurs contrôlés par le débit du gaz de fluidisation	[15, 16]
Cône Rotatif (RC)	0.2µm-2cm	1	50-70	○ Centrifugation utilisée pour entrainer le sable et la biomasse à l'extérieur du réacteur ○ Moins de gaz nécessaire pour le réacteur	[15, 17, 18]
Sous-vide	2-5 cm	-	30-45	○ Moins de teneur en carbone dans le produit liquide en raison des vitesses de gaz plus faible ○ Pas de gaz porteur nécessaire ○ Mécaniquement plus compliqué que les autres	[15, 16]
Vortex ablatif	Jusqu'à 20	50-100 millisecondes	60-65	○ Équipement plus petit, car il n'y a pas de gaz inerte utilisé ○ Limité par l'alimentation en chaleur du réacteur	[15, 16]
Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB)	4-8	0.7-1.7	40-60	○ Mélange effectué de manière mécanique ○ Pas de gaz de fluidisation utilisé ○ Le mélange entre la biomasse injectée et le matériau du lit est homogène	[19, 20]
À vis sans fin	Jusqu'à 20	5-30	30-50	○ Pas de gaz porteur nécessaire ○ Température nécessaire au réacteur plus basse (400°C). ○ Procédé continu	[21-23]
Micro-ondes	2–6	10-25 min	20–40 (dépendamment de la température)	○ Le chauffage se produit par l'interaction de la biomasse avec l'élément électrique de l'onde électromagnétique. ○ Les grandes particules peuvent être utilisées sans qu'il soit nécessaire de recourir à un prétraitement à forte intensité énergétique pour réduire la taille des particules.	[24-26]

2.1.2 Gazéification

La gazéification est un procédé catalytique ayant lieu à de hautes températures (entre 800 et 1500 °C). Il est utilisé par de nombreuses compagnies depuis les années 70 [27]. Son niveau de maturité technologique (NMT) est assez avancé (autour de 9) et des mises en œuvre à des niveaux industriels ont déjà eu lieu [14]. Le procédé de gazéification permet de transformer la matière première, à l'aide d'une oxydation partielle en utilisant un rapport air/oxygène, pour obtenir un intermédiaire gazeux inflammable appelé gaz de synthèse. Ce gaz de synthèse est composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène avec la présence de dioxyde de carbone, de vapeur d'eau et de méthane. Un prétraitement de la matière première est nécessaire, afin d'obtenir une teneur en eau variant entre 10 et 20% et pour certains types de réacteurs un broyage et déchiquetage peut être nécessaire [14]. Les gazogènes sont classés en trois catégories : à lit fixe, à lit fluidisé et à flux entrainé. Le Tableau 2.2 présente les particularités ainsi que les limitations des trois catégories principales de gazogènes.

Des conditions de purification du gaz de synthèse sont nécessaires pour ajuster la composition de celui-ci et les différents ratios nécessaires pour l'obtention des biocarburants ayant les mêmes propriétés que les carburants fossiles. À la sortie du gazogène, le gaz de synthèse contient des goudrons, de l'azote, du soufre et des halogénures. Ces contaminants en grande quantité peuvent provoquer de la corrosion ou de l'obstruction en aval du gazogène et rendre impropre le gaz de synthèse pour la production de biocarburants. Une concentration précise en contaminants doit être respectée pour le traitement du gaz de synthèse afin de permettre l'obtention de biocarburant [27, 28].

Pour la production des biocarburants à partir du processus de gazéification, le procédé de Fisher-Tropsch (FT) est nécessaire pour le traitement du gaz de synthèse. Ce procédé consiste principalement en une réaction de polymérisation utilisant des catalyseurs tels que le CO ou le Fe pour que le CO et le H_2 présents dans le gaz de synthèse puissent interagir et former un initiateur de chaîne à la surface du catalyseur[27]. Cette synthèse nécessite un rapport stœchiométrique H_2/CO légèrement supérieur à deux et utilise généralement un réacteur de conversion du gaz à l'eau (*Water Gas Shift* [WGS]) pour traiter le gaz de synthèse et obtenir le rapport stœchiométrique adéquat[29, 30]. Étant donné qu'elle est utilisée depuis plusieurs décennies, la synthèse de FT est une des seules à avoir été prouvée à grande échelle et commercialisée pour la production de

biocarburants[30]. Cependant, le contrôle de la température et la dissipation de la chaleur sont cruciaux lors de cette synthèse. Un autre principal obstacle est la différence d'échelle entre le procédé de gazéification et celui de FT. Le procédé de gazéification est souvent utilisé pour des échelles plus modérées, mais la synthèse de FT a besoin d'un taux d'alimentation plus élevé[31].

Tableau 2.2 Particularités et limitations des types de gazogènes existants

Type de gazogène	**Particularités**	**Limitations**	**Références**
À lit fixe	• Configuration à courant ascendant ou descendant • Idéal pour les procédés à petite échelle • Conception simple • Traitement préalable minimal des matières premières	• Potentiel de mise à l'échelle limité • Grand rendement en tar et cendre • Non-uniformité dans la température du réacteur.	[27-29, 32, 33]
À lit fluidisé	• Configuration à lit bouillonnant peut être utilisée pour les déchets prétraités • Configuration à lit circulant est utilisée pour la biomasse • Permets d'obtenir un gaz de synthèse de plus grande qualité grâce au contrôle plus facile du rapport H2/CO • Idéal pour les procédés à grande échelle	• Peut former des mélanges visqueux, ce qui empêche la fluidisation, diminue la température des réactions. • Non rentable pour des procédés à petite échelle	
À flux entrainé	• Peut être utilisé pour la biomasse ou pour le carbone • Teneur en goudron ou méthane est négligeable, car le procédé de gazéification est plus complet • Épuration des gaz de synthèse simplifiée avec l'élimination des scories • Utilisation de cyclone pas nécessaire.	• Températures très élevées qui doivent être maintenues • Conception complexe.	

2.1.3 Liquéfaction hydrothermale

La liquéfaction hydrothermale est un procédé qui permet de traiter la matière première dans un milieu aqueux et à des conditions se situant autour du point critique de l'eau (250°C à 450°C et 4MPa à 30MPa), en présence d'un catalyseur pour obtenir une bio-huile brute. Les conditions peuvent être sous-critiques ou supercritiques[14]. Il a cependant été démontré que les conditions sous-critiques sont plus efficaces (260-380°C et 25-30 MPa) [34] .Ce procédé permet de traiter la biomasse humide, ce qui implique que la biomasse à forte teneur en eau peut être traitée et qu'aucun séchage n'est requis pour réaliser la réaction. Ce procédé peut avoir lieu dans un réacteur batch, semi-batch ou continu[35].

L'application de ce procédé pour la production des biocarburants s'est intensifiée dans les dernières années avec l'urgence de remplacer les carburants fossiles et de diriger l'industrie vers une carboneutralité. Ce procédé est très prometteur pour le futur, car il a une faible empreinte carbone et les biocarburants sortant de ce procédé ont une faible teneur en carbone. Un autre bénéfice de ce procédé est la faible teneur en oxygène de la bio huile obtenue. 85% de l'oxygène provenant de la matière première à l'entrée du procédé est extrait sous forme de CO2, d'eau ou d'autre composé organiques solubles dans l'eau [35, 36]. De plus, son rendement est situé entre 20% et 30%. Par contre, puisque la recherche intensive sur ce procédé n'a commencé que récemment, son développement n'est pas rendu au même niveau commercial que les procédés de gazéification ou de pyrolyse rapide, son NMT étant seulement autour de 5 [13, 14]. Par ailleurs, plusieurs obstacles techniques et incertitudes au niveau du procédé sont encore présents.

L'utilisation d'un bon catalyseur dans la liquéfaction hydrothermale permet de réduire la pression et la température de la réaction, tout en améliorant le rendement et en réduisant les déchets solides produits[37]. Son choix dépend beaucoup de la matière première utilisée et de son contenu en carbone. Ceci implique aussi que la matière première utilisée a aussi un impact sur la performance technique du procédé. La température joue un rôle crucial dans le procédé et dans l'efficacité globale. Une température critique stable favorise le rendement de la bio-huile obtenue, tandis qu'une température plus élevée diminue le rendement [34]. Ensuite, malgré le fait que la matière première n'a pas besoin d'être séchée, celle-ci doit être prétraitée afin d'obtenir une boue à une température élevée, qui à long terme peut avoir un impact sur la durée de vie des équipements tels

que les pompes et les vannes [14]. Finalement, la bio-huile obtenue est souvent visqueuse, ce qui peut rendre son transport et son stockage difficile [38].

2.1.4 Valorisation des bio-huiles

La bio-huile brute obtenue à la suite des différents procédés présentés précédemment n'a pas des propriétés correspondantes à celles d'un carburant fossile, puisque son contenu en oxygène est notamment trop élevé. Il est donc primordial de faire une mise à niveau en utilisant un autre procédé. Une des technologies les plus prometteuses pour faire une mise à niveau est l'hydrotraitement[39, 40]. Cette technique, étant déjà utilisée dans les raffineries de pétrole pour éliminer le soufre, l'oxygène, l'azote et hydrogéner les composés aromatiques, est une des meilleures pour augmenter le rendement en hydrocarbures et éliminer l'oxygène des bio-huiles [40]. Des pressions partielles élevées d'hydrogène sont utilisées pour permettre une élimination de l'oxygène sous forme d'eau. L'utilisation d'un catalyseur est essentielle pour ce procédé. Le catalyseur utilisé doit permettre une élimination maximale d'oxygène et consommer peu d'hydrogène, tout en formant peu de coke. Le catalyseur hétérogène est un des plus utilisés pour la transformation des bio-huiles en biocarburants[39]. Ils sont plus efficaces et ont une grande capacité de récupération. À la fin de l'hydrotraitement, les biocarburants doivent respecter les caractéristiques de diesel ou du carburant marin comme l'indice de cétane, la densité ou l'aromaticité.

2.1.5 Analyse critique

Dans cette première section de la revue de la littérature, il a été question des différentes voies de bioraffinage existantes, leurs particularités, ainsi que leurs limitations. Les voies technologiques présentées plus en détail sont celles principalement abordées plus loin dans le mémoire. Tôt dans le processus de conception, il est possible de constater que de nombreuses informations sont manquantes, surtout quand les informations proviennent des développeurs de technologies. Il est important de traiter ces informations avec certaines précautions, en particulier celles reliées aux réacteurs, au rendement ou au type de matières entrantes dont les résultats de leurs applications peuvent varier avec une mise à l'échelle. Ces données reliées aux paramètres techniques mais aussi aux coûts d'investissement et d'opérations doivent donc être traitées minutieusement, afin de pouvoir les comparer sur la même base. Lors de la prise de décision de la mise en œuvre d'une

variante d’une voie technologique ou d’une stratégie de bioraffinage, il faut prendre en compte les informations recueillies auprès des différents fournisseurs, mais le risque associé à leur considération doit aussi être évalué.

2.2 Méthodes d’évaluation des stratégies de bioraffinage, incluant le risque

Tôt dans les étapes de conception, il est important de minimiser les risques existants, afin d’assurer un retour sur l’investissement et surtout d’être en mesure de balancer les risques et le retour.

2.2.1 Types de risques existants lors de la mise en œuvre d’une voie technologique de bioraffinage

La mise en œuvre de bioraffineries à un stade précoce s'accompagne de beaucoup d'incertitudes et de risques. Il y a des incertitudes liées aux informations sur les technologies émergentes, en particulier pour celles qui sont encore en cours de développement, mais aussi des incertitudes liées à la mise à l'échelle, aux rendements, aux coûts d'exploitation, aux coûts d'investissement et aux investissements futurs qui seront nécessaires si la technologie finit par arriver à atteindre une plus grande maturité [41, 42]. En examinant de plus près certaines catégories de risques, on trouve les risques liés au marché, à la technologie, aux finances, à la réglementation et à la chaîne logistique. Abbati de Assis et al. [41] ont développé un tableau pour l'économie biosourcée avec toutes ces catégories en présentant les différents risques associés à chaque catégorie et des mesures d'atténuation proposées. Pour le risque de marché, l'incertitude sur le coût des matières premières et la volatilité du coût du produit final ont été présentées. En ce qui concerne le risque technologique, outre les risques susmentionnés en lien avec les rendements et les mises à l’échelle, la variété des matières premières a également été présentée. Le risque réglementaire est l'un des risques les plus importants, car les politiques et les subventions peuvent changer continuellement et leur prise en compte lors de la mise en œuvre du procédé de bioraffinage est cruciale pour la rentabilité. Enfin, les risques de la chaîne d'approvisionnement sont liés à la distribution, au rendement et à la variabilité des matières premières, ainsi qu'à la distribution du produit final, qui peuvent être déterminants pour la viabilité économique du procédé.

2.2.2 Équilibre du risque et du retour sur investissement

Il est essentiel d'atténuer tous les risques décrits dans la section précédente pour assurer un retour d'investissement. Oehmen et Seering [43] ont développé quatre principes de conception axée sur les risques. Après avoir identifié les incertitudes concernant les risques de conception, le deuxième principe consiste à prendre des décisions en fonction des risques. Encore une fois, la transparence de ce principe est essentielle afin de pouvoir faire des compromis entre les options éventuelles. Il est important de trouver un équilibre entre les options à haut risque et à rendement élevé et les options à faible risque et à faible rendement. Ainsi, il sera plus facile d'éliminer les options à haut risque et faible rendement et de conserver celles à faible risque et fort rendement. En revanche, ces risques de conception ne sont pas toujours les mêmes que les risques liés aux procédés de bioraffinage. À un stade précoce de la conception, il y de nombreuses incertitudes pour les technologies de bioraffinage émergentes. Comme il a été décrit précédemment, de nombreux risques sont présents, notamment en ce qui concerne la mise à l'échelle, les rendements, les coûts d'exploitation, les améliorations futures des coûts au fur et à mesure de la maturation de la technologie ou l'approvisionnement en matières premières (sa disponibilité et son coût) [42]. Tous ces risques ont un impact sur les calculs économiques et les niveaux de confiance des valeurs obtenues.

Un autre élément important pour balancer le risque et le retour lors de la mise en œuvre d'un procédé de bioraffinage est d'avoir un potentiel de croissance et un marché garanti. De plus, l'accès à des subventions ou des avantages liés à des mesures politiques peut aider à atténuer le risque, en ayant un coût d'investissement plus petit ou une subvention liée à la vente du produit final [44].

2.2.3 Atténuation du risque par l'implantation par phase

Stuart [45] a mis au point une méthodologie permettant d'aborder les incertitudes liées à la technologie et à la transformation de l'entreprise, afin d'atténuer systématiquement les risques. Il est important d'avoir une bonne stratégie de mise en œuvre. La présente méthodologie est appelée "approche par phase " et est utilisée pour la mise en œuvre des voies technologiques de bioraffinage. Elle permet d'avoir des revenus à court terme avec de nouveaux produits, afin de pouvoir augmenter graduellement les risques technologiques et de marché en développant des produits à valeur ajoutée. Trois phases différentes avec des objectifs distincts sont présentes dans

cette méthodologie et sont présentées dans la Figure 2.1. Afin d'être certain que la mise en œuvre de la bioraffinerie se fera en minimisant les risques, il est important de développer une vision stratégique pour assurer des objectifs à long et court terme et un portefeuille diversifié de produits à valeur ajoutée. Pour considérer la méthodologie, un des aspects les plus importants est que la dernière phase doit déterminer la première. La première phase a comme but de diminuer les coûts d'exploitation en remplaçant les combustibles fossiles par des biocarburants et réduire les risques technologiques au maximum, pour pouvoir développer de nouveaux produits lors de la deuxième phase. La deuxième phase est essentiellement basée sur l'augmentation des revenus avec la production des produits dérivés. Les opportunités de marché et le potentiel de partenariat doivent être évalués afin de s'assurer que le modèle d'affaires est robuste et ainsi atténuer les risques. Il est important de viser un portefeuille de produits graduel et ainsi, tenir compte de la volatilité des prix sur le marché. Finalement, la dernière phase permet d'avoir une transformation complète du modèle d'affaires et permet de développer une certaine flexibilité pour la production de différents produits dérivés.

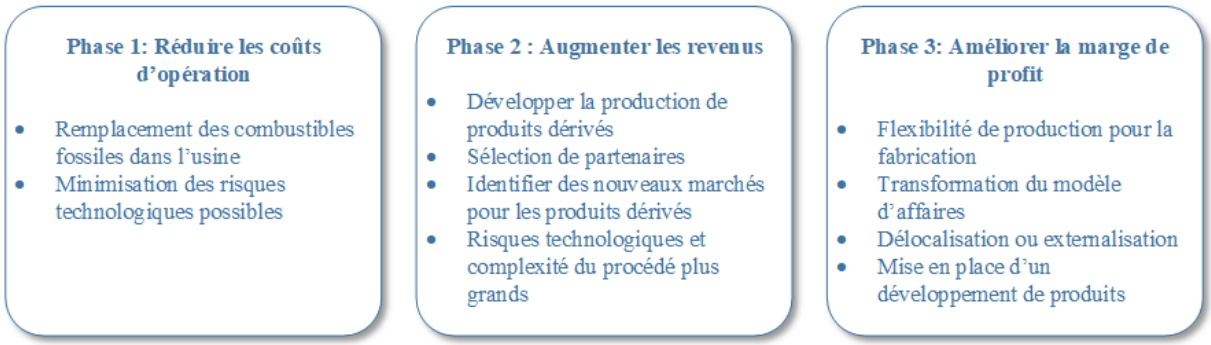

Figure 2.1 Implantation par phases pour les voies technologiques de bioraffinage (inspiré de [45])

Diffo Téguia et al. [46] ont développé différents facteurs clés à considérer pour la mise en œuvre d'une stratégie de bioraffinerie. Ils sont principalement divisés en deux catégories : la stratégie technologique et la stratégie commerciale. À long terme pour la stratégie technologique, il faut surtout prendre en compte qu'avec la fabrication des produits dérivés, il y aura un risque technologique plus élevé, car la complexité au niveau du procédé sera plus grande.

Pour la stratégie commerciale, il faut assurer la mise en place des partenariats et d'utiliser des outils d'aide à la décision pour assurer une prise de décision éclairée.

2.2.4 Estimation de coûts relatifs et méthodologie LBA pour un retour

Atténuer les risques et les incertitudes uniquement en utilisant l'approche par étapes n'est pas idéal. Il est également nécessaire de disposer de méthodologies pour l'évaluation économique. Dès les premières étapes de conception, il est essentiel d'estimer les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et les revenus, surtout lors de l'évaluation des différentes configurations de la même technologie. Les données économiques provenant des fournisseurs technologiques pour différentes configurations ne sont pas calculées avec la même base de calcul, d'où l'importance de s'assurer que toutes les configurations seront comparées sur la même base.

Un cadre technico-économique, basé sur le NMT et sur les informations disponibles des fournisseurs de technologies, a été développé par Buchner et al. [47]. Il implique que différentes méthodes d'estimation doivent être utilisées en fonction du niveau de maturité de la technologie étudiée. Par exemple, pour un NMT de deux, la stœchiométrie peut être utilisée pour l'estimation de données techniques. Pour un NMT plus grand, des données du laboratoire peuvent être utilisées. Cette méthodologie implique donc, que des méthodes d'estimations différentes doivent être utilisées si les voies technologiques ou les configurations utilisées ne sont pas au même niveau de maturité, ce qui ne constitue pas une comparaison adéquate.

Trottier et al. [48] ont mis au point une méthodologie appelée *Large Block Analysis* (LBA). Cette méthodologie a été utilisée pour la première fois par Hytönen et Stuart [49], mais de manière générale et toutes les étapes ne faisaient pas référence au LBA directement. La méthodologie actualisée permet de lever toutes les incertitudes en développant les coûts d'investissement et d'exploitation sur une base comparable, étape par étape. La Figure 2.2 présente l'approche LBA adaptée. La première étape est la détermination des objectifs et de la base de conception pour l'étude de cas, pour pouvoir par la suite recueillir les données de référence des différents fournisseurs de technologies, de la littérature, des informations publiques, etc. La définition des structures des coûts doit être bâtie par la suite, en tenant compte des différences dans le diagramme d'écoulement pour les différentes configurations et en séparant le procédé en plusieurs domaines fonctionnels, afin de s'assurer que la comparaison sera faite sur la même base. Il est important de définir une structure de coûts en ajustant tous les coûts sur la même base de conception (indice d'année, échelle de capacité) et en normalisant les coûts unitaires, étant donné que les informations provenant des fournisseurs diffèrent des pratiques internes. Une fois cette étape franchie, il sera

possible de sélectionner le cas de base en se basant principalement sur la portée de l'estimation fournie par le fournisseur, le niveau de précision fournie, l'expérience du fournisseur en lien avec la mise en œuvre industrielle vers l'échelle commerciale, et l'exhaustivité de l'estimation fournie par le fournisseur de technologie. De cette façon, il sera possible d'avoir une estimation relative des autres procédés en identifiant les différences principales et en les examinant pour arriver à avoir une estimation plus appropriée. À la fin, il sera possible de comparer l'estimation initiale avec celle obtenue avec le LBA et examiner si les nouvelles estimations sont plus réalistes et permettent d'exécuter une comparaison des configurations sur la même base, en procédant à une analyse de rentabilité. En parallèle, une évaluation de risque est nécessaire afin d'identifier les risques de marché et de technologie importants.

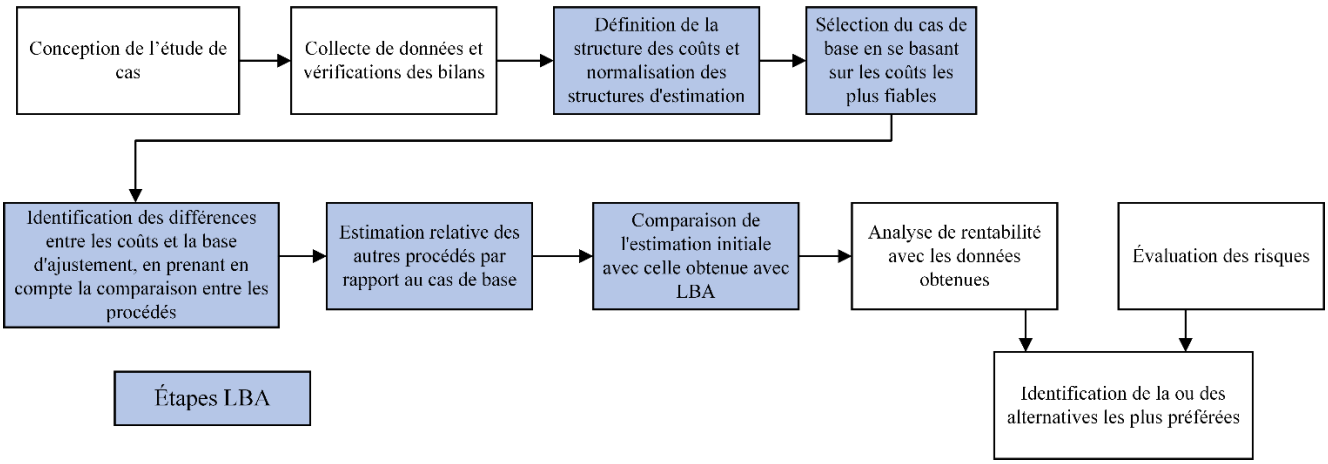

Figure 2.2 Méthodologie LBA pour l'estimation de coûts (adapté de [48])

2.2.5 Analyse de sensibilité et de scénarios

Chaque catégorie de risques nécessite des stratégies d'atténuation efficaces qui doivent être envisagées dès les premières étapes de la mise en œuvre des stratégies de bioraffinage. Une autre façon d'atténuer le risque est de procéder à une analyse de ces derniers, qui est essentielle pour la prise de décision, surtout à un stade précoce de la conception. Elle peut être qualitative ou quantitative, et comprend également des méthodes subjectives, déterministes et stochastiques [41, 49]. L'analyse de sensibilité et l'analyse de scénario, qui sont un exemple de méthode déterministe, font partie des évaluations quantitatives des risques les plus souvent utilisées. Elles permettent d'identifier les variables d'entrée ayant le plus grand impact sur le procédé. Il s'agit d'une analyse pertinente et cruciale, en particulier pour une prise de décision. Il est important de prendre en

compte non seulement les paramètres économiques pour l'analyse de sensibilité, mais aussi les paramètres et les entrées techniques, afin de prévenir les risques technologiques. Une fois cette analyse terminée, les stratégies d'atténuation doivent être appliquées. En général, l'option la moins risquée est le cas de base, et les variantes sont comparées au cas de base.

2.2.6 Analyse critique

L'importance de balancer le risque et le retour sur un investissement pour la mise en œuvre des voies technologiques vient avec beaucoup d'éléments et d'incertitudes à prendre en compte. Différents risques spécifiques à la mise en œuvre des voies technologiques de bioraffinage sont à prendre en compte, surtout tôt dans le processus de conception. L'estimation des coûts avec une méthode comme LBA ou l'atténuation des risques avec l'implémentation par phases est à prendre en compte. Le manque d'informations associées à certaines voies technologiques peut également influencer les données obtenues et donc le résultat final des analyses techno-économiques, ce qui démontre l'importance de l'utilisation de la méthodologie LBA pour combler les informations manquantes de certaines configurations en se basant sur le cas aillant les données techniques et informatiques les plus complètes et fiables. Toutefois, pour certaines évaluations de stratégies, il est important d'aller plus loin lors d'une prise de décision et considérer les risques pas seulement dans des analyses de sensibilité ou scénarios, mais en utilisant des critères bien battis et interprétables.

2.3 Méthodes et approches relatives aux processus de prises de décision pour la mise en œuvre des voies technologiques de bioraffinage

Lorsque les risques reliés à une mise en œuvre d'une voie technologique ont été identifiés, des méthodes ou des approches doivent être envisagées, afin d'assurer un processus de triage et de prise de décision menant à une décision éclairée et informée

Pour la mise en œuvre des processus de bioraffinage, il existe de nombreux facteurs de risque et d'incertitudes qui doivent être pris en compte, ainsi que les valeurs de l'entreprise ou des parties prenantes impliquées dans le projet. La définition d'un ensemble de critères de décision est cruciale pour une prise de décision éclairée. Pour s'assurer que tous les aspects importants de la mise en

œuvre d'une bioraffinerie sont pris en compte, un seul critère n'est pas suffisant. La nécessité d'une analyse multicritère pour la prise de décision est prévalente, car cette étape est cruciale pour garantir une gestion efficace des risques avant de procéder à l'analyse de sensibilité[50].

2.3.1 Analyse de décision multicritère (ADMC) pour appuyer la prise de décision systématique

La mise en commun d'un ensemble de critères de décision est cruciale pour une prise de décision éclairée et pour être sûr d'avoir pris en compte tous les aspects importants de la mise en œuvre d'une stratégie de bioraffinage. Un seul critère n'est pas suffisant, d'où la nécessité d'une analyse multicritère pour la prise de décision. Cette étape est cruciale pour assurer une gestion efficace des risques, avant de procéder à l'analyse de sensibilité [50].

L'analyse de décision multicritère (ADMC), comparée à d'autres méthodes, présente certains avantages clés pour les utilisateurs [51]. Tout d'abord, elle permet de saisir les préférences des parties prenantes en lien avec les différents critères et leur importance pour le projet. Ensuite, la méthode aide les parties prenantes à trouver facilement un consensus et finalement, comparé à d'autres méthodes, l'ADMC met davantage l'accent sur l'interprétation de chaque critère et leur définition. Comme cette approche n'est pas limitée à un domaine d'application spécifique, elle peut être appliquée dans de nombreux contextes, comme celui de la mise en œuvre bioraffineries.

Dans les dernières années, de plus en plus de catégories de critères ont commencé à être introduites dans l'application d'ADMC, telles que les politiques, la durabilité ou la circularité, qui sont devenus des critères pertinents dans le contexte de la bioéconomie et de la décarbonisation de l'industrie, mais qui n'étaient pas inclus auparavant. Quelques exemples de leurs applications dans la littérature sont présentés ci-dessous :

- Madden et al. [52] ont réalisé une étude dans laquelle la durabilité de la production de diesel renouvelable a été mesurée avec le processus d'ADMC. Il a été démontré que pour prouver la durabilité de la mise en œuvre d'un procédé, il est nécessaire d'intégrer trois éléments principaux, à savoir les dimensions environnementales, économique et sociale.
- Gonzalez Cruz et al. [53] ont démontré dans une étude qu'avec le processus de prise de décision développée, en fonction des études de cas, différents critères de durabilité de la bioraffinerie sont essentiels, en particulier ceux liés aux aspects environnementaux comme

l'énergie non renouvelable utilisée, la réduction des émissions environnementales après la mise en œuvre de la bioraffinerie, le potentiel de réchauffement de la planète et le critère ACV comme le potentiel de toxicité humaine. Leur objectif était d'utiliser l'ADMC dans le but était de réaliser une conception optimale pour la sélection de la production de biodiesel dans les bioraffineries. L'aspect social a également été pris en compte avec le critère de création d'emploi lors de la mise en œuvre de la bioraffinerie. Enfin, pour l'aspect économique, des critères tels que les coûts d'exploitation, le revenu net ou la performance économique de la bioraffinerie ont été pris en compte.

- Lin et al. [54] ont établi des indicateurs de durabilité pour les bioraffineries, afin de mettre de l'avant certains aspects importants pour les bioraffineries. Outre les trois dimensions couramment utilisées (environnementale, économique et sociale), les dimensions techniques, socio-économiques et techno-économiques se sont avérées être des indicateurs importants pour prouver un projet de mise en œuvre d'une bioraffinerie.
- Les politiques et les réglementations sont de plus en plus utilisées, avec l'objectif de carboneutralité étant plus concret. Cohen et al. [55] ont prouvé dans une étude que l'utilisation de ces aspects dans une ADMC donne la flexibilité aux parties prenantes et aux décideurs d'évaluer les différentes synergies, mais aussi de faire des compromis entre les différentes options politiques. Différents types de politiques peuvent être appliqués à différents niveaux gouvernementaux tels que le national, provincial ou municipal. Ces politiques peuvent être basées sur des incitations sur le marché, telles que des subventions ou des crédits d'impôt, tout en prenant en compte des réglementations directes les produits ou sur la transmission des informations avec des formations ou la consultation de sites web spécifiques [56].

2.3.2 Critères ADMC pour la prise de décision d'une stratégie de bioraffinage

Tous les paramètres et les indicateurs présentés précédemment et leur association à une ADMC dépendent réellement des projets de mise en œuvre et leur localisation, des voies technologiques étudiées, ainsi que des parties prenantes impliquées et de leur vision des projets.

Le choix d'un critère approprié pour le projet est essentiel pour être sûr que le processus de décision aboutira à une décision éclairée. Différents aspects doivent être pris en compte pour inclure des critères appropriés dans une prise de décision multicritère :

- Les critères doivent refléter les valeurs des parties prenantes ou des décideurs [57, 58].

- Les critères doivent être appropriés au contexte et être utiles pour distinguer les différentes stratégies envisagées [57].

- L'interprétation du critère et son calcul doivent être uniques pour chaque critère [59].

- Le critère doit répondre à des objectifs à court et à long terme [59].

- Le critère doit inclure une définition pratique et idéale, ainsi qu'une métrique (base de calcul) [59].

Pour une ADMC réussie et efficace, il est important d'inclure la participation des parties prenantes ou d'autres décideurs qui ont un pouvoir dans le processus de décision. Pour s'assurer que leur implication est pertinente pour l'ADMC, un pré panel et un panel peuvent être utilisés [42]. Dans la première partie, les parties prenantes prennent connaissance des différentes alternatives ou stratégies retenues à la suite d'analyses techno-économiques. Ensuite les critères qui feront partie de l'ADMC leur sont présentés, afin de s'assurer que chaque participant comprend parfaitement la définition préliminaire de chaque critère. Dans la deuxième partie, qui est le panel, les parties prenantes discutent de chaque critère de décision pour établir leurs interprétations et leurs définitions. Ceci a pour but de s'assurer que tous les décideurs présents ont la même vision des critères et de leur importance. Le choix d'un critère qui sera défini comme le plus important est essentiel pour cette méthodologie afin de réaliser la pondération des autres critères et de déterminer ainsi les stratégies préférées du panel. Cette étape peut prendre beaucoup de temps, car il est important que toutes les parties prenantes soient en accord et qu'ils arrivent à un consensus quant au choix du critère le plus important. Une pondération sera par la suite réalisée en effectuant des compromis quant à la valeur que les parties prenantes seront prêtes à perdre sur le critère le plus important, afin d'augmenter la valeur d'un autre critère [51]. Ainsi une pondération des critères partant du plus important au moins important pour les parties prenantes sera créée.

Ahmad et al. [60] ont établi une autre approche, où la participation des parties prenantes a été incluse pour décider quant aux stratégies de bioraffinage pour la production de carburants

d'aviation durables. Une fois de plus, leur participation a surtout porté sur l'utilisation de la méthode de classement pour le choix d'une stratégie de production et pour l'analyse de sensibilité. Il a également été prouvé que, selon la perspective des parties prenantes, les résultats de la pondération des critères étaient différents, mais que généralement le classement avait la même tendance. L'utilisation de la participation des parties prenantes dans le processus ADMC présente certains avantages [58, 60]. Tout d'abord, elle peut améliorer la qualité de la prise de décision en prenant en compte les priorités et les opinions des décideurs. Elle améliore également les compétences décisionnelles et renforce la structure du processus de prise de décision, en sachant que la participation des parties prenantes est nécessaire à un moment donné dans le triage. Enfin, elle aide les décideurs et les parties prenantes à structurer un contexte de prise de décision, en étant tous réunis autour du même objectif, soit de trouver la meilleure alternative, même si au départ, ils n'avaient pas la même vision du projet ou des priorités à considérer. Cependant, si la problématique et les objectifs ne sont pas bien structurés au début de l'ADMC, cela peut conduire à une exclusion des critères importants et même à l'inclusion de critères qui ne seront pas entièrement indépendants les uns des autres.

2.3.3 Analyse critique

L'ADMC est une approche essentielle à suivre pour une la prise de décision éclairée et pour permettre l'implication des parties prenantes dans la décision à prendre quant à la mise en œuvre d'une stratégie de bioraffinage. Cependant, cette analyse peut être très longue entre le calcul des critères pour les différentes stratégies évaluées, la mise en place des panels avec les parties prenantes et la décision finale. De plus, l'interprétation et la définition des critères doivent être adaptées, afin que tous les décideurs faisant partie du panel puissent les comprendre. De plus, l'accès aux différentes informations pour le calcul des critères peut rendre la tâche difficile pour les compagnies. Pour les critères environnementaux, il faut avoir accès aux émissions de gaz à effets de serre émise pour chaque type de stratégie de bioraffinage, ainsi qu'aux différents indicateurs ACV reliés à la production des produits visés. Pour les critères associés aux aspects sociaux, des données sur l'emplacement des projets sont nécessaires telles que des facteurs multiplicateurs associés aux pratiques locales ou une base de données associée à l'agglomération afin de pouvoir estimer le nombre d'emplois crée. Des recherches supplémentaires sont nécessaires

pour arriver à obtenir ces informations et calculer des critères qui vont mettre de l'avant les avantages ou les limitations des stratégies et faciliter ainsi la prise de décision.

2.4 Systèmes et outils d'aide à la décision

Les systèmes d'aide à la décision (DSS) peuvent contribuer à fournir des informations précises pour aider dans l'ADMC, tout en permettant de calculer certains critères ou indicateurs et diminuer ainsi, le temps du processus de prise de décision.

2.4.1 Système d'aide à la décision : bénéfices et limitations

En général, les systèmes d'aides à la décision sont constitués de différentes parties essentielles au bon fonctionnement du système [61] :

- Une base de données

- Une partie composée du modèle et l'outil analytique

- Une partie pour la communication avec l'architecture et le réseau du DSS

- L'interface de l'utilisateur

Trois niveaux de technologie différents peuvent être utiles pour le développement des DSS [62]. Tous d'abord il y a le DSS spécifiques qui accomplit réellement le travail, car il s'agit du logiciel qui va permettre aux décideurs de traiter le problème. Le deuxième niveau est le générateur de DSS qui est composé d'un ensemble de matériels ou logiciels, qui fourniront les capacités nécessaires afin de construire un DSS spécifique. Et finalement, le dernier niveau est représenté par l'outil DSS qui facilite le développement d'un DSS spécifique ou générateur.

Les outils d'aide à la décision (OAD) peuvent aider à gérer les différentes contraintes et incertitudes dans le contexte de la bioraffinerie, en particulier à un stade précoce de la conception, afin de prendre des décisions pour la stratégie la plus viable. Les principaux avantages de l'utilisation d'un OAD sont qu'ils permettent d'améliorer la productivité en permettant aux décideurs d'être plus à l'aise avec la manipulation des données et ils créent un avantage concurrentiel [61]. En revanche, les OAD peuvent également avoir des limites [61, 63] :

- Peut être structuré et bâti uniquement pour un domaine d'utilisation spécifique

- Ne prend pas en compte les indicateurs de performance techniques reliés aux procédés

- Ils doivent être intégrés dans un processus de prise de décision tel que ADMC

- Ils n'intègrent pas toutes les technologies commerciales existantes bien établies.

2.4.2 Catégories d'outils d'aide à la décision

Les OAD peuvent être développées pour un usage général ou pour une application spécifique [63, 64]. Les OAD à usage général sont les plus courants, car ils ne sont pas personnalisés pour répondre à des besoins spécifiques, mais fournissent uniquement des conseils sur la manière d'effectuer une analyse. Il incombe au décideur de choisir comment l'utiliser correctement, sur la base de son expérience. Parmi les OAD à usage général les plus connus, il est possible de citer 1000minds, Analytica ou DecideIT.

Les OAD spécifiques aux applications peuvent être utilisés pour des besoins spécifiques et sont plus adaptés au contexte de la bioéconomie, car ils peuvent prendre en compte de multiples facteurs et indicateurs tels que la performance technique, la viabilité économique, les aspects sociaux, l'empreinte environnementale ou les indicateurs ACV et la chaîne d'approvisionnement. Benali et al. [63] ont mis de l'avant quelques exemples d'études où des méthodes hybrides utilisant des outils multiples ont été utilisées pour compléter une analyse de décision multicritère pour le contexte de la bioraffinerie. Ils ont mis de l'avant plusieurs études dont l'utilisation de plusieurs outils ou logiciels était nécessaire pour arriver à réaliser les différentes étapes d'une analyse multicritère portant sur la mise en place des procédés de bioraffinage. Par exemple, le logiciel Aspen utilisé pour l'estimation des coûts des équipements et les coûts d'exploitation, suivi par l'utilisation du logiciel SimaPro, pour l'évaluation environnementale basée sur l'ACV.

Les inconvénients reliés à l'utilisation de plusieurs outils et logiciels, soit des méthodes hybrides, surtout dans le domaine de la bioéconomie et de la mise en œuvre des stratégies de bioraffinage sont principalement [63] :

- L'impossibilité de traiter simultanément la modélisation des procédés. Il faut traiter un procédé à la fois.
- Le manquement d'informations techniques sur les procédés de bioraffinage ou sur les matières premières dans l'outil d'aide à la décision, ce qui oblige l'utilisateur à émettre des hypothèses erronées ou à simplifier l'analyse de procédés, ce qui peut mener à des incertitudes dans les résultats et dans la prise de décision par la suite.

- Le transfert de données d'un outil à un autre pour continuer l'étude de cas peut s'avérer difficile si l'utilisateur ou le spécialiste en bioraffinage n'a pas les compétences informatiques pour travailler avec les différents logiciels et des erreurs peuvent se propager.

2.4.3 Exemples d'outils d'aide à la décision utilisés dans le contexte de la bioéconomie et du bioraffinage

Dans les dernières années des plus en plus d'outils d'aide à la décision ont commencé à être bâti pour prendre en compte le contexte de la bioéconomie, avec l'aspect de durabilité environnementale ou le contexte de bioraffinage. Quelques exemples de ces outils sont présentés ci-dessous :

- De Buck et al. [65] ont commencé à développer un outil d'aide à la décision pour la bioraffinerie à petite échelle accompagné d'un outil de procédé et d'optimisation. L'outil est composé de plusieurs fonctionnalités dont le développement doit se faire de manière indépendante. Il y a d'abord l'outil d'inventaire et l'outil de modélisation du procédé, qui sera basé plus spécifiquement sur le procédé de digestion anaérobie et de raffinage à la vapeur. Pour l'obtention des indicateurs de durabilité, le développement d'un autre outil sera nécessaire. Seule la première partie de l'outil a été développée pour analyser les biodéchets et les matières premières disponibles localement pour permettre de bâtir l'inventaire nécessaire à l'évaluation d'un procédé avec différentes matières premières. Un logiciel a été utilisé afin d'obtenir l'ensemble des données pour commencer à développer l'outil de modélisation du processus. Malgré le fait que la création de ce OAD sera composée de tous les éléments importants pour l'évaluation d'une voie technologique de bioraffinage, la disponibilité de seulement de deux procédés dans l'outil limite son utilisation.

- BioSTEAM, un simulateur de procédé basé sur le logiciel de programmation Python, a été développé pour la conception, la simulation et l'analyse technico-économique des bioraffineries. Cortes-Pena et al. [66] ont montré qu'il peut effectuer une analyse technico-économique à un stade précoce et fournir des résultats comparables à ceux d'autres logiciels de simulation réalisés tels Aspen et Matlab. Mais lors l'analyse de sensibilité, il s'est avéré qu'un changement dans les hypothèses de base était nécessaire afin d'être sûr de réaliser une

prise de décision informée. Un cadre d'ACV a également été développé sous la forme d'un ensemble de fonctionnalités intégrées dans Python, où les impacts environnementaux peuvent également être étudiés, mais pour évaluer l'impact des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que les indicateurs liés à l'ACV, l'utilisation d'un outil externe est nécessaire [67].

- PlanEval est un autre OAD utilisé pour la prise de décision multicritère, qui est le module d'un outil de planification forestière nommé PlanWise [64, 68]. Il permet d'analyser l'impact de différents scénarios des plans forestiers sur des aspects économique, écologique et social. Même si l'outil n'est pas classé dans la catégorie des OAD à usage général, il a été démontré dans une étude comparative entre différents outils de prise de décision que le PlanEval a été développé principalement avec des métriques et des indicateurs généraux [64].
- Il y a aussi le mDSS ou MULINO-DSS qui été développé pour la gestion de l'environnement en trois parties : la phase d'identification du problème et localisation du projet, la phase de conception et la phase de décision, où une option doit être choisie [69]. Parmi les différents types de projets qui peuvent être analysés, 4 catégories principales sont présentes dans l'outil : l'agriculture, l'utilisation des sols urbains, la gestion des ressources d'eau et les ressources d'eau. Une fois que l'utilisateur a choisi l'option la plus appropriée, une analyse de sensibilité est effectuée par l'outil et un diagramme TORNADO est affiché pour comparer l'option par rapport aux autres et pour montrer la sensibilité du procédé à différents paramètres établis comme importants pour l'analyse de sensibilité. Des critères économiques, sociaux ou environnementaux peuvent être choisis pour évaluer les différentes options.
- L'outil SaMBA, développé dans le cadre du projet INTERREG Espace alpin, prend en compte les politiques et estime leur impact sur la mobilité [70, 71]. En sélectionnant un objectif dans une liste prédéfinie et en remplissant les paramètres spécifiques à la zone du projet visé, l'outil fournit à l'utilisateur une liste de différentes mesures et incitations concernant les formes de transport durable, la protection de l'environnement ou la protection du climat. La base de données et les différentes mesures sont fournies via Microsoft Excel. Même si l'outil prend en compte différentes politiques et incitations, le

concept est davantage axé sur les citoyens et le changement de leur comportement en matière de mobilité que sur les procédés de bioéconomie.

- I-BIOREF, un OAD développé par CanmetÉNÉRGIE à Ressources naturelles Canada, est un logiciel unique pertinent pour le domaine de la bioraffinerie, mais aussi pour l'intégration des usines [72]. Il comprend 15 modèles de technologies de bioraffinage qui peuvent être évalués. En fonction de la technologie de bioraffinage choisit, l'utilisateur peut choisir le contexte spécifique (emplacement, intrants spécifiques pour la technologie) et évaluer le projet à l'aide de plusieurs catégories de critères telles que les aspects économiques, environnementaux, l'analyse du cycle de vie, socio-économique ou politique. La base de données liée aux matières premières et à leur disponibilité change en fonction de l'emplacement choisi. Il y a aussi l'aspect de l'analyse de sensibilité et de scénario où beaucoup d'entrées et de paramètres peuvent être modifiés. Il est également important de préciser que des scénarios actuels et futurs peuvent être conduits. Benali et al. [63] ont démontré sa robustesse et sa flexibilité pour deux cas industriels pour différents sites de pâte Kraft.

Le Tableau 2.3 résume les OAD présentés précédemment et les compare plutôt sur le plan technique, afin de mieux montrer les différences entre eux et faciliter le choix pour l'utilisation de l'un d'entre eux. Le tableau a été séparé en 5 différentes colonnes : quatre détaillants les principaux atouts de l'outil (le domaine d'application, la flexibilité d'étudier différents paramètres pour effectuer des analyses de sensibilité et les types de critères calculés) et une colonne laissant place à des commentaires pour une analyse critique et la mise en avant de certaines limitations de l'outil. Il est important de préciser que ces OAD n'ont pas été évalués suite à leur utilisation, mais plutôt en accumulant les différentes informations de la littérature et des sites web. Le premier outil présenté de De Buck et al. [65] ne se retrouve pas dans le tableau, étant donné qu'il n'est pas finalisé et que son utilisation est impossible pour le moment.

Tableau 2.3 Comparaison des outils d'aide à la décision existants

Outil d'aide à la décision	**Synthèses des principaux atouts de l'outil provenant des sites web ou de la littérature (basés sur les références présentées précédemment)**	**Domaines d'application incluant la bioéconomie**	**Flexibilité pour étudier la variation de plusieurs paramètres simultanément (OUI/NON)**	**Catégories de critères disponibles**	**Commentaires**
BioSTEAM	• Développé pour prendre en compte la conception d'un procédé de bioraffinage, sa simulation, ainsi que pour effectuer des analyses techno-économiques; • Bien documenté et facilement extensible.	Procédés de bioraffinage	OUI	• Économiques • ACV	L'accès au logiciel Phython est nécessaire afin d'avoir accès au OAD. De plus, pour aller plus loin qu'une étude techno-économique, l'utilisation d'un autre module est nécessaire pour l'évaluation des indicateurs ACV
PlanEval	• Comparer différents plans forestiers pour les évaluer en fonction des objectifs de l'utilisateur; • L'analyse se fait de manière analytique et structurée et fournit un classement des alternatives en fonction des préférences de l'utilisateur; • Les parties prenantes peuvent donner leurs propres pondérations, qui peuvent être comparées visuellement.	Domaine forestier	NO	• Économique • Écologique • Social	L'utilisateur ne peut comparer des plans forestiers qu'en choisissant un objectif à la fois. Plusieurs objectifs ne peuvent pas être étudiés en même temps. L'analyse de sensibilité n'est pas disponible dans l'outil Son utilisation dans le domaine du bioraffinage est très limitée étant donné que la création du modulé a été réalisée pour le domaine forestier
mDSS	• Crée pour la gestion des problèmes environnementaux;	Environnement	OUI	• Environnement • Social • Économique	Le OAD effectue des graphiques pour les analyses de sensibilité, ce qui permet à

	• Explore différentes options avec la création des scénarios alternatifs; • 4 catégories principales dans l'outil peuvent être évaluées : l'agriculture, l'utilisation des sols urbains, la gestion des ressources d'eau et les ressources d'eau.				l'utilisateur de mieux analyser et interpréter l'analyse Malgré le fait que le logiciel effectue une analyse multicritère assez complète, son utilisation est limitée aux 4 catégories identifiées et sera difficilement applicable pour des procédés de bioraffinage
SaMBA	• Soutiens le procédé de prise de décision en conseillant les incitations appropriées pour encourager les habitants en faveur des moyens de transport durables; • En fonction de l'objectif sélectionné par l'utilisateur et des paramètres spécifiés, une liste des mesures et incitations est fournie, tout en estimant l'impact des mesures à l'aide des indicateurs.	Mobilité Environnement	NON	• Social • Environnement	Malgré le fait que l'outil peut aider dans la prise de décision en fournissant des politiques ou mesures à considérer pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre, ce dernier est plus fondé pour être utilisé pour aider les citoyens et la mobilité des sociétés que pour des procédés de bioraffinage
I-BIOREF	• Modélise et évalue les solutions de bioraffinage en prenant en compte les aspects économique, environnemental et social et en effectuant des bilans de masse et d'énergie; • La base de données liée aux matières premières et à leur disponibilité change en fonction de l'emplacement choisi; • Comprends des modèles d'usines de pâtes et papiers, des modèles de 15 technologies de bioraffinage.	Bioraffinage Implémentation de voies technologiques de bioraffinage avec une usine de pâte et papiers	OUI	• Économique • Environnement et ACV • Socio-économique • Politiques et réglementations	Le logiciel permet d'évaluer différentes voies technologiques de bioraffinage autonome ou implémenté à des usines de papeterie. Cependant, il ne prend pas en compte explicitement le risque parmi tous les critères qui sont disponibles.

2.4.4 Analyse critique

Un système d'aide à la décision et plus spécifiquement un outil d'aide à la décision peut définitivement aider et accélérer le processus de prise de décision comme ADMC, en permettant à l'utilisateur d'avoir accès à une base de données et à des critères qui se calculent facilement. Il est ainsi plus facile pour les parties prenantes de se concentrer sur la prise de décision et analyser les différentes options qui ressortent plutôt que sur le calcul des critères et la collecte des informations manquantes.

En revanche, il est important de spécifier que malgré le fait que des OAD sont disponibles pour l'évaluation des différents procédés provenant de plusieurs domaines, l'utilisateur n'a pas souvent accès à la simulation et la programmation en arrière et ne peut donc pas changer la méthode de calcul des différents critères. Les OAD sont donc limités avec les valeurs fournies. Une analyse critique des données obtenues doit être réalisée pour analyser si ces dernières sont robustes. Les utilisateurs doivent donc s'assurer de bien comprendre l'interprétation, la définition et la méthode de calcul des différents critères retrouvés dans les OAD présentés précédemment, pour pouvoir les présenter par la suite dans le panel et assurer une compréhension commune des parties prenantes. Dans un ADMC, les définitions et interprétations des critères peuvent souvent être adaptées pour les parties prenantes, afin de représenter leur vision, mais lorsque ces critères proviennent directement des OAD, cet arrangement n'est plus possible.

À la suite de l'analyse des OAD du Tableau 2.3 et l'analyse critique de ces derniers, il a été important de choisir un OAD parmi les cinq présentés, qui sera utilisé dans le cadre de la recherche de ce mémoire. Puisque cette étude se concentre sur les biocarburants et les différentes voies existantes, il était important de choisir un outil d'aide à la décision qui représente et évalue correctement non seulement la technologie de bioraffinage, mais aussi la mise en œuvre du processus. La mise en œuvre débute par la prise en compte de l'achat matière première et se termine par la vente du produit final. Il est essentiel d'avoir accès à une base de données et à des paramètres pour son évaluation. Pour une prise de décision éclairée, des critères multidisciplinaires sont essentiels afin de prendre en compte les aspects affectant la mise en œuvre d'une voie technologique de bioraffinage. En raison de tous les points mentionnés ci-dessus et des nécessités énumérées, l'outil I-BIOREF a été choisi parmi tous les autres outils présentés dans le Tableau 2.3. La gamme de voies technologiques pouvant être évaluées ainsi que l'intégration à des usines papetières fait

en sorte que cet outil ressort en évidence parmi les autres évalués. De plus, cet outil dispose des données les plus récentes sur les procédés de biocarburants et son accès à une variété de critères et d'analyses de sensibilité détaillées a facilité le choix.

2.5 Synthèse de la revue de la littérature

Avec la nécessité de diriger l'industrie vers une décarbonisation, plusieurs procédés de bioraffinage peuvent être mis en place. Il serait ainsi possible de produire des biocarburants à partir des matières premières tels que la biomasse lignocellulosique ou plus spécifiquement, des résidus forestiers, utilisés pour la deuxième génération de biocarburants. Parmi les procédés les plus connus et les plus prometteurs pour le futur, il y a la pyrolyse rapide, la gazéification et la liquéfaction thermale. Chaque procédé possède des particularités différentes et des configurations au niveau du réacteur qui peuvent faire varier le rendement, le temps de rétention, la taille des particules ou le type d'apport de chaleur au procédé. Les développeurs de technologies qui fournissent toutes ces informations ne dévoileront pas toutes les informations techniques reliées à la technologie, surtout tôt dans le processus de conception. Il est donc important d'effectuer une analyse des coûts et informations techniques avec prudence, en assimilant les différentes informations absentes, pour les prendre en compte pendant le processus de triage.

Autre que les informations manquantes des fournisseurs de technologies, il y a des risques reliés à un projet de mise en œuvre d'un procédé de bioraffinage. Entre autres, il est possible de nommer les risques du marché, technologique, règlementaire, de la chaîne d'approvisionnement, mise à l'échelle ou coûts d'investissement ou exploitation [41, 42]. Un balancement entre le risque et le retour est nécessaire pour trouver un équilibre entre les options à haut risque et à rendement élevé et celles à faible risque, mais faible rendement [43]. L'atténuation du risque est nécessaire et l'utilisation d'une méthodologique telle que l'approche par phase peut assister le projet de mise en œuvre. En planifiant les produits à valeur ajoutée et les objectifs à long terme, il sera plus facile de planifier le début de projet. De plus, les coûts d'exploitation et d'investissement ont besoin d'être mis à jour et sur une base comparable, surtout lorsque différentes configurations sont comparées. La méthodologie LBA peut aider, en identifiant la technologie avec les coûts les plus fiables et mettre les coûts des autres technologies sur la même base, en utilisant les mêmes coûts unitaires et unités fonctionnelles du procédé [48]. Finalement, l'analyse de sensibilité ou de scénario peut aider pour analyser les risques et les différents paramètres auxquels la viabilité économique du projet

peut être sensible[41]. Malgré toutes ces techniques et méthodologies pour diminuer et atténuer les risques, lors d'un triage, il est important de bâtir des critères qui aideront pour de la prise de décision.

L'ADMC est une méthode qui permet de prendre en compte les préférences, valeurs et objectifs des différentes parties prenantes d'un projet, pour facilement trouver un consensus. Le choix des critères pour l'ADMC est une étape très importante. Au cours des dernières années, il a été démontré que des catégories de critères tels que l'environnement, l'économique, social, durabilité, politiques et règlementations sont nécessaires pour prendre en compte tous les aspects importants pour la mise en œuvre d'un procédé de bioraffinage. Pour le déroulement d'un ADMC, les critères choisis doivent être appropriés au contexte, avoir une interprétation et calcul unique [51]. Lors de la rencontre des parties prenantes, il sera plus facile d'avoir une compréhension globale de tous les critères et le choix du critère le plus important sera donc plus facile pour les membres d'un panel. En revanche, le calcul des critères peut s'avérer très difficile, car souvent les compagnies n'ont pas accès à toutes les informations ou à une base de données reliée aux données environnementales ou sociale pour les différents calculs. De plus, avant le choix des critères finaux, il faut procéder au calcul de plusieurs critères de différentes catégories, afin d'avoir un éventail de choix, avant de procéder au triage. Ces étapes peuvent donc s'avérer très longues.

Les outils d'aide à la décision spécifiques peuvent être utilisés dans le contexte de la bioéconomie et plus précisément pour des projets de bioraffinage. Ils peuvent prendre en compte des facteurs et indicateurs pour la performance technique, économique, environnementale ou sociale, tout en possédant des bases de données allant de la disponibilité de la matière première, jusqu'aux paramètres techniques du procédé évalué. Les différents outils d'aide à la décision disponibles aujourd'hui permettent des analyses techno-économiques et environnementales. De plus, l'utilisation des critères présents dans un OAD peut rendre la tâche plus facile pour les compagnies, en ayant déjà un éventail des critères parmi lesquels choisir et une base de données associée. À la suite de l'analyse critique des différents OAD existants, il a été possible d'en choisir un pour la suite des travaux de recherche. I-BIOREF a été choisi basé sur la littérature, mais la seule manière de se prononcer sur les points forts et les limitations est de l'utiliser pour analyser la convivialité de l'outil avec les besoins des spécialistes en bioraffinage, pour comparer soit différentes configurations de la même stratégie de bioraffinage ou de choisir parmi un éventail de voies technologiques.

2.5.1 Lacunes dans le corps de connaissance

En ayant choisi le OAD, il sera possible d'analyser toutes les problématiques décrites précédemment et énoncées plus en détail dans la revue de la littérature. Il faudra donc analyser si cet outil est capable de faciliter le triage entre les voies technologiques de bioraffinage existantes en prenant en compte les types de risques présents et distinguer si les résultats sont robustes.

De cette façon, il y a trois différentes questions de recherche qui en ressortent :

- Les simulations réalisées avec l'outil donnent-elles les résultats fiables et précis?
- Le diagramme d'écoulement spécifié pour les différentes voies technologiques peut-il être adapté pour des configurations différentes d'un même procédé ?
- L'ample choix de critères multidisciplinaire dans l'outil permet-il de prendre en compte tous les aspects importants, les risques et incertitudes présentés dans la revue de la littérature, pour une mise en œuvre d'un procédé de bioraffinage ?

CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL

3.1 Hypothèses de recherche

Pour valider les trois questions de recherche du projet de maîtrise posées à la fin du Chapitre 2, l'hypothèse générale évoque que l'outil d'aide à la décision multicritère accélère et rend plus systématique le processus de triage pour les différentes stratégies de bioraffinage, tôt dans les étapes de conception, tout en calculant des critères de décision interprétables permettant une prise de décision éclairée.

De plus, deux sous-hypothèses ont été formulées, afin d'assurer que tous les aspects importants des questions de recherches soient pris en compte :

1. L'outil d'aide à la décision multicritère, qui définit la configuration générale du procédé, permet de travailler avec des contraintes multiples et, des paramètres spécifiques aux procédés pour adapter le diagramme d'écoulement présent pour différentes variantes du même procédé et obtenir des coûts d'investissement et d'opération relatifs précis, tôt dans le processus de conception.
2. L'outil d'aide à la décision multicritère permet à ses utilisateurs de quantifier les indicateurs de performance relatifs aux critères de décision et de les interpréter, tôt dans le processus de conception, pour des procédés de bioraffinage différents, afin de réaliser une prise de décision plus éclairée à la fin du processus de triage.

3.2 Objectifs des travaux

3.2.1 Objectif principal

L'objectif général du projet est énoncé comme suit : Après l'utilisation de l'outil de décision pour des études de cas, effectuer une analyse systématique et critique du processus de triage des voies technologiques de bioraffinage exécuté dans le but d'identifier s'il peut l'accélérer et l'éclairer, afin de le rendre plus systématique.

3.2.2 Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif global, deux sous-objectifs ont été formulés :

1. Évaluer l'outil d'aide à la décision, tôt dans le processus de conception, en effectuant une analyse technico-économique indépendante (de l'outil), pour la considérer, par la suite, dans une simulation avec le logiciel et conclure si les coûts d'investissement et d'opération sont bien calculés et robustes, pour distinguer entre les différentes configurations et si leur ordre de grandeur correspond à l'analyse technico-économique indépendante.
2. Analyser l'utilisation des indicateurs de performance relatifs aux critères calculés par l'outil d'aide à la décision, afin de considérer les valeurs fournies par le logiciel et conclure si elles sont suffisamment fiables pour permettre une bonne interprétation pour un processus de triage informé.

3.3 Présentation des études de cas

Pour l'évaluation de l'outil d'aide à la décision choisi et la validation des hypothèses, deux études de cas ont été définies. Pour la validation de la première hypothèse, qui se penche sur le fait d'adapter le diagramme d'écoulement spécifique à une voie technologique de bioraffinage en particulier, pour plusieurs configurations, il était important de choisir une voie technologique dont les configurations existantes étaient assez différentes au niveau de la configuration du réacteur, du rendement et des produits à valeur ajoutée. Dans le Chapitre 2, plusieurs technologies ont été mises en avant. Pour la première étude de cas, le procédé de pyrolyse rapide a été choisi, étant donné la variété de configurations disponibles présentées dans le Tableau 2.1. Il sera ainsi possible d'adapter le diagramme d'écoulement pour les configurations choisies et effectuer une analyse technico-économique pour valider la première hypothèse.

Pour la validation de la deuxième sous-hypothèse, une deuxième étude de cas a été définie. Il était important de choisir des voies technologiques complètement différentes, afin de pouvoir effectuer une analyse multicritère avec l'outil d'aide à la décision et pouvoir ainsi conclure si les critères disponibles permettent de faire un triage éclairé. C'est pour cette raison que les procédés de gazéification et de liquéfaction hydrothermale ont été choisis. Comme il a été décrit dans le Chapitre 2, ces procédés sont très différents l'un de l'autre, non seulement au niveau des différentes unités s'y retrouvant, mais aussi au niveau de la maturité technologique. La gazéification est un

procédé mature dont le NMT est de 9, tandis que la liquéfaction hydrothermale, malgré qu'elle soit très prometteuse pour le futur, a un NMT de seulement 5 [14].

3.4 Méthodologie du projet de recherche

3.4.1 Approche globale

La Figure 3.1 présente la méthodologie utilisée pour le projet de recherche. Elle est divisée en deux sections principales répondant chacune aux deux sous-objectifs spécifiques et aux deux sous-hypothèses. Une fois les deux sous-hypothèses validées, une analyse critique des résultats sera réalisée afin de valider l'hypothèse générale. L'outil d'aide à la décision qui sera utilisé pour la recherche sera I-BIOREF, comme il a été énoncé dans le Chapitre 2.

Les travaux et les études de cas réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de réaliser deux articles, qui ont été soumis à des journaux scientifiques :

1. Article #1: G. Bele, M. Benali et P. Stuart, Comparative Analysis and Benchmarking of Commercial and Emerging Fast Pyrolysis Technologies
2. Article #2: G. Bele, M. Benali et P. Stuart, Technology Pathways for the Production of Renewable and Sustainable Biofuels: Multi-criteria Assessment.

L'article #1 présente les bilans de masse et d'énergie, ainsi que les résultats de l'analyse technico-économique effectuée sans l'utilisation de l'outil d'aide à la décision. Les résultats de cet article seront comparés aux résultats obtenus avec I-BIOREF, afin de pouvoir valider, par la suite, la première sous-hypothèse. L'article #2 présente l'analyse multicritère effectuée avec I-BIOREF et les critères multidisciplinaires s'y retrouvant. Deux stratégies de bioraffinage ont été comparées à l'aide des critères se retrouvant dans le logiciel pour évaluer si les valeurs calculées et leurs interprétations permettent d'effectuer un triage informé. Cet article permettra donc de valider la deuxième sous-hypothèse.

La méthodologie présente aussi le lien entre les publications et les hypothèses de recherche.

La synthèse des travaux permet d'apercevoir les différentes étapes qui ont été réalisées, afin de valider les hypothèses de recherche. Ce chapitre sera donc basé sur la méthodologie de recherche et les différentes étapes qui ont permis d'arriver à la validation des hypothèses. Il sera divisé en trois différentes sections.

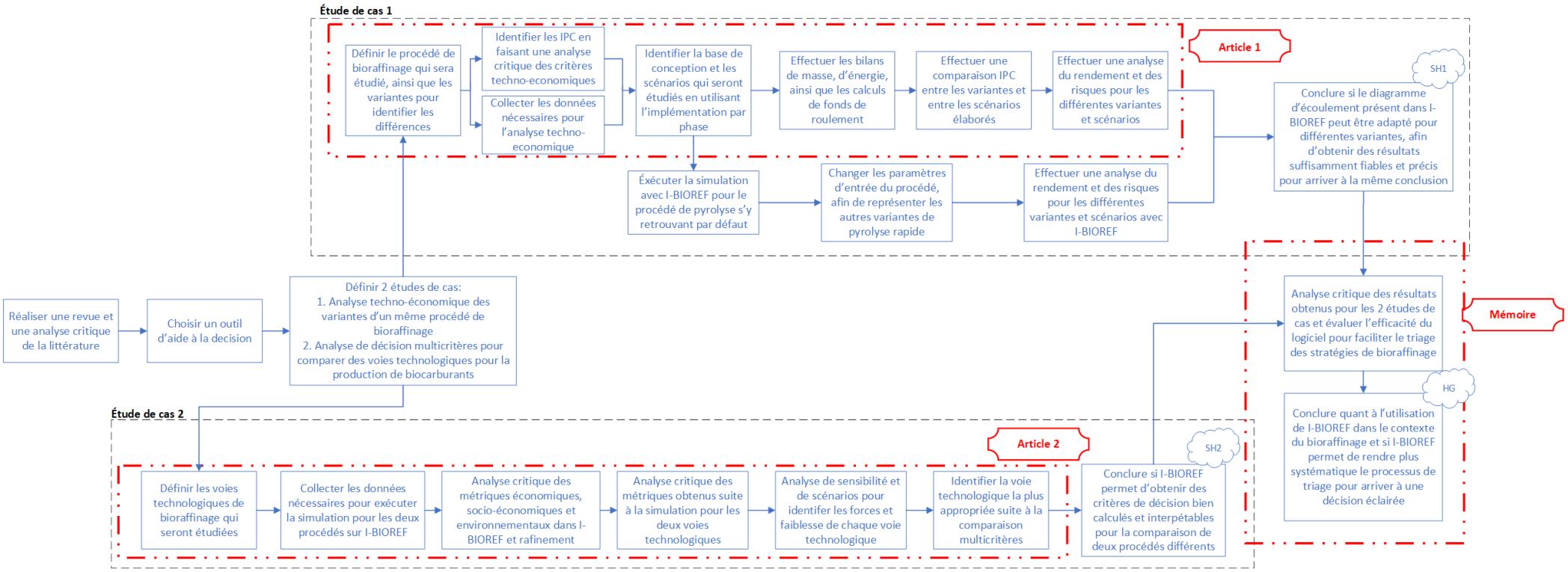

Figure 3.1 Méthodologie du projet de recherche

Dans la première section (3.5), une synthèse de la première étude de cas sera présentée, incluant la synthèse de l'article #1 et la présentation des résultats obtenus avec l'analyse technico-économique effectuée avec I-BIOREF. Le but de cette première section est de comparer les deux types de résultats et conclure quant à la validation de la première hypothèse. La deuxième section (3.6) va présenter la synthèse de l'article #2 et les critères de décision fournis par I-BIOREF pour valider la seconde hypothèse. Finalement la troisième section (3.7) portera sur une analyse critique et un retour sur les résultats obtenus pour les deux études de cas, afin de valider l'hypothèse générale.

3.5 Analyse technico-économique de trois configurations du procédé de pyrolyse rapide

La présentation de cette première étude de cas sera divisée en cinq parties, afin de valider la première hypothèse. Tout d'abord, les trois configurations de la voie technologique de pyrolyse rapide seront présentées, afin de mettre en avant les principales différences au niveau du diagramme d'écoulement. La deuxième partie sera composée du choix des indicateurs de performance clé, ainsi que de l'estimation des coûts, qui a dû être réalisée pour effectuer les analyses technico-économiques. Ensuite, les scénarios étudiés et les hypothèses seront traités. Les deux dernières sections vont traiter les résultats des analyses technico-économiques. La première permettra de montrer les résultats obtenus sans l'utilisation de l'outil d'aide à la décision choisi et la deuxième permettra de présenter les résultats avec I-BIOREF, afin de pouvoir comparer les deux types de résultats.

3.5.1 Présentation des trois configurations

Comme énoncé précédemment, pour cette étude de cas, il était important de choisir des configurations suffisamment différentes pour explorer les conditions dans lesquelles elles sont économiquement viables. De plus, il était important de pouvoir identifier leurs forces, leurs faiblesses, tout en considérant la modularisation de la technologie.

En identifiant les différences des technologies présentées dans le Tableau 2.1, il a été possible de choisir trois technologies différentes : le réacteur à Lit Fluidisé Circulant (CFB), à Cône Rotatif (RC) et à Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB).

Les principales différences entre ces trois configurations sont présentées ci-dessous :

- CFB [15, 16] :
  - Lit fluidisé rapide, qui utilise le sable comme vecteur de chaleur;
  - Les gaz de combustion sont utilisés pour sécher la biomasse;
  - Deux types de biocharbon sont valorisés (primaire et secondaire).
- RC [15, 17] :
  - Bonne flexibilité pour le matériel entrant, bon rendement de la biomasse et les petites particules peuvent être traitées;
  - Temps de résidence fixé par la vitesse de rotation;
  - Gaz de combustion utilisés dans une bouilloire pour produire de la vapeur comme produit à valeur ajoutée.
- MFB [19, 20] :
  - Pas d'utilisation de sable (pas de gaz fluidisant) ;
  - Temps de séjour contrôlé par le taux de production des vapeurs;
  - Valorisation de biocharbon purifié (non contaminé par du sable).

La Figure 3.2 présente les diagrammes d'écoulement de ces trois configurations. La première configuration, en haut, est celle de CFB. Cette configuration a été choisie comme étant le cas de base, étant donné que c'est elle qui se retrouve dans l'outil d'aide à la décision. Ainsi, pour les deux autres configurations, soit le RC, la configuration du milieu et le MFB, la dernière en bas de l'image, les équipements et courants représentés en orange démontrent les grandes différences dans le procédé en les comparant au CFB. Pour le RC, il est possible d'observer qu'à part le réacteur, il y a aussi l'unité de condensation qui est mise en avant en tant que différence. De plus, la présence de la bouilloire permet de recirculer les gaz non condensables provenant de la condensation et les gaz de combustion provenant de la combustion de biocharbon pour la production de vapeur. Cette vapeur pourra être vendue pour la cogénération en tant que co-produit. Pour le MFB, le chauffage par induction utilisé pour remplacer le sable est différent du CFB. Aussi, l'unité de condensation progressive qui suit la trempe rapide permet d'obtenir une bio-huile plus sèche, avec un apport énergétique plus grand, ce qui le distingue des deux autres configurations. L'eau de pyrolyse de ce procédé est récupérée, mais elle ne sera pas valorisée pour cette étude de cas.

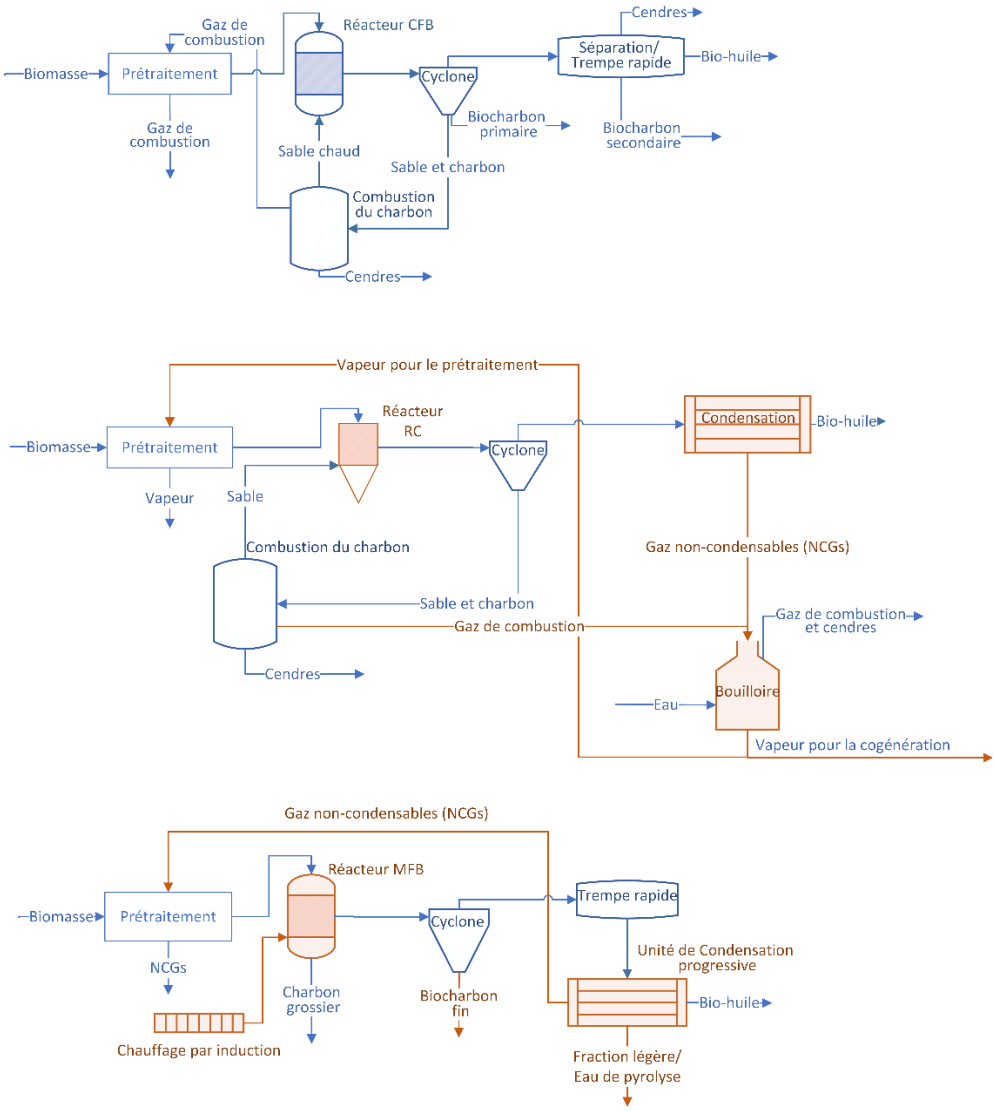

Figure 3.2 Diagramme d'écoulement des configurations de pyrolyse rapide étudiées. De haut en bas : Lit fluidisé Circulant (CFB), Cône Rotatif (RC), Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB)

3.5.2 Choix des Indicateurs de Performance Clés (IPC) et estimations des coûts relatifs

3.5.2.1 Indicateurs de Performance clés (IPC)

Après le choix des configurations, il était essentiel de choisir des Indicateurs de Performance Clés (IPC) pour les deux analyses technico-économiques. De cette manière, la comparaison entre les deux analyses se fera sur la même base et la comparaison entre les trois configurations sera réalisée avec des IPC qui permettront d'exposer les forces et les faiblesses de chaque configuration, et ce,

pour les différents scénarios qui seront mis en place. Le Tableau 3.1 introduit les IPC choisis. Il est possible d'observer qu'ils sont séparés en trois différentes catégories, soit la Profitabilité, la Robustesse, ainsi que l'Efficacité du capital. Elles permettront de prendre en compte plusieurs aspects lors de l'analyse économique. Ces sous-catégories de métriques faisant partie de la performance économique sont présentes dans I-BIOREF. La base de calcul pour chaque IPC est présente dans l'annexe C.

Tableau 3.1 Indicateurs de Performance Clés (IPC) choisis pour la première étude de cas

IPC	Définition	Interprétation
Profitabilité		
TRI (Taux de rentabilité interne)	Taux d'actualisation qui rend la valeur actuelle nette de tous les flux de trésorerie résultant de la mise en œuvre de la bioraffinerie égale à zéro.	Plus le TRI est élevé, plus le projet de bioraffinage est rentable. À partir de l'année de référence 2019, un seuil typique pour le TRI des projets de bioraffinerie est de 20 %.
ROI (Retour sur l'investissement	Le retour sur l'investissement (ROI) est le rapport entre la valeur nette générée par une usine de bioraffinage sur une période donnée et l'investissement en capital correspondant.	Les valeurs négatives du ROI indiquent que le projet n'a pas atteint la rentabilité, mais pourrait être rentable à l'avenir. Plus le ROI est élevé, plus le projet de bioraffinage est rentable.
Robustesse		
EBITDA	L'EBITDA est le revenu d'exploitation que génère un projet de bioraffinerie, sans tenir compte des frais d'amortissement et de la dépréciation.	L'EBITDA est une mesure de la performance financière du projet de bioraffinerie, exprimée en tant que bénéfice (ou déficit) provenant de ses opérations. Plus l'EBITDA est élevé, plus le potentiel d'un projet de bioraffinerie à générer un bénéfice net est important.
Marge EBITDA	Ratio qui montre la fraction des revenus qui sont disponibles pour couvrir les dépenses hors exploitation avant de tenir compte de la dépréciation et de l'amortissement.	Indicateur de la solidité financière d'un projet de bioraffinage, exprimé sur la base de la génération de liquidités à partir de ses opérations. Les valeurs les plus élevées de la marge EBITDA sont préférées.
Efficacité du capital		
CAPEX	Le CAPEX est le montant total du capital investi pour la mise en œuvre de l'usine de bioraffinage.	Mesure de l'intensité du capital d'un procédé de bioraffinage, compte tenu des subventions publiques. Un CAPEX plus faible implique généralement un risque de financement plus faible, car les

		investissements annuels des entreprises privées sont généralement plafonnés et l'accès aux sources de financement externes est limité.
Délai de récupération	Le délai de récupération est le temps nécessaire pour récupérer le capital investi dans la mise en œuvre d'une usine de bioraffinage. Il est calculé en utilisant les coûts d'investissement, les revenus annuels et les coûts d'exploitation de l'usine de bioraffinage au maximum de sa capacité pour le temps de fonctionnement annuel prévu.	La période de récupération est une mesure de la capacité du projet à équilibrer rapidement l'investissement en capital par la génération de flux de trésorerie. Les périodes de récupération plus courtes sont préférées.

3.5.2.2 Estimations des coûts d'investissement et d'exploitation

Pour effectuer l'analyse technico-économique, il était important de collecter les données économiques et techniques nécessaires auprès des développeurs de technologies ou de la littérature. Cependant, tôt dans les étapes de conception lorsque les coûts sont relatifs, ces données ne sont pas nécessairement établies sur la même base de conception et sur les mêmes types de données. Afin de s'assurer que la comparaison des coûts sera faite sur la même base, la méthodologie LBA, présentée dans le Chapitre 2, a été suivie. Il a donc fallu tenir compte des différences dans le diagramme d'écoulement, en séparant les procédés en plusieurs domaines fonctionnels. Une structure de coûts a aussi dû être définie, en ajustant tous les coûts sur la même base de conception et en normalisant les coûts unitaires[48]. Ensuite, la sélection du cas de base en fonction du niveau de précision et du réalisme des données a été l'étape la plus importante. Après une analyse des données collectées, la configuration RC a été choisie comme étant le cas de base, car les informations obtenues étaient celles qui paraissaient les plus réalistes. En se basant donc sur la technologie du RC, il a été possible de faire une estimation relative des autres configurations. Il est important de spécifier que les coûts directs et indirects, ainsi que les coûts d'exploitation ont été déterminés à l'aide de la méthode du livre Peters&Timmerhaus sur la conception des procédés et économie pour les ingénieurs chimiques [73].

Les résultats de l'estimation des coûts d'investissement à la suite de l'application de la méthodologie LBA sont présents dans l'Annexe C. La configuration MFB est celle qui est la plus dispendieuse avec un total de 208 M$, alors que la configuration RC est la moins coûteuse avec

149M$. Une des raisons qui explique que la configuration RC est celle dont le CAPEX est le moins dispendieux est le fait qu'elle n'ait pas de système de récupération de biocharbon. Étant donné que tout le biocharbon est brûlé pour envoyer les gaz de combustion vers la bouilloire, l'installation d'un système de récupération de biocharbon ne serait pas utile. Pour le traitement des vapeurs de pyrolyse, le MFB est celui qui a le plus grand coût, car l'unité de condensation progressive est beaucoup plus dispendieuse qu'une condensation simple ou une trempe rapide.

Le résumé des coûts d'exploitation obtenus à la suite de l'application de LBA se retrouve aussi dans l'Annexe C. Dépendamment des configurations, différents services ont été pris en compte. La configuration CFB est celle qui a les coûts d'exploitation les plus faibles, suivis du RC, puis du MFB, qui est le plus dispendieux. Les coûts unitaires utilisés pour les calculs des différents services dont les configurations ont besoin suivent le tableau résumant les coûts d'exploitation.

3.5.3 Présentation des scénarios de pyrolyse rapide et hypothèses

La mise en place des scénarios pour cette étude de cas était nécessaire, afin de pouvoir étudier plusieurs aspects du procédé de pyrolyse rapide et de sa mise en œuvre. L'approche par phase a été prise en compte pour la mise en place des scénarios. Comme décrit dans le Chapitre 2, elle permet d'identifier le portefeuille de produits et d'augmenter les revenus [45]. Le Tableau 3.2 présente les deux scénarios choisis pour l'analyse technico-économique. Ils seront étudiés pour chacune des trois configurations. Le premier scénario est représenté par la mise en œuvre d'un procédé de pyrolyse rapide seul, où les produits seront la bio-huile, vendue localement et le biocharbon qui sera vendu en tant que fertilisant.

Le deuxième scénario est l'intégration d'un procédé de pyrolyse rapide à une scierie déjà existante. De cette manière, pendant les deux premières années du projet, les coûts d'exploitation et les revenus seront associés à la scierie, en attendant la troisième année pour la mise en œuvre du procédé de pyrolyse rapide. Ce type d'intégration peut être très bénéfique puisque l'achat de biomasse pour le procédé de pyrolyse rapide ne sera plus nécessaire et la biomasse entrante sera représentée par les résidus sortant de la scierie. De cette manière, les coûts d'exploitation reliés à l'achat de la biomasse seront éliminés. À partir de la troisième année du projet, il y aura donc trois produits qui fourniront des revenus : la bio-huile, le biocharbon, ainsi que le bois de construction produit par la scierie.

Tableau 3.2 Scénarios mis en place pour les trois configurations pour l'analyse technico-économique

Scénarios implémentés	Produits	Phase 1 (0-2 ans)	Phase 2 (3-25 ans)	Diversification du revenu
1. Procédé de pyrolyse rapide indépendant	Bio-huile Biocharbon	Pyrolyse rapide (400 t/jour)	-	➢ Bio-huile vendue localement ➢ Biocharbon vendu comme fertilisant pour l'agriculture
2. Procédé de pyrolyse rapide intégré à une scierie	Bio-huile Biocharbon Bois de construction	Scierie (850 t/jour)	+Pyrolyse rapide (400 t/jour)	➢ Bio-huile vendue localement ➢ Biocharbon vendu comme fertilisant pour l'agriculture

Le Tableau 3.3 présente les principales hypothèses pour l'étude de cas, dont la durée d'opération moyenne, la durée de vie du projet ou le soutien gouvernemental pour les coûts d'investissement provenant des différents programmes de subventions. Les prix de base de vente des principaux produits utilisés pour le calcul des revenus sont présentés dans l'Annexe C.

Tableau 3.3 Hypothèses de la première étude de cas

Paramètres	Valeurs	Justification
Hypothèses pour l'analyse économique		
Durée d'opération moyenne	7600 heures	Les deux premières années, le temps d'opération sera plus faible, puis le temps d'opération à plein temps sera atteint.
Durée de vie du projet	25 ans	2 ans pour la construction, 23 pour les opérations
Dette	0%	Tous les fonds disponibles
Dépréciation des équipements	50%/ 25%/ 25%	Amortissement accéléré nominal sur 3 ans
Soutien gouvernemental pour les coûts d'investissement	40%	Programmes de subventions fédérales, provinciales ou municipal
Taux d'imposition	30%	Taux d'imposition nominal

3.5.4 Résultats de l'analyse technico-économique réalisée sans utilisation d'I-BIOREF

La présentation des résultats pour cette première analyse technico-économique réalisée sera divisée en deux parties. Tout d'abord, l'analyse technique avec les hypothèses utilisées et les bilans de masse et d'énergie sera présentée. Elle sera suivie de l'analyse économique avec la présentation des coûts d'investissement et d'exploitation qui ont été obtenus, ainsi que les IPC choisis.

3.5.4.1 Bilans de masse et d'énergie

3.5.4.1.1 Hypothèses pour la réalisation des bilans

Le Tableau 3.4 indique les principales conditions de fonctionnement. La température du réacteur et le temps de rétention ont été choisis en fonction de la température globale du procédé de pyrolyse rapide, sachant que les trois différents réacteurs peuvent fonctionner à cette température. Les résidus forestiers ont été choisis comme matière première du procédé, avec l'hypothèse d'une teneur en eau de 50% lors de leur arrivée à l'usine. Ils seront séchés afin d'atteindre 10% de teneur en beau à l'entrée du réacteur.

Tableau 3.4 Conditions d'opération supposées pour les trois configurations de pyrolyse rapide

Conditions d'opération considérées		Références et Commentaires
Température de réaction	500°C	[5]
Temps de rétention	<2 secondes	[5]
Type de biomasse pour l'alimentation	Résidus forestiers	Jugement d'ingénieur
Teneur en eau de la biomasse arrivant à l'usine (%)	50	Teneur en eau globale de la biomasse
Biomasse alimentée (base sèche) (t/jour)	400	Définition du cas de base
Biomasse alimentée (base humide) (t/jour)	800	
Teneur en eau à l'entrée du réacteur (%)	10	[74]

Le Tableau 3.5 présente un aperçu des rendements supposés des trois principaux produits d'un procédé de pyrolyse rapide, à savoir la bio-huile, le biocharbon et les gaz non condensables (NCGs). Comme montré dans les diagrammes d'écoulement de la Figure 3.2, les NCGs seront utilisés pour le séchage dans le cas des configurations CFB et MFB et pour la combustion pour

RC, afin d'obtenir la vapeur pour la cogénération. Les différents rendements sont basés sur la littérature. Comme indiqué dans le Tableau 2.1, le réacteur RC a une meilleure teneur en carbone pour la bio-huile, étant donné sa capacité à traiter des particules plus petites. Également, ce réacteur produit moins de biocharbon, c'est pourquoi la teneur en carbone du biocharbon est inférieure à celle des réacteurs CFB ou MFB.

Tableau 3.5 Rendements et teneur en carbone présumés pour les configurations

	CFB	RC	MFB	Références et Commentaire
Teneur en carbone de la matière première (%)	60			Jugement d'ingénieur
Caractéristiques du produit				
Teneur en carbone de la bio-huile (%)	56	60	56	[5, 75]
Teneur en carbone du Biocharbon (%)	34	20	34	[25]
Teneur en carbone des gaz non-condensables (NCGs) (%)	12	22	12	[75]
Rendement en carbone de la bio-huile (%)	60			[75]
Rendement en carbone du biocharbon (%)	100			Hypothèse que le biocharbon est composé uniquement de carbone.
Rendement en carbone des NCGs (%)	15			

3.5.4.1.2 Résultats des bilans de masse et d'énergie

Le Tableau 3.6 fournit les résultats des débits entrants et sortants réacteur et du procédé global. La différence entre la sortie du réacteur et la sortie du procédé a été réalisée, car certaines configurations, comme le RC ou le CFB, n'ont pas les mêmes rendements à la fin du procédé que le MFB. Dans le cas du RC, tout le biocharbon sortant du réacteur sera brûlé pour produire de la vapeur dans la bouilloire; dans le cas du CFB, la moitié du biocharbon sera brûlée afin de produire les gaz de combustion pour le séchage de la biomasse. Il est aussi important de rappeler que la particularité du procédé MFB est que la bio-huile est presque sèche à la fin du procédé, étant donné la présence de l'unité de condensation progressive.

Tableau 3.6 Bilans de masse calculés

	CFB	RC	MFB	Observations
Entrées				
Biomasse entrante (tma/jour)	400			Comme présenté dans les hypothèses
Teneur en eau (tma/jour)	400			
Carbone dans la biomasse (tma/jour)	240			
Sortants à la sortie du réacteur				
Huile pyrolytique (tma/jour) /Rendement global (%)	264/66	288/70	264/66	Quantité d'huile obtenue avec l'hypothèse faite dans le Tableau 3.5
Teneur en eau (%)	22			10% de teneur en eau à l'entrée du réacteur + 12% d'eau produite par les réactions
Biocharbon (tonnes/jour) /Rendement (%)	82/20	48/12	82/20	Résultats obtenus avec les rendements supposés des tableaux précédents
NCGs (tonnes/jour) / Rendement (%)	54/14	64/16	54/14	
Sortants à la sortie du procédé				
Bio-huile (tma/jour) /Rendement sur base sèche (%)	216/54	232/58	216/54	**MFB :** L'huile de pyrolyse sera presque sèche à la fin du procédé. **CFB et RC :** L'huile de pyrolyse aura 22% d'humidité.
Biocharbon (tonnes/jour)	41	-	82	**CFB :** 50 % du biocharbon produit par le réacteur est brûlé pour produire des gaz de combustion pour le prétraitement et le reste est valorisé. **RC :** Tout le biocharbon est brûlé pour produire des gaz de combustion envoyer vers la bouilloire. **MFB :** Tout le biocharbon sera valorisé.
Steam (tonnes/jour)	-	516	-	Vapeur produite par la combustion du biocharbon

Le Tableau 3.7 détaille les entrées et sorties du bilan énergétique. D'un point de vue global, il est possible de confirmer que le procédé MFB a une demande énergétique plus élevée, ce qui est particulièrement dû au fait que le réacteur est chauffé par un chauffage à induction qui nécessite

plus d'énergie. En ce qui concerne l'énergie sortante, il est possible d'observer que pour le biocharbon, le MFB a la plus grande quantité d'énergie associée, vu que la quantité de biocharbon valorisée est maximale pour cette configuration.

Tableau 3.7 Bilans d'énergie obtenus

	CFB	RC	MFB	Observations
Entrées				
Énergie thermique (GJ/jour)	-	-	(1519)	Une partie de l'énergie de la bio-huile sera recirculée pour être utilisée comme énergie thermique.
Biomasse (GJ/jour)	7053 (7600 - 547)	7600	7600	**CFB :** Une partie de l'énergie sera perdue, car il y a 7% de biomasse perdue après le prétraitement (547 GJ)
Énergie électrique (GJ/jour)	813	132	308	
Vapeur (GJ/jour)	3	(19)	-	**RC :** La vapeur nécessaire pour le procédé sera fournie par la vapeur produite par la bouilloire.
Eau (GJ/jour)	5	15	-	
Besoin total en énergie (GJ/jour)	7874	7747	7908	
Sortants				
Gaz de combustion (GJ/jour)	-	482	-	
Bio-huile (GJ/jour)	4120	4074	3729 (5248-1519)	**MFB :** L'énergie de la bio-huile sera recirculée pour être utilisée comme énergie thermique en entrée du procédé
Vapeur (GJ/jour)	-	1598 (1617-19)	-	La vapeur nécessaire au procédé pour les entrées sera fournie par la vapeur produite par la bouilloire
Biocharbon (GJ/jour)	800	-	1600	**MFB :** Plus d'énergie est associée au biocharbon comparé au CFB, car il y a une plus grande quantité de biocharbon sortante du procédé
Pertes non comptabilisées (GJ/jour)	2954	1076	1757	
Chaleur rejetée (GJ/jour)		517	821	
Énergie totale sortant du procédé (GJ/d)	7874	7747	7908	Le besoin en énergie de l'entrée est égal à l'énergie sortante

3.5.4.2 Résultats économiques des scénarios

Après avoir analysé les différents bilans de masse et d'énergie associés aux trois configurations, l'analyse des résultats économiques est nécessaire. Le CAPEX et OPEX qui seront présentés sont basés sur les résultats de l'Annexe C et les revenus sont basés sur les bilans de masse obtenus et la quantité de produits.

Tableau 3.8 Résultats économique du scénario 1

	Procédé de base Lit fluidisé Circulant (CFB)	**Cône Rotatif (RC)**	**Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB)**
CAPEX (M$)	176	149	208
OPEX(M$/an)	20	21	21
Revenus (M$/an)	31	39	34
TRI (%)	5	12	5
ROI (%)	3	9	3
EBITDA (M$/an)	11.3	18.5	13.0
Marge EBITDA (%)	36	47	38
Délai de récupération (ans)	10.8	6.2	11.0

Le Tableau 3.8 détaille les résultats du premier scénario de mise en œuvre. Les revenus présentés dans le tableau sont ceux correspondant à la vente de bio-huile, de biocharbon et de la vapeur pour la cogénération, dans le cas de la configuration RC pendant un an.

À première vue, il est possible d'observer que les revenus associés au RC sont les plus élevés. La technologie RC permet d'obtenir plus de bio-huile, par rapport aux deux autres technologies. De plus, elle ne produit pas de biocharbon valorisé, mais elle produit de la vapeur pour la cogénération, qui représente 8M$ des revenus totaux. Le MFB présente un revenu inférieur, mais tout le biocharbon produit est valorisé. Pour la configuration CFB, dont le revenu est le plus petit, la moitié du biocharbon est utilisée pour être brûlée, afin de produire des gaz de combustion. L'autre moitié est valorisé comme biocharbon, ce qui explique le fait que cette technologie a le plus petit revenu.

Le TRI est plus élevé pour le RC, ce qui est adéquat, étant donné que les revenus annuels sont plus grands et que l'investissement en capital est le moins dispendieux. Pour le MFB, qui détient le CAPEX le plus élevé, les grands revenus atténuent le grand investissement. Un plus grand EBITDA est associé au MFB comparé au CFB.

Il est important pour ce scénario d'aborder la diversité du portefeuille de produits, pour mieux comparer les deux technologies dont les résultats sont plus semblables, soit le MFB et le CFB, pour ainsi les positionner l'une par rapport à l'autre. La configuration MFB offre essentiellement une plus grande diversité de portefeuille par rapport au CFB, car malgré le fait que les mêmes produits sont valorisés, la qualité de la bio-huile à la sortie du procédé est meilleure pour le MFB et la quantité de bio-biocharbon valorisée plus grande.

Tableau 3.9 Résultats économiques pour le scénario 2

	Procédé de base Lit fluidisé Circulant (CFB)	**Cône Rotatif (RC)**	**Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB)**
Bois de construction (t/jour)	365.5		
CAPEX (M$)	176	149	208
OPEX(M$/an)	70	63	63
Revenus (M$/an)	107	112	110
TRI (%)	23	29	21
ROI (%)	22	30	19
EBITDA (M$/an)	45.5	49.5	47.3
Marge EBITDA (%)	43	44	43
Délai de récupération (ans)	3.1	2.5	3.5

Pour les résultats du deuxième scénario, présentés dans le Tableau 3.9, il est important de spécifier que les coûts d'opération liés à la scierie ont été ajoutés à l'OPEX. Ils considèrent l'achat du bois, le transport du bois (en considérant qu'il se trouve dans un rayon de 20 km), ainsi que les opérations nécessaires au fonctionnement de la scierie. De plus, les coûts d'achat du bois pour la pyrolyse rapide ont été retirés, étant donné que les résidus sortant de la scierie seront utilisés comme biomasse d'entrée pour la pyrolyse rapide. Tous ces facteurs font en sorte que les OPEX sont plus élevées, mais les revenus sont proportionnellement plus élevés aussi, puisqu'il y a la vente du bois de construction.

Une amélioration significative peut être observée dans le TRI pour chaque technologie par rapport au premier scénario. Si l'on considère qu'un TRI de 20% est nécessaire pour qu'un projet soit rentable, les trois configurations sont rentables, le MFB ayant le plus petit TRI. Également, les valeurs des autres IPC permettent de noter des importants progrès. Ce scénario de mise en œuvre

est plus proche d'être rentable que le premier. À noter que le temps de retour sur investissement est beaucoup plus faible que dans le premier cas.

À la suite de cette analyse technico-économique, la configuration RC s'est différenciée des deux autres configurations avec un CAPEX moins couteux et de grands revenus. Cependant, malgré le fait que la configuration MFB a été observée avec des IPC moins attrayants, le fait d'avoir une bio-huile sèche à la fin de procédé peut rendre le projet plus viable si des taux incitatifs sont pris en compte pour la valeur énergétique du produit.

Il est à noter que l'Annexe C présente des résultats supplémentaires quant à cette partie de la première étude de cas et plus spécifiquement l'analyse de sensibilité effectuée pour différents paramètres considérés importants pour la viabilité économique du projet.

3.5.5 Résultats de l'analyse technico-économique réalisée avec I-BIOREF

L'analyse des résultats fournis par l'outil d'aide à la décision I-BIOREF sera séparée en deux parties : premièrement, les résultats techniques, avec les hypothèses et les entrées utilisées pour la simulation et ensuite, les résultats économiques.

3.5.5.1 Résultats techniques

L'outil d'aide à la décision I-BIOREF a été créé de manière à guider l'utilisateur étape par étape. Ainsi, une fois la voie technologique de bioraffinage choisie, il est possible de visualiser le diagramme d'écoulement. Dans le cas de cette étude de cas, la pyrolyse rapide a été choisie. Deux types de pyrolyse rapide existent dans I-BIOREF : la pyrolyse rapide thermique et catalytique. Pour cette étude de cas, la pyrolyse rapide thermique a été utilisée. La Figure 3.3 présente le diagramme d'écoulement existant dans I-BIOREF, une fois le modèle de pyrolyse rapide choisi. Le réacteur intégré dans le logiciel est celui avec le lit fluidisé circulant (CFB).

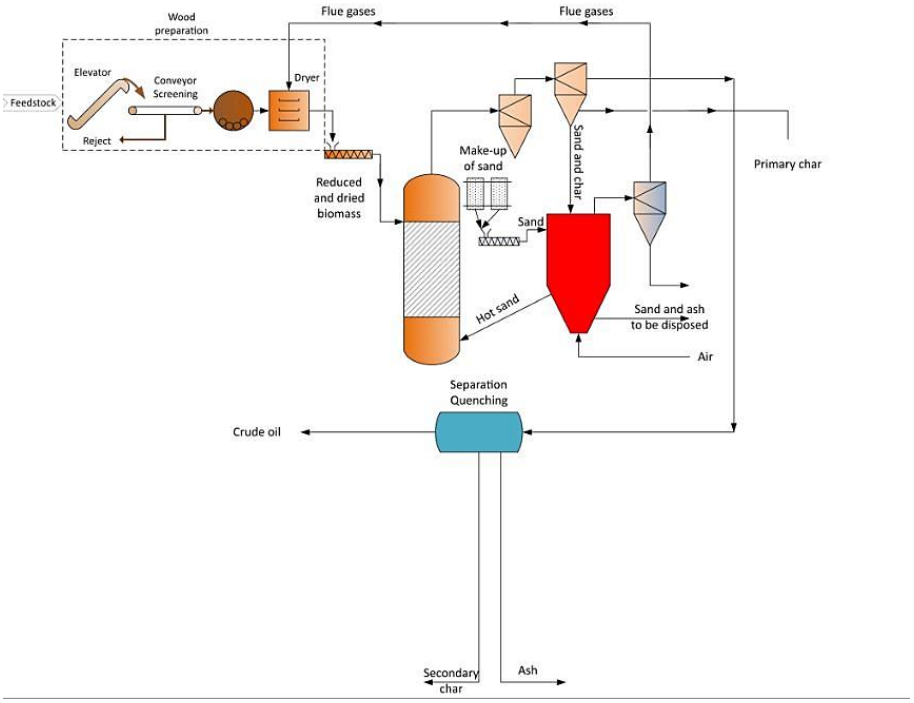

Figure 3.3 Diagramme d'écoulement de la configuration de pyrolyse rapide présente dans I-BIOREF

Le diagramme d'écoulement de la configuration CFB dans la Figure 3.2 correspond à celui présent ci-dessus incorporant la trempe rapide, la recirculation des gaz de combustion vers le prétraitement et la récupération du biocharbon primaire et secondaire. De cette manière, les différences identifiées entre les configurations RC, MFB et le CFB seront les mêmes. Le défi en utilisant l'outil d'aide à la décision est donc de représenter les deux autres configurations en adaptant les différents paramètres entrants nécessaires pour la simulation. Différents types d'entrées sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la simulation. En premier lieu, il y a la spécification du type de biomasse, sa teneur en carbone et sa teneur en eau. Les données utilisées ont été celles du Tableau 3.5, également utilisées pour l'analyse technico-économique indépendante du logiciel. Ensuite, il y a l'entrée des données spécifiques au procédé de pyrolyse rapide qui était nécessaire. Le Tableau 3.10 illustre dans la première colonne les différentes informations nécessaires pour la simulation du procédé dans I-BIOREF. Les trois premiers intrants ont des valeurs similaires pour les trois configurations puisque ce sont des données générales. Pour le ratio sable/biomasse, ce dernier est variable pour chaque configuration, puisque celui de la configuration RC est plus grand que le cas de base et le MFB n'utilise pas de sable. Un autre élément qui a été adapté est le biocharbon récupéré du système de pyrolyse. Comme pour l'analyse technico-économique de la Section 3.5.4,

50% du biocharbon produit par le CFB sera brûlé pour envoyer le gaz vers le prétraitement et le reste sera récupéré. En revanche, la totalité du biocharbon aurait dû être récupérée pour le RC et le MFB, même si l'objectif final de leur utilisation n'était pas le même. Le modèle de pyrolyse rapide présent dans l'outil d'aide à la décision ne permet qu'une recirculation partielle du biocharbon, parce que, par défaut, une certaine quantité est nécessaire pour la production de gaz de combustion utilisé au prétraitement. Cela étant dit, afin de représenter au maximum les deux autres configurations, la récupération du biocharbon a été adaptée au maximum possible, soit une valeur autour de 55%. Le plus grand changement sera donc au niveau de la configuration RC, où le biocharbon ne sera pas brûlé pour permettre la production de la vapeur, mais sera plutôt valorisé. Des revenus seront quand même présents, mais ils ne proviendront pas de la même source. Finalement, le dernier élément qui est différent est le pouvoir calorifique inférieur (PCI) et la densité de la bio-huile. Comme la bio-huile obtenue à la fin, pour la configuration MFB est presque sèche, son PCI sera plus grand, ce qui explique la différence dans le tableau.

Tableau 3.10 Données utilisées pour les intrants du procédé de pyrolyse rapide

Intrants nécessaires pour la simulation dans I-BIOREF	**CFB**	**RC**	**MFB**
Apport en matière première (tonne sèche/jour)	400		
Perte durant la préparation (%)	0		
Teneur en eau at l'entrée du réacteur (%)	10		
Ratio sable/biomasse	7.5	20	0
Perte de sable (%)	0		
Biocharbon récupéré du système de pyrolyse (%)	50	55.1	54.8
Biocharbon récupéré du système de trempe (%)	0		
Densité de la bio-huile	1.2	1.2	1.3
PCI de la bio-huile (kJ/kg)	20 100	20 100	32 000

Le Tableau 3.11 expose les bilans de masse obtenus à la suite de la simulation avec I-BIOREF. Tout d'abord, par comparaison avec le bilan de masse effectué dans le Tableau 3.6, ce bilan de masse n'est composé que de l'entrée du procédé et de la sortie, sans prendre en compte les débits sortant du réacteur. Les débits sortants permettent de réaliser plusieurs observations. Quant à la quantité de bio-huile obtenue, une différence entre le RC et les deux autres configurations n'a pas pu être réalisée étant donné que la taille des particules est un paramètre qui ne peut pas être changé et qui est fixe dans le logiciel. La seule différence est au niveau de la configuration de MFB qui

permet d'obtenir deux tonnes par jour de plus, par comparaison avec les deux autres configurations. Cela est dû au plus grand pouvoir calorifique inférieur du produit final. Le rendement sur une base sèche est donc presque le même pour les trois configurations. En ce qui concerne la teneur en eau de la bio-huile obtenue, le logiciel prend en compte le 10% à l'entrée du réacteur auquel s'additionne 12% produit lors des réactions, ce qui implique que la bio-huile aura une teneur en eau de 22%, et ce pour les trois configurations. Le rendement en biocharbon et en gaz non condensable peut aussi être observé dans le tableau. En comparant les rendements de ce tableau avec ceux du Tableau 3.6, il est possible de conclure que les rendements de la bio-huile sont très proches l'un de l'autre. La seule grande différence est au niveau du rendement de la configuration RC, qui est de 5%. En ce qui concerne le rendement en biocharbon, ce dernier est d'approximativement 25% pour les trois configurations en sortant du réacteur. Les données présentées dans le Tableau 3.11 sont reliées à la quantité de biocharbon récupérée à la sortie du procédé, après qu'une partie du biocharbon ait déjà été brûlée pour être recirculée. Le rendement du biocharbon fourni par la simulation du logiciel est donc plus grand que celui du Tableau 3.6, qui était de 20% pour la configuration CFB et MFB et de 12 % pour le RC. Ceci implique que, même qu'une fois une partie du biocharbon est brulée, la configuration CFB aura plus de biocharbon valorisé que dans l'analyse précédente, mais la différence n'est que de 8 tonnes/ jour. En ce qui concerne la configuration RC, étant donné qu'il n'est pas possible de représenter son diagramme d'écoulement initial, tout le biocharbon sera valorisé et il sera question, lors de la présentation des résultats, de comparer les revenus entre ceux provenant du biocharbon dans I-BIOREF et ceux provenant de la vapeur de cogénération dans l'analyse sans le logiciel. Finalement, pour le biocharbon résultant pour la configuration MFB, la quantité qui sera valorisée sera plus petite étant donné qu'il n'y a que 56 % qui peuvent être récupérés.

Tableau 3.11 Bilans de masse obtenu avec I-BIOREF

	CFB	RC	MFB	Commentaires
Intrants				
Biomasse entrante (tma/jour)	400			
Teneur en eau (tma/jour)	400			
Carbone dans la biomasse (tma/jour)	240			60% carbone dans la biomasse
Sortants du procédé de pyrolyse rapide				

Huile pyrolytique (tma/jour) / Rendement sur une base sèche (%)	214/54	214/54	216/54	Quantité d'huile obtenue avec la simulation, à la suite des données entrées du Tableau 3.10
Teneur en eau de l'huile pyrolytique (%)	22			10% de teneur en eau à l'entrée du réacteur + 12% d'eau produite par les réactions (la teneur en eau sera la même pour les 3 configurations à la sortie du procédé)
Rendement global de la pyrolyse rapide (%)	66			
Biocharbon (tonne/jour) / Rendement (%)	49/12	54/14	53/13	Résultats de la simulation
NCGs (tonne/jour) /Rendement (%)	36/9			Résultats obtenus par soustraction (aucune information sur le NCGs dans I-BIOREF)

Le Tableau 3.12 présente les bilans d'énergie fournis par I-BIOREF une fois la simulation effectuée. Au premier regard, il est possible de conclure que l'énergie électrique nécessaire est plus grande pour le RC et le MFB lors de la simulation que lors de l'analyse indépendante. Aussi, le besoin total en énergie, est plus élevée de 8 à 12% que celui du Tableau 3.7, ce qui rencontre les marges d'erreur d'un bilan d'énergie, à un stade préliminaire, présentées dans le livre de Peters et Timmerhaus [73, 76]. La marge d'erreur pour un stade préliminaire pour un bilan d'énergie et leur estimation de coûts est de ± 20%.

Tableau 3.12 Bilans d'énergie obtenus avec I-BIOREF

	CFB	RC	MFB	Observations
Entrées				
Biomasse (GJ/jour)	7600	7600	7600	Même énergie provenant de la biomasse pour les trois configurations
Énergie électrique (GJ/jour)	930	941	943	
Vapeur (GJ/jour)	3	3	3	Même quantité de vapeur et d'eau utilisée, étant donné que la capacité des trois configurations est la même
Eau (GJ/jour)	184	184	184	
Besoin total en énergie (GJ/jour)	8717	8728	8730	
Sortants				
Bio-huile (GJ/jour)	4305	4306	6922	MFB : Énergie associée plus grande, car la capacité calorifique

				de la bio-huile sortante est plus grande
Biocharbon (GJ/jour)	1369	1507	1472	**CFB :** Le moins d'énergie est associée au biocharbon récupéré, car le pourcentage de récupération est le plus petit
Pertes non comptabilisées (GJ/jour)	3043	2915	336	Pertes non comptabilisées et chaleur rejetée représentées ensemble dans I-BIOREF. Aucune distinction réalisée
Chaleur rejetée (GJ/jour)				
Énergie totale sortant du procédé (GJ/d)	8717	8728	8730	Le besoin en énergie de l'entrée est égal à l'énergie sortante

3.5.5.2 Résultats économiques de la simulation

En ce qui concerne les données économiques entrées dans I-BIOREF, elles ont été basées sur les résultats obtenus à la suite de l'utilisation de l'approche LBA utilisée ramener les configurations à une même base de calcul. Ainsi, les données des tableaux de coûts d'investissement et d'opérations présents dans l'Annexe C ont été insérées dans le logiciel. Il est important de spécifier qu'en ce qui concerne les coûts directs et indirects, seulement les pourcentages associés ont été pris en compte. De plus, pour les services, le logiciel a calculé leur coût total, après avoir introduit les prix unitaires supposés.

Le Tableau 3.13 présente les résultats du premier scénario implémenté dans le logiciel, qui est le procédé de pyrolyse rapide seul. Il est possible d'observer très rapidement que le CAPEX est le même que celui du Tableau 3.8. Ceci démontre qu'une fois les informations reliées aux équipements et les différents pourcentages associés aux coûts directs et indirects entrés, le logiciel fait le bon calcul pour les coûts d'investissement. L'OPEX est plus grand d'1 M$. Ce résultat est principalement dû à la grande consommation d'électricité démontrée par le bilan d'énergie. Finalement, les revenus représentent l'un des aspects où la différence entre les deux types de résultats est notable, plus spécifiquement dans le cas de la configuration RC. La différence dans les revenus est de 7M$, ce qui exerce une influence aussi sur le TRI. Cette différence est principalement due au fait qu'il n'y ait pas de revenus provenant de la vente de vapeur et que moins de bio-huile est obtenue lors de la simulation. Il y a donc 18% moins de revenus lors de la simulation. Tôt dans le processus de conception, à un stade préliminaire, le niveau d'estimation

des coûts est de ± 30%, ce qui permet de confirmer que malgré la différence dans les revenus, ces derniers sont dans les marges d'incertitudes[76].

Pour les deux autres configurations, il est possible d'observer que les résultats sont très similaires entre la simulation avec I-BIOREF et les calculs obtenus indépendamment du logiciel.

Tableau 3.13 Résultats économiques du premier scénario d'implémentation

	Procédé de base Lit fluidisé Circulant (CFB)	**Cône Rotatif (RC)**	**Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB)**
CAPEX (M$)	176	149	208
OPEX(M$/an)	22	21	21
Revenus (M$/an)	32	32	33
TRI (%)	6	9	6
ROI (%)	2	4	2
EBITDA (M$/an)	10.0	11.5	11.7
Marge EBITDA (%)	31	36	36
Délai de récupération (ans)	11	8.7	11

En ce qui concerne le deuxième scénario, soit celui de l'intégration de la pyrolyse rapide à une scierie déjà existante, la simulation se fait en deux étapes dans le logiciel. Premièrement, il y a la simulation de la scierie déjà existante, en spécifiant sa capacité et les coûts unitaires pour les services, afin que les coûts d'exploitation puissent être calculés et deuxièmement, il y a l'ajout de l'unité de pyrolyse rapide, où il faut spécifier que les résidus sortants de la scierie seront utilisés comme matière première au procédé de pyrolyse rapide. Les spécifications qui ont été ajoutées à l'unité de pyrolyse rapide sont celles utilisées pour le scénario 1. En ce qui concerne la scierie et le bois de construction résultants, 2 tonnes de plus ont été obtenues par jour, ce qui représente une petite différence. Pour les coûts d'exploitation associés à la scierie, le logiciel calcule les coûts d'exploitation en fonction des coûts directs, indirects et des différents services nécessaires, ce qui représente un calcul plus détaillé que celui effectué pour l'analyse économique précédente, où des coûts d'exploitation totaux avaient été supposés pour les calculs des IPC.

Les résultats sont présents dans le Tableau 3.14. En comparant les résultats des OPEX de la simulation avec ceux du Tableau 3.9, une différence est notable, ceux obtenus avec I-BIOREF sont 17% plus petits que ceux de l'analyse précédente. La différence rejoint donc les marges d'erreur de ± 20% qui devraient être respectés pour les coûts reliés aux opérations (bilans de masse et

énergie) et leur maintenance. Ensuite, les revenus présentent une différence principalement pour les configurations RC et MFB. Cette différence est due principalement aux mêmes raisons que celles énoncées dans le premier scénario. En revanche, les valeurs obtenues du TRI et du ROI sont plus grandes suite à la simulation, spécialement pour les configurations CFB et MFB. Cela est principalement dû aux coûts d'opération qui sont plus petits, ce qui implique que les revenus nets seront proportionnellement plus grands aussi et cela peut être observé dans les valeurs de EBITDA.

Tableau 3.14 Résultats économiques obtenus avec I-BIOREF pour le scénario 2

	Procédé de base Lit fluidisé Circulant (CFB)	**Cône Rotatif (RC)**	**Lit fluidisé assisté mécaniquement (MFB)**
Bois de construction (t/jour)	367.5		
CAPEX (M$)	176	149	208
OPEX(M$/an)	53	52	52
Revenus (M$/an)	108	109	109
TRI (%)	24	28	22
ROI (%)	26	33	23
EBITDA (M$/an)	52.7	54.6	54.0
Marge EBITDA (%)	50	51	51
Délai de récupération (ans)	2.7	2.3	3.1

3.5.5.3 Analyse de sensibilité réalisée avec I-BIOREF

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur les mêmes paramètres et mêmes variations que celle de l'analyse réalisée sans le logiciel présentée dans l'Annexe C. Le logiciel permet de monter plusieurs cas en parallèle avec le cas de base et de changer différents paramètres pour des analyses de sensibilité et de scénario. Il est ainsi plus facile de réaliser l'analyse, car la simulation pour chaque changement est rapide. Ceci est un grand avantage d'I-BIOREF en comparaison avec l'analyse précédente, où chaque paramètre a dû être changé un par un pour obtenir les résultats. La Figure 3.4 présente les résultats de l'analyse effectuée avec I-BIOREF pour le deuxième scénario. Les TRI obtenus ont été extraits dans un fichier Excel, afin de pouvoir être représentés dans un graphique. Il est possible de voir que les mêmes variations que dans l'Annexe C sont présentes. Encore une fois, le prix de l'huile et du soutien présumé pour le CAPEX, sont les paramètres dont la variation a un impact positif, mais aussi négatif, lorsque leurs valeurs diminuent. Ceci démontre

l'importance d'un environnement règlementaire stable pour la viabilité économique d'un procédé de bioraffinage.

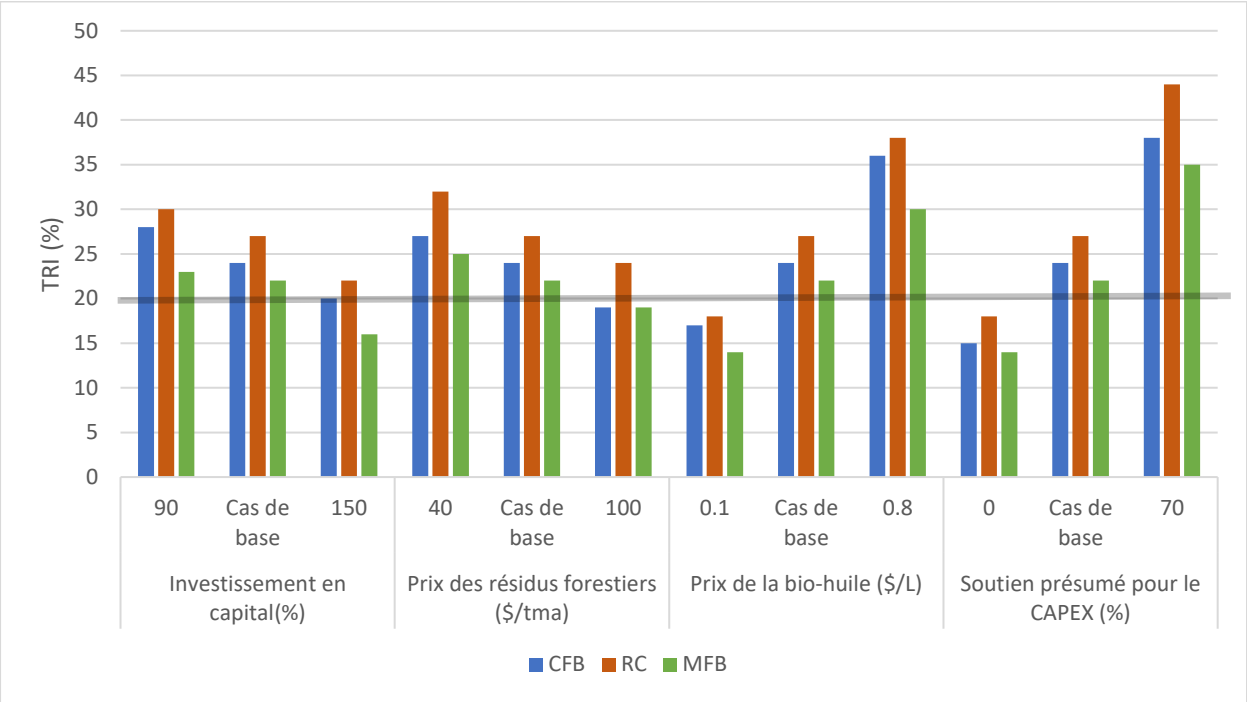

Figure 3.4 Analyse de sensibilité réalisée avec I-BIOREF

3.5.5.4 Retour sur les résultats obtenus pour la première étude de cas

À la suite de l'analyse des résultats obtenus avec les deux méthodes, il a été possible de conclure que ces derniers ont les mêmes ordres de grandeur, en respectant la marge de ± 30 % pour l'estimation des coûts et la marge de ± 20% pour l'estimation des bilans d'énergie et leurs coûts associés (opérations + maintenance). En introduisant les coûts reliés aux équipements et les pourcentages associés (coûts directs et indirects) utilisés pour l'application de la LBA dans l'analyse indépendante et basée sur la méthode de Peters & Timmerhaus, les coûts d'investissement et d'exploitation calculés par I-BIOREF sont très proches de ceux obtenus lors de la première analyse. Les coûts d'investissement sont presque identiques et les coûts d'exploitation varie de 1M$ pour le scénario de la mise en œuvre du procédé pyrolyse rapide seule. L'intégration du procédé de pyrolyse rapide à une scierie dans I-BIOREF permet d'obtenir des résultats dans le même ordre de grandeur, en prenant en compte que les coûts d'exploitation dans le logiciel sont beaucoup plus détaillés. Une différence de 17% dans les coûts d'exploitation a été observée ce qui est convenable. Cela démontre que les données utilisées dans I-BIOREF sont réalistes.

La variation des paramètres choisis dans I-BIOREF pour l'analyse de sensibilité, qui étaient semblables à ceux de l'analyse indépendante, a permis d'obtenir les mêmes conclusions, tout en permettant d'accélérer le calcul de l'analyse technico-économique. En effet, la présentation de la plateforme du logiciel permet de rendre systématique l'analyse technico-économique en suivant les étapes fournies par I-BIOREF à l'utilisateur :

1. Entrée des données techniques spécifique au procédé de pyrolyse rapide et aux différentes configurations
2. Entrée des données économiques (coûts d'investissement, d'exploitations et de vente des produits)
3. Obtention des résultats associés aux impacts techniques (quantité de produits obtenus, énergie consommée)
4. Obtention des résultats associés aux impacts économiques (coûts d'exploitation totaux, coûts d'investissement total, revenus)
5. Analyse de la performance économique (IPC)

De plus, en ce qui concerne la distinction entre les trois configurations de pyrolyse rapide, le diagramme d'écoulement spécifique à la configuration CFB peut être adapté, en général, pour les deux autres configurations (RC et MFB) au niveau des entrées du réacteur de pyrolyse rapide, les propriétés de la bio-huile et la recirculation du biocharbon. Les résultats ont démontré que le rendement de la bio-huile obtenu est proche de celui obtenu sans le logiciel, la seule différence étant au niveau de la configuration RC, où une différence de 5% dans le rendement a été obtenue. Cette différence est principalement due au fait que la taille de particules à l'entrée et le rendement ne peuvent pas être changés, étant donné que ces paramètres étant fixés par défaut. Il est aussi important de spécifier que ce ne sont pas tous les produits à valeurs ajoutées qui ont pu être représentés. La récupération totale du biocharbon dans le modèle existant dans I-BIOREF n'était pas possible, le modèle ayant été bâti seulement pour une recirculation partielle. Ainsi, la combustion de biocharbon pour produire de la vapeur pour la configuration du RC n'a pas pu être représenté et elle a été remplacée par une valorisation de 56% du biocharbon récupéré du procédé. Pour la configuration MFB, une récupération totale du biocharbon n'a pas pu être représentée.

Avec cette analyse, il est possible de valider la première hypothèse qui mentionne que l'outil d'aide à la décision I-BIOREF permet d'adapter le diagramme d'écoulement pour des analyses, tôt dans

les étapes de conception et d'obtenir des coûts d'investissement et d'opération relatifs précis, qui sont compris dans les marges de ± 30% d'une conception préliminaire.

3.6 Aide à la décision multicritère pour distinguer deux différentes voies technologiques pour la production de biocarburants

Contrairement à la première étude de cas, la deuxième vise la comparaison des deux voies technologiques différentes, plutôt que la comparaison de plusieurs configurations d'une même technologie. Cette comparaison a été faite à l'aide d'une analyse multicritère, en utilisant I-BIOREF. La présentation de cette étude de cas sera divisée en quatre sections différentes. La première portera sur la présentation des deux voies technologiques. Ensuite, il y aura les critères qui ont été utilisés pour la comparaison et pour finir une présentation des résultats techniques et économiques sera faite.

3.6.1 Présentation des deux voies technologiques de bioraffinage

Étant donné que le procédé de pyrolyse rapide a déjà été étudié dans la première étude de cas, pour cette deuxième étude de cas, il était important de choisir deux voies technologiques différentes. L'accent devait être aussi mis sur la production des carburants, tels que le diesel renouvelable, le kérosène (utilisé comme biocarburants pour le transport aérien), ainsi que des coproduits- tel que l'essence ou les carburants marins. Pour cette raison, il était important de choisir des stratégies qui sont prometteuses pour la production des biocarburants. Parmi ces stratégies, celles de la gazéification avec l'unité de Fischer-Tropsch (FT), ainsi que la liquéfaction hydrothermale (HTL) ont été choisies.

Le procédé de gazéification est présenté dans la Figure 3.5 et celui de HTL dans la Figure 3.6.

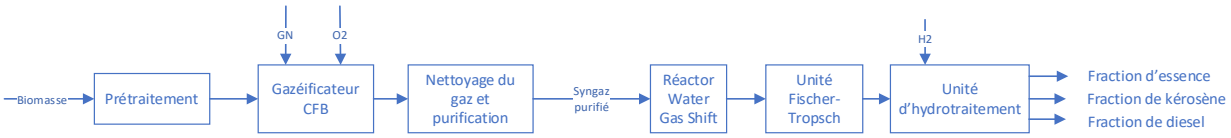

Figure 3.5 Procédé de gazéification

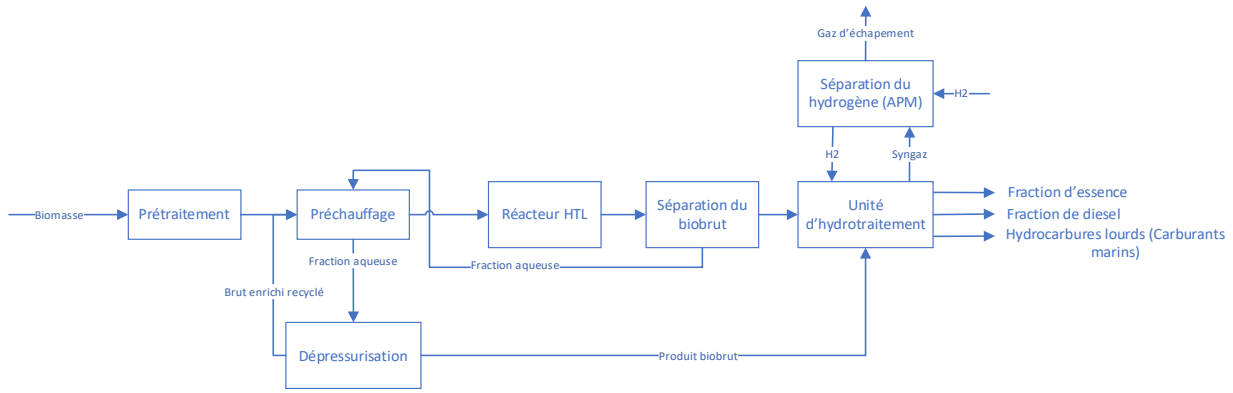

Figure 3.6 Procédé de liquéfaction hydrothermale

Le procédé de gazéification est composé de l'unité de prétraitement de la biomasse, du gazogène, de l'unité de purification du gaz de synthèse, du le réacteur Water Gas Shift (WGS), suivi de l'unité de synthèse FT et enfin de l'unité de valorisation, qui mène aux biocarburants visés. Le procédé utilise du gaz naturel pour le chauffage du réacteur. Le procédé HTL est composé de moins d'unité, car une fois la réaction dans le réacteur HTL et la séparation du biobrut réalisés, c'est la valorisation du biobrut qui suit. En comparant les deux procédés, il est certain qu'ils sont complètement différents, à l'exception de la partie valorisation, qui est la même. La valorisation du produit intermédiaire est nécessaire pour obtenir les biocarburants visés et garantir que la qualité des produits finaux corresponde aux caractéristiques du carburant[39].

Les synthèses WGS et FT représentent deux grandes unités, ce qui rend le procédé de gazéification plus complexe que le HTL. De plus, comme il a été présenté dans le Chapitre 2, les exigences liées à la biomasse sont complètement différentes. Pour la gazéification, la biomasse doit être séchée pour atteindre une teneur en eau comprise entre 10 et 20 %, mais pour le procédé HTL, la biomasse qui entre dans le réacteur ne doit pas être séchée du tout [14, 34]. Une autre caractéristique importante entre les deux procédés est le NMT. Le procédé de gazéification est utilisé par les industries depuis longtemps et son NMT montre un bien meilleur développement comparé au HTL, qui est encore à l'échelle pilote. Ces aspects doivent être pris en compte pour l'étude de cas et la comparaison des résultats entre les deux procédés.

Les procédés de la gazéification et de HTL sont des modèles présents dans l'outil I-BIOREF. Pour le procédé de gazéification, les voies technologiques pour produire du biométhanol et des biocarburants peuvent être mises en œuvre. Pour cette étude de cas, seule la voie du carburant renouvelable sera étudiée. Différents types de gazogènes peuvent être choisis, tels que le lit fixe,

le lit fluidisé circulant ou l'hybride. Dans le cadre de ce projet, le lit fluidisé circulant sera utilisé. Pour le procédé HTL, il y a également deux voies technologiques qui peuvent être étudiées : le biobrut et les biocarburants. La voie des biocarburants sera utilisée aussi pour ce procédé.

3.6.2 Choix de critères parmi ceux disponibles dans le logiciel

Cinq différentes catégories de métriques sont disponibles dans I-BIOREF. À part celle utilisée pour la première étude de cas, la performance environnementale, les indicateurs d'ACV et l'aspect socio-économique peuvent aussi être évalués pour une voie technologique de bioraffinage. Plus d'informations sur les métriques disponibles dans chaque catégorie peuvent être retrouvées dans l'Annexe D.

Comme mentionné dans la revue de la littérature, un mauvais choix de critères pour un processus de prise décision peut conduire à une mauvaise décision. Étant donné qu'I-BIOREF compte plus de cinquante métriques multidisciplinaires, il était nécessaire d'adopter une approche appropriée pour s'assurer que toutes les métriques seront analysées et pouvoir ainsi arriver à celles qui seront choisies pour le reste de l'étude. Une méthodologie a également été développée pour la sélection des paramètres de décision :

1. Identifier les questions critiques et hiérarchiser les valeurs des parties prenantes.
2. Analyse critique de chacune des métriques dans I-BIOREF
3. Triage des critères pour retenir les plus pertinents pour les spécificités du contexte du projet.

Les métriques les plus pertinentes ont été choisies pour chaque catégorie. Un triage de ces métriques a été nécessaire. Après une analyse critique des métriques les plus pertinentes, seules cinq ont été retenues pour poursuivre l'étude de cas pour la comparaison des deux biocarburants. Dans le cadre d'un processus de prise de décision, et plus particulièrement d'une décision multicritère, il est essentiel de choisir des métriques faciles à interpréter et qui sont calculées de manière indépendante. Ces métriques sont visibles dans le Tableau 3.15, avec toutes les informations extraites de l'outil. La base de calcul pour les métriques est présentée dans l'Annexe D. Comme indiqué précédemment, il est important qu'un critère ait une définition idéale, qui suppose des données parfaites et que toutes les informations soient disponibles, ainsi qu'une définition pratique [51]. La définition pratique peut être considérée de deux manières différentes :

par la base de calcul et par une interprétation préliminaire sur la façon dont les critères devraient être interprétés par les parties prenantes ou les autres membres d'un panel.

Tableau 3.15 Critères choisis comme étant significatifs pour l'étude de cas

Critères	Définition idéale	Interprétation	Analyse critique
Performance économique			
TRI (Taux de rentabilité interne)	Taux d'actualisation qui rend la valeur actuelle nette de tous les flux de trésorerie résultant de la mise en œuvre de la bioraffinerie égale à zéro.	Plus le TRI est élevé, plus le projet de bioraffinage est rentable. À partir de l'année de référence 2019, un seuil typique pour le TRI des projets de bioraffinerie est de 20 %.	Le TRI représente un critère pertinent pour un processus de prise de décision, car sa valeur démontre la viabilité économique du procédé et sa sensibilité à différents paramètres doit être étudiée.
EBITDA	L'EBITDA est le revenu d'exploitation que génère un projet de bioraffinerie, sans tenir compte des frais d'amortissement et de la dépréciation.	L'EBITDA est une mesure de la performance financière du projet de bioraffinerie, exprimée en tant que bénéfice (ou déficit) en espèces provenant de ses opérations. Plus l'EBITDA est élevé, plus le potentiel d'un projet de bioraffinerie à générer un bénéfice net est important.	L'EBITDA met en avant le flux de trésorerie généré au fil du temps par rapport au remboursement de l'investissement en capital et à la rentabilité courante.
CAPEX	Le CAPEX est le montant total du capital investi pour la mise en œuvre de l'usine de bioraffinage.	Mesure de l'intensité du capital d'un procédé de bioraffinage, compte tenu des subventions publiques. Un CAPEX plus faible implique généralement un risque de financement plus faible, car les investissements annuels des entreprises privées sont généralement plafonnés et l'accès aux sources de financement externes est limité.	Le CAPEX représente l'investissement pour les projets de bioraffinerie, avec la présence de beaucoup d'incertitudes, surtout à un stade précoce de la conception. Lorsque les procédés et leur maturité évoluent, ceci impacte également les rendements et les principaux équipements.
Performance environnementale			
Intensité de carbone des produits sortant du procédé de bioraffinage (CIBP)	Quantité annuelle d'émissions de GES résultant de la mise en œuvre de la bioraffinerie par unité de bioproduits.	Les valeurs les plus faibles sont préférées, car les bioproduits sont censés avoir une empreinte environnementale réduite et donc un impact moindre que les homologues produits à partir de ressources non renouvelables.	La métrique est davantage utilisée pour les plans d'affaires. L'intensité de carbone a trait à la préférence accordée au bioproduit ; dans de nombreuses juridictions, il ne s'agit pas seulement de biocarburants, mais de biocarburants à faible intensité de carbone.

Socio-économique			
Nombre total d'emplois créés (TJC)	Le TJC est le nombre d'emplois permanents en équivalent temps plein résultant de la mise en œuvre du projet de bioraffinerie, compte tenu de son impact systémique global sur l'économie locale. Il comprend les emplois directs, indirects et induits.	Le TJC est une mesure des avantages socio-économiques générés par le projet de bioraffinerie pour l'économie locale. Plus le TJC est élevé, plus le projet de bioraffinerie est socialement bénéfique.	Le nombre d'emplois créés est une métrique importante pour analyser l'impact de la mise en œuvre d'un projet sur la société. Sa définition montre quelles sont les références pour les trois différents emplois inclus dans la base de calcul.

3.6.3 Résultats techniques

Outre les données liées aux procédés, des données économiques générales sont également nécessaires. Le Tableau 3.16 fournit les hypothèses utilisées pour les coûts d'investissement et d'exploitation, ainsi que l'hypothèse pour l'analyse économique. De plus, un taux incitatif de 50% a été utilisé pour les prix du diesel, de l'essence et du kérosène renouvelables sur la base des prix des produits fossiles. Les prix utilisés pour les biocarburants produits sont disponibles dans l'Annexe D.

Tableau 3.16 Hypothèses technico-économiques

Paramètres	Valeur	Justification
Durée d'opération moyenne	8 000 heures	Les deux premières années, la durée d'exploitation sera plus faible, puis la capacité prévue sera atteinte
Durée de vie du projet	20 ans	2 ans pour la construction, 18 d'exploitation
Dette	0%	Tous les fonds disponibles
Soutien gouvernemental pour les coûts d'investissement	40%	Subvention provenant du gouvernement fédéral, provincial et municipal
Taux d'imposition	30%	Taux d'imposition nominal
Coût moyen pondéré au capital	6%	Taux moyen de base [73]
Matières premières entrantes pour le cas de base	2 000 tma/jour	Procédé à l'échelle commerciale
Coût des résidus forestiers	70 $/tma	Biomasse déchiquetée livrée à l'entrée de l'usine
Coût d'achat de l'eau	0.12 $/m3	Prix moyen de l'eau
Coût de l'électricité	5$/MWh	Valeur typique entre 5-15 $/MWh

Les résultats techniques associés à la production de biocarburants à partir des deux procédés sont présentés dans le Tableau 3.17. Il est important de préciser que les données techniques utilisées pour la simulation sont celles présentes par défaut dans I-BIOREF. Ces données se basent sur des

projets industriels et de recherche prouvés. À première vue, la HTL a un meilleur rendement que la gazéification, avec une production plus importante de diesel et d'essence renouvelables. Les deux procédés ont des coproduits : le procédé de gazéification a le kérosène renouvelable dont le prix de vente est proche du prix de vente du diesel ; le procédé HTL a le carburant marin qui peut également être vendu, mais sans taux incitatif pour cette étude. Même si le procédé HTL a un rendement plus élevé, il est important de souligner que son NMT n'est pas aussi avancé que celui de la gazéification, ce qui implique que malgré une production plus élevée de biocarburants, le procédé n'est pas encore à l'échelle commerciale.

Tableau 3.17 Résultats techniques obtenus avec la simulation sur I-BIOREF

	Rendement * (%)	**Bioproduits (t/jour)**				**NMT** [13, 14]
		Diesel renouvelable	Essence renouvelable	Kérosène	Hydrocarbures lourds (Carburant marin)	
HTL/ Hydrotraitement	31.5	295.6	188.7	-	144.7	5
Gazéification/FT	25.3	59.5	211	232.7	-	9

**Rendement basé sur la densité*

Le Tableau 3.18 indique les résultats économiques obtenus après la simulation avec l'outil d'aide à la décision. Le coût du capital (CAPEX) est basé sur le coût des équipements pour les différentes unités des procédés, ainsi que sur les coûts directs et les coûts indirects, habituellement utilisés pour une évaluation économique. Les fonds de roulement et le soutien supposé pour les coûts d'investissement sont également inclus dans le CAPEX. Les coûts d'exploitation sont basés sur le prix de la matière première, les coûts des produits chimiques et des services publics, ainsi que d'autres coûts directs comme la main-d'œuvre ou la maintenance. Les revenus présentés dans le tableau sont basés sur la vente des bioproduits.

Tableau 3.18 Résultats économiques obtenus avec I-BIOREF

	HTL/Hydrotraitement	**Gazéification/FT**
CAPEX (M$)	1 149	1 185
OPEX (M$/an)	107	138
Revenus (M$/an)	253.7	217.2

3.6.4 Résultats de l'analyse multicritère

Le Tableau 3.19 présente les valeurs des critères obtenues après la simulation avec l'outil. Comme prévu après l'évaluation des résultats techniques et économiques, le procédé HTL a une meilleure performance économique que la gazéification, principalement en raison du rendement plus élevé. La différence dans le CAPEX est très faible, ce qui suggère que l'investissement au début du projet est approximativement le même. En ce qui concerne la performance environnementale, le procédé HTL assure une plus petite empreinte environnementale en termes d'émissions et de tonnes de CO2eq. La gazéification est un procédé plus grand que le HTL, comme il a été observé dans le diagramme d'écoulement, à cause de la présence de plus d'unités entre la production du biobrut et l'hydrotraitement pour obtenir les biocarburants. Un autre aspect qui explique la différence dans l'empreinte environnementale est le fait que dans I-BIOREF, du gaz naturel est utilisé pour la gazéification, ce qui explique la grande différence entre le CIBP des deux stratégies. En termes des emplois créés, la mise en œuvre du procédé de gazéification crée moins d'emplois que le procédé HTL, mais la différence n'est que de 11 emplois entre les deux. Les métriques socio-économiques dans I-BIOREF sont calculées en fonction de l'emplacement et de la capacité. Il y a des facteurs multiplicateurs qui sont spécifiques aux pratiques locales et la base d'agglomération est considérée pour obtenir des valeurs moyennes pour le nombre d'emplois créés avec la mise en œuvre des procédés.

Tableau 3.19 Valeurs des critères obtenus à la suite de la simulation

	HTL/Hydrotraitement	Gazéification/FT*
Performance économique		
TRI (%)	14	7
EBITDA (M$/an)	146	79
CAPEX (M$)	1 149	1 185
Performance environnementale		
CIBP (kg CO2 eq/MJ)	0.3	2.0
Socio-économique		
TJC (emplois)	188	177

**Utilisation du gaz naturel*

3.6.4.1 Analyse de sensibilité

Pour aller plus loin dans la comparaison entre les deux procédés et pour évaluer les différents risques, il a été choisi de faire une analyse de sensibilité sur certains paramètres qui ont été jugés importants pour la rentabilité et la viabilité économique. Le Tableau 3.20 présente ces paramètres et leurs variations qui ont été étudiés à l'aide de I-BIOREF. Le logiciel donne la possibilité à l'utilisateur de changer différents paramètres et indicateurs et de regarder l'impact de leur changement sur les paramètres techniques ou sur les catégories de critères existantes, tout en comparant visuellement avec le cas de base.

Tableau 3.20 Paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité

Paramètres		Valeur	Justification
Estimation de l'Investissement en capital	Minimum	90%	Pas de sous-estimation de coûts
	Cas de base	100%	Cas de base
	Maximum	150%	Hypothèse de coûts supplémentaires dus à l'intégration éventuelle d'un nouvel équipement ou d'une mise à jour.
Taux incitatif sur les biocarburants	Minimum	Prix des produits fossiles	Pas de taux incitatif disponible pour la production des biocarburants
	Cas de base	50%	Cas de base
	Maximum	100%	Taux incitatif plus grand applicable pour la production de biocarburants
Capacité	Minimum	1 000 tma/jour	Insuffisance de l'approvisionnement en matières premières
	Cas de base	2 000 tma/jour	Cas de base
	Maximum	4 000 tma/jour	Disponibilités de matières premières supplémentaires
Soutien présumé pour les coûts d'investissement	Minimum	0%	Hypothèse d'aucun support disponible
	Cas de base	40%	Support du gouvernement dans le cas de base
	Maximum	70%	Hypothèse d'un support maximal
Prix des résidus forestiers	Minimum	40$/tma	Faible coût de la biomasse
	Cas de base	70 $/tma	Cas de base
	Maximum	100 $/tma	Biomasse disponible plus loin

La variation du TRI pour les cinq paramètres est présentée dans la Figure 3.7. En extrayant les données obtenues pour chaque procédé sur Excel, il a été possible de construire un graphique qui permet de comparer visuellement les deux procédés pour l'analyse de sensibilité.

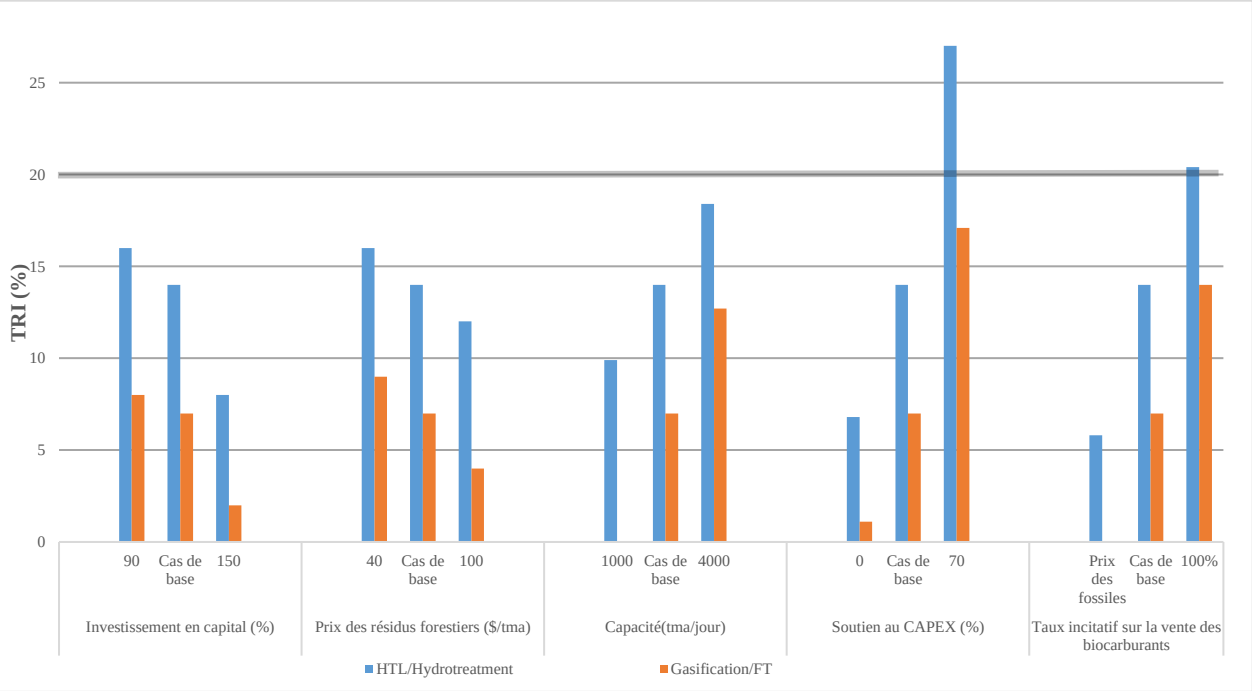

Figure 3.7 Résultats de l'analyse de sensibilité pour les cinq paramètres

À première vue, il y a deux paramètres qui améliorent significativement le TRI lorsqu'ils sont à leurs valeurs les plus élevées : le soutien présumé au CAPEX et le taux incitatif sur le prix des biocarburants.

Le soutien présumé du capital correspond au soutien maximal de tous les niveaux de gouvernement ou d'autres types de soutien. Lorsque 70% de l'investissement en capital est financé, l'impact sur la viabilité économique est significatif pour les deux procédés, surtout lorsque l'investissement est d'environ 1,1 milliard de dollars. Même si le procédé de gazéification n'atteint pas le TRI visé de 20%, son amélioration est considérable. Quant au procédé HTL, avec un soutien maximal, le TRI peut atteindre 27%. En revanche, si aucun soutien financier n'est disponible, la viabilité du projet est remise en cause, car le TRI des deux procédés est inférieur à 10%.

Le TRI est également sensible aux incitations disponibles pour le prix de vente des biocarburants. Si les incitations ne sont pas disponibles pour être appliquées aux biocarburants, alors les projets ne sont plus économiquement rentables. Il n'y a pas de TRI pour la gazéification et le TRI du

procédé HTL est d'environ 6%. Mais en doublant les incitations du cas de base, le TRI est amélioré pour les deux procédés. Ces deux paramètres révèlent l'importance d'avoir accès à un soutien financier ou à des incitations disponibles pour le produit final. Sans la disponibilité de l'un de ces deux éléments ou des deux ensembles, la mise en œuvre d'un projet de biocarburant à grande échelle est très incertaine, car le retour sur investissement ne sera pas présent pour les entreprises.

Il y a ensuite l'investissement en capital, qui peut être crucial pour le projet. Un CAPEX plus élevé lors de la mise en œuvre d'un procédé a un fort impact sur le retour sur investissement. Les incertitudes concernant le CAPEX sont plus susceptibles d'apparaître lorsque le NMT de la technologie n'est pas élevé. De ce fait, il est plus probable que le procédé HTL ait un CAPEX plus élevé que celui présenté dans le cas de base, car ce procédé est celui qui a le NMT le plus bas.

Le prix des résidus forestiers peut aussi avoir un impact sur le TRI et la viabilité économique du projet. Comme démontré dans la première étude de cas, devoir acheter des résidus forestiers plus loin ou avoir de la compétitivité pour l'accès à la biomasse peut venir compromettre le projet, en entraînant une diminution du TRI. Dans le cas contraire, lorsqu'un prix plus bas d'achat pour la biomasse est disponible, cela permet d'avoir des coûts d'exploitation plus petits et donc un revenu plus grand, ce qui augmente le TRI. Ce paramètre est important, car, en fonction de l'emplacement du projet, la disponibilité des résidus forestiers plus éloignés de l'usine peut avoir un effet sur la viabilité du projet.

Enfin, la capacité du procédé peut avoir un impact important non seulement sur le TRI, mais aussi sur les métriques de décision choisies précédemment. Une capacité plus élevée améliore le TRI ainsi que les revenus, même si le capital de l'investissement sera plus important. Cependant, il faut que suffisamment de résidus forestiers soient disponibles à proximité de l'usine. Dans le cas où moins de matière première est disponible, et que la capacité doit être inférieure à 2 000 tma/jour, la viabilité du projet sera affectée, en particulier pour le procédé de gazéification où il n'y aura pas de TRI. Le Tableau 3.21 et le *Coût *des résidus forestiers équivalent à celui du cas de base.*

Tableau 3.22 présentent les métriques de décision choisies pour l'étude de cas et leur variation en fonction de l'évolution de la capacité. Premièrement, comme prévu avec l'augmentation de la capacité, les revenus et l'EBITDA sont plus élevés. Il n'y a pas de changement pour le CIBP, car la métrique est présentée en kgCO2eq/MJ. Cependant, si l'unité était modifiée en fonction de la production de biocarburants, les émissions de CO2eq seraient plus élevées avec une plus grande

capacité. Enfin, pour le nombre total d'emplois créés, il y a une croissance linéaire, en passant d'une capacité 1 000 tma/jour à 4 000 tma/jour. Comme énoncé précédemment, le calcul du nombre total d'emplois dans I-BIOREF est basé sur la capacité nominale de l'usine de bioraffinage et prend en compte les emplois directs, les emplois indirects et les emplois induits. Il tient compte des emplois dans les forêts, dans la production et dans la livraison des produits, indiquant qu'une croissance linéaire était attendue.

Tableau 3.21 Impact du changement de la capacité sur les critères choisis pour le procédé HTL

	HTL/Hydrotraitement Capacité de 1 000 tma/jour *	HTL/Hydrotraitement Cas de base	HTL/Hydrotraitement Capacité de 4 000 tma/jour*
Performance économique			
TRI (%)	10	14	18
EBITDA (M$/an)	67	146	310
CAPEX (M$)	734	1 149	1 797
Performance environnementale			
CIBP (kg CO2 eq/MJ)	1.8	1.8	1.8
Socio-économique			
TJC (emplois)	95	188	375

**Coût des résidus forestiers équivalent à celui du cas de base.*

Tableau 3.22 Impact du changement de la capacité sur les critères choisis pour le procédé de gazéification

	Gazéification/FT Capacité de 1 000 tma/jour*	Gazéification/FT Cas de base	Gazéification/FT Capacité de 4 000 tma/jour*
Performance économique			
TRI (%)	-	7	13
EBITDA (M$/an)	15	79	214
CAPEX (M$)	754	1 185	1 862
Performance environnementale			
CIBP (kg CO2 eq/MJ)	43.6	43.6	43.6
Socio-économique			
TJC (emplois)	90	177	352

**Coût des résidus forestiers équivalent à celui du cas de base.*

D'après les résultats obtenus pour le cas de base et l'analyse de sensibilité, le procédé HTL ressort toujours avec sa performance économique et environnementale, ce qui démontre que c'est un

procédé prometteur pour l'avenir, en raison des rendements et des études réalisées, mais sa viabilité économique à l'échelle commerciale doit être démontrée, étant donné son NMT assez bas. De plus, pour la gazéification l'utilisation du gaz naturel a eu un impact notable sur l'empreinte environnementale lors de la simulation. D'autres sources de chaleur peuvent être utilisées, comme une chaudière à biomasse, pour réduire les émissions et améliorer l'empreinte environnementale du procédé de gazéification.

Pour donner suite à la simulation des deux procédés de production de biocarburants dans I-BIOREF, il est possible de conclure que le fait d'avoir accès aux définitions, interprétations et bases de calcul permet de facilement quantifier les indicateurs de performances reliés aux critères et de comprendre comment ces dernières ont été calculées. De plus, les catégories multidisciplinaires des critères permettent d'évaluer différents aspects de la mise en œuvre d'une stratégie. Étant donné la variété de paramètres entrants qui peuvent être changés pour effectuer une analyse de sensibilité et de scénarios, il est facilement possible d'évaluer la sensibilité du TRI à différents paramètres et d'extraire les données pour aller plus loin dans l'analyse et assembler des données pour aller plus loin dans la comparaison. Il a été possible de faire la distinction entre les deux procédés en comparant les différents critères et résultats techniques obtenus. Cependant, le risque relié à la maturité technologique n'a pas été pris en compte directement. Il a fallu prendre en compte, lors de l'analyse des résultats la différence entre les NMT. L'analyse de sensibilité a toutefois permis d'évaluer l'impact des variations possibles pour les paramètres qui représentent le plus grand risque (ex : CAPEX, subventions, taux incitatif sur les biocarburants). Il est donc possible de valider la deuxième sous-hypothèse qui spécifie que l'outil d'aide à la décision d'obtenir des valeurs de critères de décision bien calculés et interprétables, afin de faciliter le processus de triage.

3.7 Retour sur les résultats obtenus pour les 2 études de cas pour valider l'hypothèse générale

Les deux études de cas ont permis de valider différents aspects en lien avec l'utilisation de l'outil d'aide à la décision choisi. Avec la première étude de cas, l'analyse technico-économique et les données calculées par I-BIOREF ont été analysées pour plusieurs configurations de la même voie technologique. En comparant avec une analyse réalisée sans l'utilisation du logiciel, il a été possible de conclure que les coûts d'investissement relatifs obtenus sont fiables et précis et presque

identiques à ceux obtenus avec la première analyse, ce qui démontre que la méthode de calcul simulée par le logiciel est la bonne. En ce qui concerne les coûts d'exploitation et de maintenance, une différence de maximum 17% a été observée lors de l'intégration d'une unité de pyrolyse rapide à une scierie, ce qui se retrouve dans la marge de ± 20% pour une étude préliminaire. De plus, le logiciel a permis de différencier les configurations étudiées entre elles au niveau des coûts et généralement d'un point de vue technique au niveau du procédé. Le fait d'adapter le diagramme pour une autre configuration de pyrolyse rapide permet d'obtenir des données avec des ordres de grandeur correspondants à l'analyse technico-économique indépendante.

En adaptant les entrées à saisir pour chaque configuration, il a été possible de les représenter globalement. En ayant indiqué le pouvoir calorifique inférieur de la bio-huile, il est certain que le produit final est celui désiré, mais sans toutefois permettre de changer la teneur en eau de la bio-huile ou son contenu en carbone à la fin du procédé. Il est important de rappeler qu'étant donné que le modèle ne permettait qu'une recirculation partielle du biocharbon, moins de revenus ont été associés à la configuration MFB et RC. Malgré ces limitations, il a été possible d'arriver aux mêmes conclusions que pour l'analyse indépendante, soit la distinction de la configuration RC parmi les deux autres. De plus, l'analyse de sensibilité effectuée avec I-BIOREF est plus rapide à exécuter et présente les mêmes variations que pour l'analyse indépendante.

En ce qui concerne la deuxième étude de cas, l'objectif était plutôt de comparer deux voies technologiques différentes en se basant sur une analyse multicritère, en utilisant les différents critères multidisciplinaires qui sont disponibles dans l'outil d'aide à la décision. Il a été démontré que les valeurs des critères calculés sont bien définies et interprétables, de manière à différencier des voies technologiques différentes. Le procédé HTL a démontré avoir une meilleure performance environnementale et économique que la gazéification, mais le risque n'a pas été pris en compte par l'intermédiaire des critères, ce qui implique qu'il a fallu tenir compte pendant l'étude de cas du fait que le procédé HTL a un NMT plus petit que la gazéification. Différents incertitudes et risques pourraient donc être présents pour la mise en œuvre d'un procédé HTL, tels qu'un plus grand capital en investissement que celui utilisé et un rendement différent lors de la mise à l'échelle commerciale du procédé. C'est seulement en faisant des analyses de sensibilité et de scénario dans I-BIOREF que le risque relié à certains paramètres a pu être analysé.

En ce qui concerne le choix de critères utilisés, d'autres critères auraient pu être choisis parmi la variété disponible, si l'objectif ou les valeurs d'une compagnie représentée avaient été différents. La gamme de critères et les catégories permettent à l'utilisateur d'avoir un vaste choix, dépendamment des valeurs des parties prenantes et des objectifs du projet.

Finalement, l'outil accompagne l'utilisateur étape par étape afin de valider les données rentrées (paramètres techniques et économiques), pour obtenir par la suite les impacts économiques et techniques. Une fois, ces données confirmées, il est possible d'accéder aux différentes catégories de critères et visualiser leurs valeurs, accompagnées par l'interprétation, la définition et la base de calcul, ce qui permet de valider l'hypothèse générale. L'outil permet d'accélérer et de rendre plus systématique la comparaison entre différentes configurations d'une même voie technologique ou entre différentes stratégies de bioraffinage, ce qui facilite le processus de triage pour arriver à un choix informé et éclairé.

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

La décarbonisation de l'industrie et du secteur du transport devient de plus en plus importante, étant donné l'objectif d'une carboneutralité d'ici 2050. Le bioraffinage est un des procédés qui peut participer aux diminutions des émissions de GES. Ce type de procédé utilise des résidus forestiers comme matière première, considérés comme de moindre qualité pour d'autres procédés. Différents procédés de bioraffinage dont le NMT est à un niveau assez avancé existent actuellement. La production de biocarburants à partir des procédés de bioraffinage devient de plus en plus populaire et de plus en plus de compagnies sont intéressées à leur mise en œuvre. Avec toutes les incertitudes présentes au début du processus de conception, la viabilité économique de la mise en œuvre de ce type de procédé peut sembler improbable. Les compagnies, les consultants ou le gouvernement ont besoin d'un système de prise de décision basé sur des critères multidisciplinaires qui pourrait les aider à prendre en compte tous les risques, mais aussi à avoir accès à une base de données et aux informations technologiques supplémentaires que les fournisseurs de technologie ne fournissent pas toujours. Entre autres, les outils d'aide à la décision peuvent permettre aux entreprises d'identifier des solutions viables et d'évaluer différentes voies technologiques de bioraffinage existantes à l'aide de critères précis en fournissant des données et des indicateurs reliés à la performance économique, environnementale ou socio-économique. Le but de ce mémoire est d'effectuer un processus de triage pour des configurations d'une même voie technologique et pour des voies technologiques différentes en utilisant un outil d'aide à la décision. Cet outil permettra d'effectuer une analyse systématique et critique et pourra ainsi démontrer ou non son efficacité à accélérer et éclaircir le choix durant le triage.

4.1 Utilisation d'I-BIOREF dans le génie de conception de procédés

Afin de réellement accompagner les parties prenantes dans la prise de décision quant à la mise en œuvre d'un procédé de bioraffinage, l'outil d'aide à la décision utilisé doit être en mesure d'accélérer les différentes étapes associées à la conception des procédés, tout en fournissant des données dont les marges d'incertitudes sont respectées.

D'après le Guide des pratiques professionnelles de l'Ordre des ingénieurs du Québec, il y a cinq étapes fondamentales de conception [77] : l'analyse des besoins, l'élaboration de concept, la conception préliminaire, la conception détaillée et la synthèse.

Plus un projet avance dans les étapes de conception, plus le niveau de détails doit être précis. Comme il a été vu avec les études de cas, I-BIOREF permet d'avoir des estimations qui se retrouvent dans les marges d'incertitudes de la conception préliminaire. L'élaboration du concept et la conception préliminaires représentent donc les niveaux dans le processus de conception où l'utilisation d'I-BIOREF pourrait être pertinente et pourrait être conviviale avec les besoins des différents utilisateurs.

L'élaboration du concept permet d'effectuer une analyse préliminaire des estimations des coûts provenant des développeurs de technologies et de la performance technique. I-BIOREF pourrait permettre à ses utilisateurs d'aller plus en profondeur pour l'analyse du concept et analyser différentes variantes d'une même technologie, tout en ayant accès à des bases de données environnementales, économiques et techniques. Ces bases de données proviennent de projets industriels et de recherche prouvés à grande échelle.

La conception préliminaire sert à définir clairement le problème de conception et d'identifier les différentes options possibles pour répondre à la problématique et aux objectifs du problème. Cette étape est divisée en trois niveaux différents [76] :

1. L'ingénierie de préfaisabilité avec une précision nominale des estimations des coûts d'investissement et d'opération
2. L'ingénierie de faisabilité avec une estimation de coûts plus précise pour quelques options
3. Ingénierie de définition avec le choix d'une option pour l'approbation du projet et la conception détaillée.

La Figure 4.1 présente les étapes les plus importantes au niveau de l'ingénierie préliminaire. À la fin de chaque étape, un triage est nécessaire pour diminuer le nombre d'options, ce qui explique la dernière boite représentant les étapes d'un processus de triage et l'implication des parties prenantes pour arriver à un choix final. Les différentes étapes encadrées en rouge représentent les endroits où l'utilisation d'I-BIOREF pourrait être pertinente. Son utilisation pourrait permettre de rendre plus systématique la réalisation des étapes encadrées, tout en fournissant des résultats se trouvant dans la marge d'incertitude présentée.

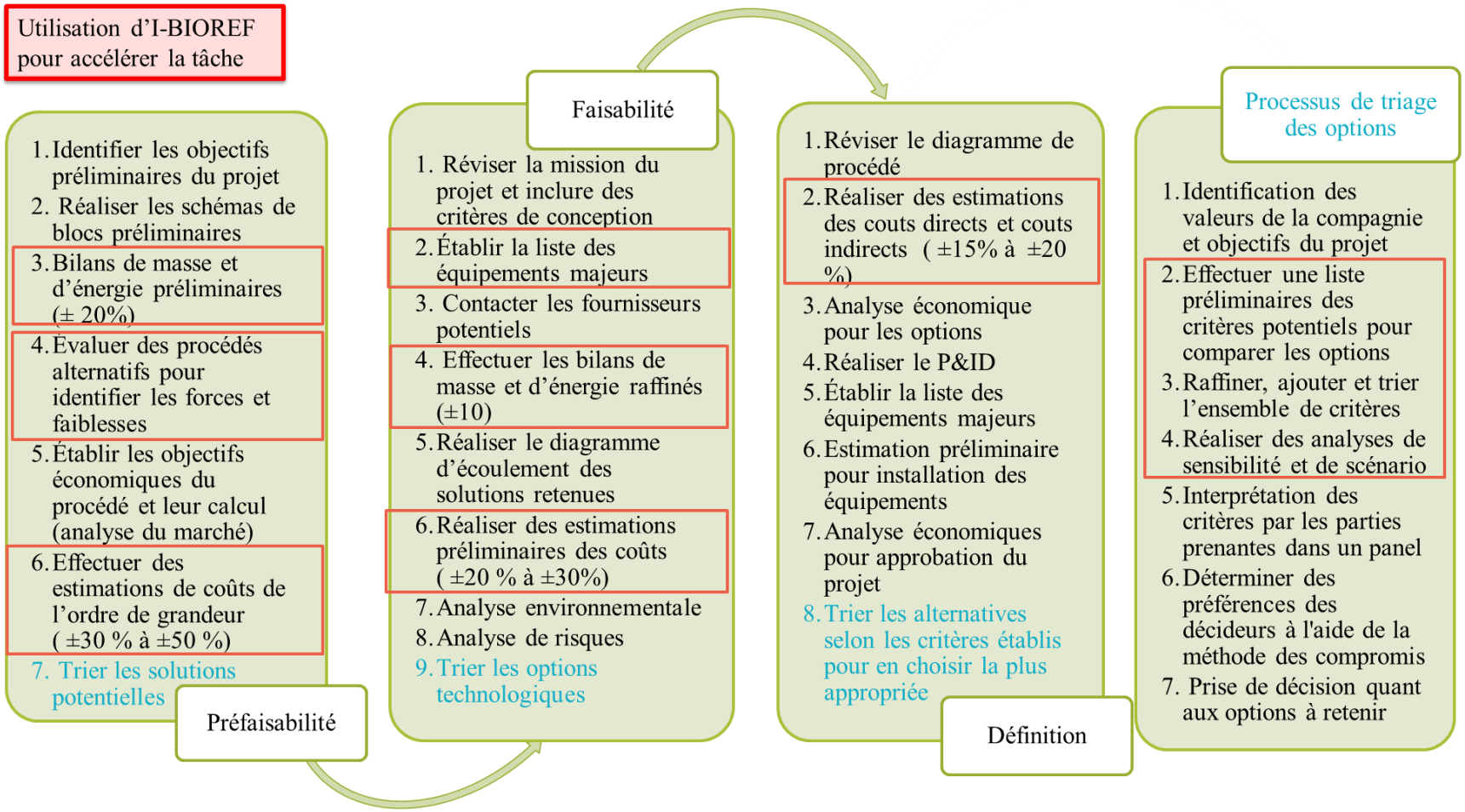

Figure 4.1 Utilisation d'I-BIOREF pour la conception des procédés

La pertinence de l'utilisation d'I-BIOREF pour la plupart des étapes soulevées dans la figure a déjà été démontrée lors des études de cas. Des bilans d'énergie et de masse, ainsi que des estimations des coûts ont été obtenues dans les marges identifiées. De plus, l'utilisation des critères multidisciplinaires disponibles a facilité la comparaison de deux stratégies de bioraffinage différentes. Comme il a été énoncé lors de la présentation des études de cas, I-BIOREF contient plus d'une cinquantaine de critères qui peuvent être utilisés pour l'étude de la mise en œuvre d'un procédé. Le plus important est de choisir des critères indépendants un de l'autre, dans la base de calcul, qui sont adéquats pour répondre à l'objectif du projet et différencier suffisamment les options les unes des autres.

En ce qui concerne la 4ième étape du niveau de préfaisabilité, l'évaluation de procédés alternatifs peut être réalisée avec I-BIOREF. Par exemple, si une compagnie vise la production de carburants liquides et que le procédé de gazéification a été identifié au début, d'autres alternatives telles que la liquéfaction hydrothermale ou la pyrolyse rapide combinée au traitement post-catalytique peuvent être évaluées. Ensuite, l'identification des équipements majeurs comme dans le cas de la deuxième étape du niveau de faisabilité peut aussi être réalisée avec I-BIOREF. Comme il a été vu dans la Figure 3.3, I-BIOREF présente le diagramme d'écoulement de la voie technologique évaluée. De plus, lors de l'entrée des données de coûts des équipements, ces derniers sont divisés en unités fonctionnelles qui précisent de manière explicite les différents équipements inclus dans l'unité. Ceci pourrait donc permettre à l'utilisateur d'avoir accès au type d'équipement nécessaire pour la mise en œuvre du procédé et de contacter les bons fournisseurs potentiels par la suite. À tout moment dans l'évaluation, l'utilisateur a l'option de revenir sur les coûts des équipements et de changer leurs valeurs pour évaluer la viabilité économique avec les nouvelles données. Il est important de préciser qu'une analyse environnementale est aussi possible avec le logiciel, ainsi qu'une analyse des indicateurs reliés à l'analyse ACV.

Cette analyse des étapes de conception préliminaires permet de mener la discussion vers les conclusions de l'utilisation d'I-BIOREF, afin de poursuivre avec les enjeux présents et les améliorations possibles. La Figure 4.2 présente les observations et les conclusions tirées à la suite de la réalisation des deux études de cas effectuées pour répondre aux hypothèses et aux objectifs de ce projet de recherche.

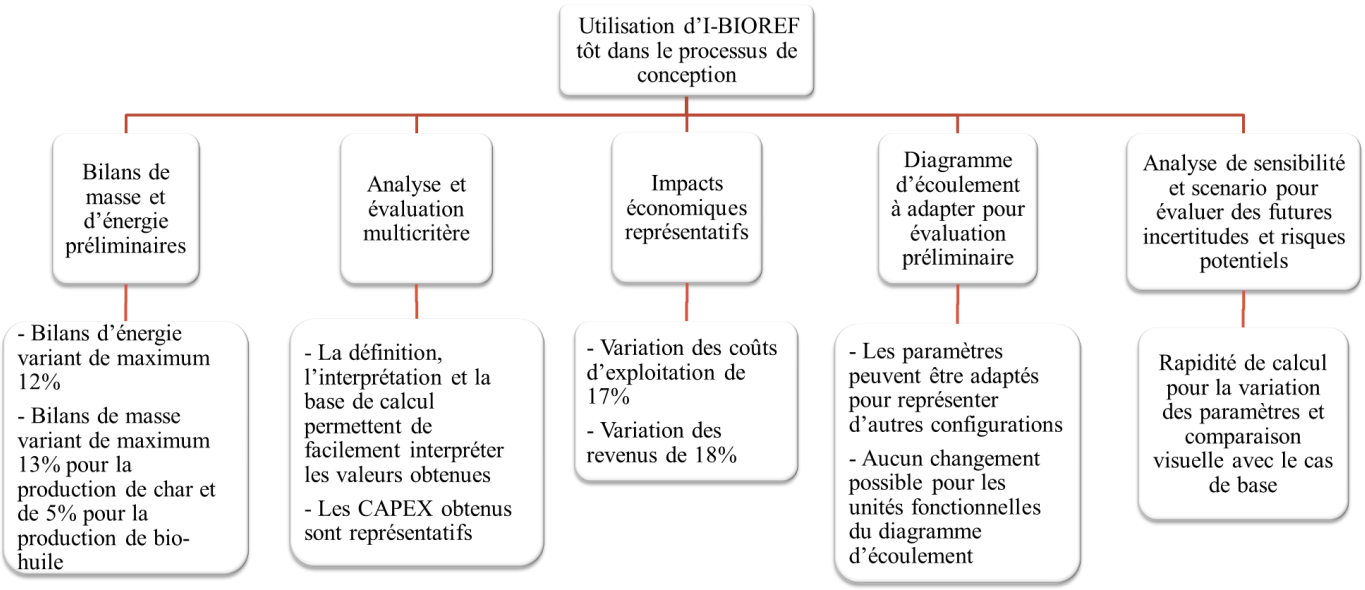

Figure 4.2 Conclusions quant à l'utilisation d'I-BIOREF pour les études de cas

Cinq différents aspects ont été évalués dans le cadre de cette recherche. Tout d'abord, le diagramme d'écoulement spécifique aux configurations ne présente pas de possibilité de changement au niveau des unités fonctionnelles. Cependant, les paramètres spécifiques au procédé peuvent être adaptés pour représenter d'autres configurations et obtenir des bilans de masse et d'énergie préliminaires qui se retrouvent dans les bonnes marges d'incertitudes. De plus, les impacts économiques ont démontré des variations, surtout dues à la recirculation partielle et non complète du biocharbon et au rendement fixe présent pour la configuration de la technologie. Le fait d'avoir un rendement fixe ne permet pas de représenter totalement les configurations, mais les données restent dans les marges présentées dans la Figure 4.1. L'analyse multicritère effectuée à l'aide d'I-BIOREF a permis la distinction entre deux voies technologiques différentes, tout en quantifiant les indicateurs de performance reliés aux critères. La définition et l'interprétation des critères permettent facilement de se positionner quant à la valeur obtenue. Finalement, la réalisation de l'analyse de sensibilité s'est avérée aisée et pertinente pour l'utilisateur. Le fait de changer des multiples paramètres et de refaire la simulation, tout en gardant en vue les résultats du cas de base a permis, pas juste d'accélérer la réalisation des analyses, mais aussi l'obtention des conclusions quant à la sensibilité de la viabilité économique des procédés.

4.2 Enjeux et améliorations possibles pour l'outil d'aide à la décision

À la suite des études de cas réalisées, plusieurs enjeux de l'outil d'aide à la décision I-BIOREF sont ressortis. Tout d'abord, il y a des défis présents quant à la mise à jour des bases de données reliées aux produits compétitifs. En avançant dans le futur, il y aura de plus en plus de produits compétitifs existants d'où le besoin de constamment effectuer des mises à jour en termes d'intensité GES et d'intensité énergétique. C'est pour cela que l'accès à une base de données est nécessaire. Cet enjeu pourrait affecter les calculs des différents critères. Il y a ensuite, l'inaccessibilité à une pondération des critères directement dans le logiciel, en fonction des différents utilisateurs ou des parties prenantes impliquées dans le processus de triage. Cet élément pourrait permettre aux utilisateurs d'I-BIOREF de choisir le critère le plus important et d'analyser les options en fonction de la pondération. Une mise en place d'un panel ADMC virtuel est prévue pour le logiciel, ce qui pourrait permettre à chacun des membres de fixer ses préférences, afin de pouvoir extraire toutes les données et de les analyser.

De plus, comme il a été vu au travers du présent mémoire, le fait d'adapter le diagramme d'écoulement d'une configuration spécifique à d'autres configurations de la même voie technologique peut conduire à des différences dans les résultats finaux. Cela étant dit, cette étape ne devrait être réalisée que dans les étapes de préfaisabilité ou faisabilité, où des bilans de masse globaux sont nécessaires. Son utilisation pour les autres étapes pourrait engendrer des erreurs de calculs et de rendements si les équipements spécifiques aux procédés ne s'y retrouvent pas directement. Vu l'architecture flexible du logiciel, des nouvelles technologies et configurations pourraient être ajoutées facilement. Il serait ainsi possible de choisir le type de configuration à représenter et la recirculation ou non de certains éléments. Ceci pourrait permettre de rendre la simulation plus précise, quant à la représentation de certains procédés et configurations existantes. Cependant, pour la mise en place de ce type d'options, il faut avoir accès à une base de données réaliste et à des projets mis en œuvre à grande échelle, afin de fournir à l'utilisateur des données fiables.

Finalement, les risques et les incertitudes ont été mis de l'avant dans le mémoire. En effet, leur prise en compte lors d'un processus de triage est primordiale. Tout d'abord, il y a le NMT, qui est un facteur très important pour la comparaison des différentes stratégies de bioraffinage. Sa considération dans le logiciel pourrait permettre à l'utilisateur d'analyser les résultats d'une

manière plus informée, tout en étant à jour avec l'avancement du niveau de maturité de la technologie. Pour la deuxième étude de cas, il a fallu constamment tenir compte du NMT lors de l'analyse des résultats fournis. Sa présence dans le logiciel aurait pu encore plus faciliter l'analyse et rendre plus systématique le triage entre les deux procédés. Différents autres risques sont pris en compte dans I-BIOREF, soit les risques techniques, financiers et politiques. Cependant il reste que les risques reliés à la mise à l'échelle du procédé pour un niveau commercial ou l'intégration à une scierie tout en respectant le calendrier ou le temps de construction ne sont pas spécifiquement pris en compte. L'utilisateur pourrait être informé des différents enjeux et risques en lien avec la mise en œuvre de son projet de manière qualitative, en ayant accès à des données de projets semblables réussis.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le projet de recherche a été réalisé dans le contexte de la décarbonisation du secteur industriel, incluant celui des transports, afin de se rapprocher d'une carboneutralité. Pour y arriver, la mise en œuvre de procédés de bioraffinage est un des moyens les plus prometteurs, notamment les procédés permettant de produire de biocarburants. Étant donné la présence de multiplies risques et incertitudes, les compagnies et les diverses parties prenantes ont besoin d'un système de prise de décision et plus précisément, d'un outil d'aide à la décision, afin de rendre le processus de triage plus systématique, tout en accélérant certaines parties, qui peuvent être exigeantes. L'objectif était donc de choisir un des outils d'aide à la décision les plus avancés dans le contexte de la bioéconomie et du bioraffinage, pour l'utiliser dans des études de cas. De cette manière, à la suite des études de cas réalisées avec I-BIOREF, une analyse systématique et critique du processus de triage des voies technologiques de bioraffinage a été réalisée afin d'identifier s'il peut accélérer et éclairer la prise de décision finale.

Les travaux ont mené à la concrétisation de deux études de cas spécifiques pour évaluer différents aspects de l'utilisation du logiciel. La première étude de cas s'est basée sur des configurations d'une même voie technologique de bioraffinage, dans le but de conclure si le diagramme d'écoulement dans I-BIOREF peut être adapté pour d'autres configurations du même procédé, tout en calculant des coûts d'investissement et d'opérations fiables et précis. Une première analyse technico-économique a été réalisée sans l'utilisation du logiciel, dans le but de pouvoir comparer les résultats à l'analyse qui a été effectuée avec I-BIOREF. Il a été démontré que, malgré le fait que les configurations n'ont pas été représentées complètement, les variations pour les bilans de masse ont été de 5% et de 17% pour les bilans d'énergie, ce qui est représentatif des marges d'erreur pour une conception préliminaire. De plus, les coûts d'investissement calculés par I-BIOREF ont été similaires à ceux de l'analyse indépendante, ce qui prouve que le logiciel exécute des calculs fiables et précis. Les coûts d'exploitations ont eu des variations de 18%, étant donné que pour une intégration du procédé à une scierie, le logiciel effectue des calculs plus détaillés. Encore une fois, la marge d'incertitudes est respectée.

La deuxième étude de cas a été basée sur l'utilisation des critères multidisciplinaires disponibles dans I-BIOREF. Deux voies technologiques différentes ont été utilisées pour la comparaison avec une analyse multicritère. À la suite d'un raffinement et triage des critères disponibles, il a été

possible d'en choisir cinq faisant partie de trois catégories différentes, soit la performance économique, environnementale et les critères socio-économiques. Le procédé de gazéification et HTL ayant été choisis, il a fallu tenir compte constamment du NMT, étant donné que la gazéification est un procédé plus avancé en termes de maturité technologique que le HTL. La définition, interprétation et la base de calcul qui accompagne chaque critère a permis de facilement quantifier les résultats obtenus. De plus, en réalisant une analyse de sensibilité, il a été possible de mettre en avant l'importance d'un environnement réglementaire avec un support pour le coût capital et des taux incitatifs pour le prix de vente des biocarburants. La variation du CAPEX a aussi été analysée et il a été conclu que malgré le fait que le procédé de HTL s'est distingué du procédé de gazéification par sa performance environnementale et économique, dû à son NMT, il est plus probable d'avoir un grand CAPEX lors de la mise à l'échelle et de la mise en œuvre. À la suite de ces deux études de cas, il a donc été possible de confirmer les hypothèses de recherche et les objectifs.

5.1 Contribution au corps de connaissances et recommandations

Les résultats obtenus à la suite de la réalisation des deux études de cas ont permis de contribuer au corps de connaissances en utilisant un outil d'aide à la décision choisi à la suite d'une analyse critique de ceux existants actuellement. L'outil I-BIOREF, crée par CanmetÉNERGIE à Ressources naturelles Canada, a été choisi pour tester analyser sa convivialité pour les besoins des spécialistes en bioraffinage et de ses utilisateurs. Les travaux ont permis d'identifier plusieurs aspects liés à son utilisation dans le processus de triage de voies technologie de bioraffinage :

- Les simulations exécutées ont permis d'obtenir des résultats suffisamment précis et fiables pour des évaluations de configurations de la même technologie, à des étapes préliminaires de la conception. Les marges de ± 30% pour l'estimation des coûts d'investissement et les revenus, est de ± 20% pour les coûts d'exploitation ont été respectées;
- Le diagramme d'écoulement, présent pour les différentes voies technologiques, peut être adapté pour d'autres configurations que celles présentes, tout en obtenant des bilans de masses et d'énergie dont les variations respectent la marge de ± 20%. Des limitations peuvent être présentes quant à certains courants de recirculations ou la représentation des produits à valeur ajoutés, mais les produits principaux des procédés sont représentés.

- L’ample choix de critères multidisciplinaires permet à l’utilisateur de prendre en compte les aspects les plus importants pour une évaluation d’une voie technologique de bioraffinage. Leurs définition, interprétation et base de calcul permettent de facilement quantifier la valeur calculée.
- L’analyse de sensibilité et de scénario permettent de prendre en compte les incertitudes futures et d’analyses l’impact sur la viabilité économique du procédé, tout en accélérant la réalisation de ces analyses et la comparaison avec le cas de base.
- Basé sur les études de cas et l’expérience acquise avec l’utilisation du logiciel, il n’est pas souhaitable pour un utilisateur non expérimenté avec les procédés de bioraffinage de l’utiliser, sans avoir effectué des recherches dans la littérature sur le procédé à évaluer. Des conclusions erronées pourraient être émises quant aux différents critères qui s’y retrouvent. Adapter un diagramme d’écoulement à d’autres configurations nécessite un niveau de connaissances quant aux procédés et aux différentes incertitudes à prendre en compte, tel que le niveau de maturité, le type de réacteur, les rendements ou les produits.
- L’ordre de grandeur fourni par I-BIOREF est approprié, mais pour des précisions de coûts en bas de 15%, l’exécution des fonds de roulement à la main est nécessaire, étant donné que les détails de calculs et la programmation derrière le logiciel ne sont pas disponibles pour évaluation.

RÉFÉRENCES

[1] Gouvernement du Canada et Environnement et Ressources naturelles. (2022) La carboneutralité d'ici 2050. [En ligne]. Disponible: https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/carboneutralite-2050.html

[2] V. Aristizábal-Marulanda et C. A. Cardona Alzate, "Methods for designing and assessing biorefineries: Review," vol. 13, nº. 3, p. 789-808, 2018, 789.

[3] F. Müller-Langer, S. Majer et S. O'Keeffe, "Benchmarking biofuels—a comparison of technical, economic and environmental indicators," vol. 4, nº. 1, 2014.

[4] A. Bridgewater, "Biomass fast pyrolysis," vol. 8, nº. 2, p. 21-50, 2004, 21.

[5] T. Bridgwater, "Challenges and Opportunities in Fast Pyrolysis of Biomass: Part I," vol. 62, nº. 1, p. 118-130, 2018, 118.

[6] J. P. Diebold, Bridgewater, A.V., "Overview of Fast Pyrolysis of Biomass for the Production of Liquid Fuels," vol. 1, p. 5-23, 1997.

[7] J. G. Rogers et J. G. Brammer, "Estimation of the production cost of fast pyrolysis bio-oil," vol. 36, p. 208-217, 2012, 208.

[8] A. Sherrad. (2019) Pyrocell selects TechnipFMC and BTG-BTL to build Swedish bio-oil plant. [En ligne]. Disponible: https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/pyrocell-selects-technipfmc-and-btg-btl-to-build-swedish-bio-oil-production-plant

[9] Ensyn. (2015) Port-Cartier, Quebec - Biocrude Expansion [En ligne]. Disponible: http://www.ensyn.com/quebec.html

[10] Bio-TechFar. (2016) Bio-TechFar. [En ligne]. Disponible: https://www.bio-techfar.com/

[11] Bioeconomy Institute et Iowa State University of Science and Technology. (2021) Iowa State University, BEI Partner in RAPID Institute. [En ligne]. Disponible: https://www.biorenew.iastate.edu/research/rapid

[12] I. S. U. o. S. a. T. Bioeconomy Institute. (2021) Fast Pyrolysis Pilot Plants. [En ligne]. Disponible: https://www.biorenew.iastate.edu/research/thermochemical/fastpyrolysis

[13] Y. Jafri *et al.*, "Multi-aspect evaluation of integrated forest-based biofuel production pathways: Part 2. economics, GHG emissions, technology maturity and production potentials," vol. 172, p. 1312-1328, 2019, 1312.

[14] A. Brown *et al.*, "The Role of Renewable Transport Fuels in Decarbonizing Road Transport: Production Technologies and Costs," 2020.

[15] A. V. Bridgwater, D. Meier et D. Radlein, "An overview of fast pyrolysis of biomass," vol. 30, nº. 12, p. 1479-1493, 1999, 1479.

[16] M. Ringer, V. Putsche et J. Scahill, "Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis," Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2006.

[17] B. M. Wagenaar *et al.*, "Rotating Cone Bio-Oil Production and Applications," dans *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, 2001, p. 1268-1280.

[18] B. M. Wagenaar *et al.*, "The Rotating Cone Flash Pyrolysis Reactor," *Bridgwater A.V. (eds) Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, p. 1122-1133, 1993.

[19] V. Lago, "Application of Mechanically Fluidized Reactors to Lignin Pyrolysis," Chemical and Biochemical Engineering, The University of Western Ontario, Electronic Thesis and Dissertation Repository.2779, 2015.

[20] D. Barry *et al.*, "Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge," vol. 122, p. 472-480, 2019.

[21] D. Mohan, C. U. Pittman et P. H. Steele, "Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review," vol. 20, n°. 3, p. 848-889, 2006, 848.

[22] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," vol. 38, p. 68-94, 2012.

[23] N. Puy *et al.*, "Valorisation of forestry waste by pyrolysis in an auger reactor," vol. 31, n°. 6, p. 1339-49, Jun 2011. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21333517

[24] D. Beneroso *et al.*, "Microwave pyrolysis of biomass for bio-oil production: Scalable processing concepts," vol. 316, p. 481-498, 2017, 481.

[25] Bartoli *et al.*, "An Overview of Temperature Issues in Microwave-Assisted Pyrolysis," vol. 7, n°. 10, 2019, 658.

[26] Y.-F. Huang, P.-T. Chiueh et S.-L. Lo, "A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass," vol. 26, n°. 3, p. 103-109, 2016, 103.

[27] V. S. Sikarwar *et al.*, "Progress in biofuel production from gasification," vol. 61, p. 189-248, 2017, 189.

[28] H. A. Choudhury, S. Chakma et V. S. Moholkar, "Biomass Gasification Integrated Fischer-Tropsch Synthesis," dans *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass*, 2015, p. 383-435.

[29] R. M. Swanson *et al.*, "Techno-economic analysis of biomass-to-liquids production based on gasification," 00162361, 2010.

[30] A. D. Korberg *et al.*, "The role of biomass gasification in low-carbon energy and transport systems," vol. 1, 2021, 100006.

[31] M. Wang *et al.*, "Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective," vol. 74, p. 31-49, 2019, 31.

[32] M. Shahabuddin *et al.*, "A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes," vol. 312, p. 123596, Sep 2020. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32507633

[33] H. Shahbeig *et al.*, "Exergy sustainability analysis of biomass gasification: a critical review," vol. 9, n°. 1, p. 1592-1607, 2022, 1592.

[34] C. D. Venkatachalam, S. R. Ravichandran et M. Sengottian, "Valorization of Biomass Into Value-Added Products and Its Application Through Hydrothermal Liquefaction," dans *Handbook of Biomass Valorization for Industrial Applications*, 2022, p. 395-415.

[35] R. Singh *et al.*, "Hydrothermal Liquefaction of Biomass," dans *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass*, 2015, p. 269-291.

[36] T. H. Pedersen *et al.*, "Renewable hydrocarbon fuels from hydrothermal liquefaction: A techno-economic analysis," vol. 12, nº. 2, p. 213-223, 2018, 213.

[37] L. Grande *et al.*, "Hydrothermal Liquefaction of Biomass as One of the Most Promising Alternatives for the Synthesis of Advanced Liquid Biofuels: A Review," vol. 14, nº. 18, Sep 14 2021. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34576508

[38] H. Chen, G. Luo et S. Zhang, "Hydrothermal Liquefaction of Lignocellulosic Biomass for Bioenergy Production," dans *Sustainable Resource Management, Volume I*, vol. 1st, Wiley, Édit., 2021, p. 83-107.

[39] C. U. Jensen *et al.*, "Hydrofaction™ of forestry residues to drop-in renewable transportation fuels," dans *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*, 2018, p. 319-345.

[40] R. F. Beims *et al.*, "Hydrothermal liquefaction of biomass to fuels and value-added chemicals: Products applications and challenges to develop large-scale operations," vol. 135, 2020, 105510.

[41] C. Abbati de Assis *et al.*, "Risk management consideration in the bioeconomy," vol. 11, nº. 3, p. 549-566, 2017, 549.

[42] M. A. Quintero-Bermudez *et al.*, "Early design-stage biorefinery process selection," vol. 11, nº. 11, p. 9-16, 2012, 9.

[43] J. Oehmen et W. Seering, "Risk-Driven Design processes: Balancing Effiency with Resilience in Product Design," dans *The Future of Design Methodology*, H. Birkhofer, Édit. London: Springer, 2011, p. 181-197.

[44] A. Kuckertz, E. S. C. Berger et L. Brändle, "Entrepreneurship and the sustainable bioeconomy transformation," vol. 37, p. 332-344, 2020, 332.

[45] F. Clerc, V. Chambost et P. Stuart, "Lessons learned: Designing the forest biorefinery," vol. 14, nº. 9, p. 609-616, 2015, 609.

[46] C. C. Diffo Téguia, Virginie; Sanaei, Shabnam; D'Amours, Sophie ; Stuart, Paul "Strategic Transformation of the Forest Industry Value Chain," dans *Forest Value Chain Optimization and Sustainability* S. O. D'Amour, Moustapha; Audy, Jeanf-François; Feng, Yan, Édit., 2016, p. 34-74

[47] G. A. Buchner *et al.*, "Techno-economic Assessment Framework for the Chemical Industry-Based on Technology Readiness Levels," vol. 57, p. 8502-8517, 2018.

[48] É. Trottier, C. Myers et P. Stuart, "Comparing Biorefinery Processes at the Early Design Stage Using Large Block Analysis ", 2021.

[49] E. HytÖNen et P. R. Stuart, "Early-stage design methodology for biorefinery capital appropriation," vol. 11, n°. 4, p. 9-23, 2012, 9.

[50] H. Karunathilake *et al.*, "Decision making for risk management: A multi-criteria perspective," dans *Advanced Methods of Risk Assessment and Management*, 2020, p. 239-287.

[51] S. Sanaei, V. Chambost et P. R. Stuart, "Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: sustainability assessment using multi-criteria decision-making (MCDM)," *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr*, vol. 12, p. S73-S86, Aug 2018, S73. [En ligne]. Disponible: <Go to ISI>://WOS:000443223800007

[52] S. Madden, K. Alles et Y. Demirel, "Measuring sustainability of renewable diesel production using a multi-criteria decision matrix," vol. 15, n°. 6, p. 1621-1637, 2021, 1621.

[53] L. A. González-Cruz *et al.*, "Optimal ecodesign selection for biodiesel production in biorefineries through multicriteria decision making," vol. 23, n°. 8, p. 2337-2356, 2021, 2337.

[54] R. Lin *et al.*, "Sustainability prioritization framework of biorefinery: A novel multi-criteria decision-making model under uncertainty based on an improved interval goal programming method," vol. 251, 2020, 119729.

[55] B. Cohen *et al.*, "Multi-criteria decision analysis in policy-making for climate mitigation and development," vol. 11, n°. 3, p. 212-222, 2018, 212.

[56] D. U. Pascoli *et al.*, "The US bioeconomy at the intersection of technology, policy, and education," vol. 16, n°. 1, p. 9-26, 2021, 9.

[57] V. Chambost, M. Janssen et P. R. Stuart, "Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: investment decisions for sustainable biorefinery business models," vol. 12, p. S9-S20, 2018, S9.

[58] E. Vassoney *et al.*, "Comparing Multi-Criteria Decision-Making Methods for the Assessment of Flow Release Scenarios From Small Hydropower Plants in the Alpine Area," vol. 9, 2021-April-16 2021. [En ligne]. Disponible: https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2021.635100

[59] C. D. Téguia, V. Chambost et P. R. Stuart, "Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: market competitive analysis for business model development," vol. 12, p. S35-S45, 2018, S35.

[60] S. Ahmad *et al.*, "A stakeholders' participatory approach to multi-criteria assessment of sustainable aviation fuels production pathways," vol. 238, 2021, 108156.

[61] D. J. Power, *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*. Faculty Book Library: Faculty of Northern Iowa, 2002.

[62] U. R. F. Averweg, *Decision-making support systems: Theory & practice*: Ventus Publishing ApS, 2012.

[63] M. Benali *et al.*, "Decision support systems for assessment of biorefinery transformation strategies," vol. 96, n°. 10, p. 2155-2175, 2018, 2155.

[64] J. Mustajoki et M. Marttunen, "Comparison of Multi-Criteria Decision Analytical Software," Finnish Environment Institute, 2013.

[65] V. De Buck *et al.*, "Assessing the Local Biowaste Potential of Rural and Developed Areas Using GIS-Data and Clustering Techniques: Towards a Decision Support Tool," vol. 4, 2022.

[66] Y. Cortes-Peña *et al.*, "BioSTEAM: A Fast and Flexible Platform for the Design, Simulation, and Techno-Economic Analysis of Biorefineries under Uncertainty," vol. 8, nº. 8, p. 3302-3310, 2020, 3302.

[67] R. Shi et J. S. Guest, "BioSTEAM-LCA: An Integrated Modeling Framework for Agile Life Cycle Assessment of Biorefineries under Uncertainty," vol. 8, nº. 51, p. 18903-18914, 2020, 18903.

[68] A. Korosuo *et al.*, "An integrated MCDA software application for forest planning: a case study in southwestern Sweden," vol. 3, p. 75-86, 2011.

[69] C. Giupponi, "Decision Support Systems for implementing the European Water Framework Directive: The MULINO approach," vol. 22, nº. 2, p. 248-258, 2007, 248.

[70] A. Butzhammer *et al.*, "Concept for SaMBA Tool for finding policies & estimating impacts in terms of mobility behavior change," 2021.

[71] J. Schmitt et D. Lahnsteiner, "Guideline for implementing the SaMBA Tool," 2021.

[72] M. Benali. (2015) I-BIOREF Software – Modeling and Analysis for Technical, Economic, and Environmental Assessment of Biorefinery Processes. [En ligne]. Disponible: https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/publications/energy-publications/publications/i-bioref-software-modeling-and-analysis-technical-economic-and-environmental-assessment-biorefinery/17887

[73] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus et R. E. West, *Plant design and economics for chemical engineers*, 5th ed. /e éd. New York: McGraw-Hill, 2003.

[74] A. Bridgwater, "Fast pyrolysis processes for biomass," vol. 4, nº. 1, p. 1-73, 2000, 1.

[75] H. Ben *et al.*, "A Comprehensive Characterization of Pyrolysis Oil from Softwood Barks," vol. 11, nº. 9, Aug 23 2019. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31450759

[76] E. HytÖNen et P. R. Stuart, "Technoeconomic Assessment and Risk Analysis of Biorefinery Processes," dans *Integrated Biorefineries*, vol. 1st Edition: CRC Press, 2012, p. 82-115.

[77] Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ). (2022) Guide de pratique professionnelle. [En ligne]. Disponible: http://gpp.oiq.qc.ca/Start.htm#t=Conception.htm

ANNEXE A ARTICLE 1 : COMPARATIVE ANALYSIS AND BENCHMARKING OF COMMERCIAL AND EMERGING FAST PYROLYSIS TECHNOLOGIES

Soumis dans TAPPI Journal le 22 août 2022

Georgiana Bele[1], Marzouk Benali[2] and Paul Stuart[1]

1. Polytechnique-Montréal, 2900 Boulevard Edouard-Montpetit, Montréal, QC H3T 1J4
2. Natural Resources Canada, CanmetENERGY, Varennes, Québec, Canada

ABSTRACT

It is well established that producing sustainable fuels and replacing the fossil-based ones is one of the key solutions to achieving the net-zero emissions goals. One of the most advanced commercial-scale pathways to biofuels available today is fast pyrolysis. However due to the need for a supportive regulatory environment and mitigation strategies of uncertainties related to costs and feedstock quality, fast pyrolysis is not yet being widely-implemented. In this case study, three fast pyrolysis technologies with TRLs of 6 and above have been compared to distinguish between them and identify the conditions under which they are economically viable. The circulating fluidized bed (CFB), rotating cone (RC), and mechanically assisted fluidized bed (MFB) fast pyrolysis technologies were considered. First, the flow diagram and a mass and energy balance comparison were addressed. It was revealed that the RC configuration has better bio-oil yields because it can handle smaller particles. The MFB configuration has a progressive condensation unit at the end of the process, which produces a nearly dry oil having a higher energy content. Four implementation scenarios were studied. The first was the fast pyrolysis stand-alone process, where all options had marginal economic attractiveness, and the RC configuration economically outperformed the other two. Integration of a fast pyrolysis plant into a sawmill in the second scenario was found to bring significant improvements in revenues and IRR. Realization of the full value of bio-oil (the third scenario) brought significantly more revenues for the MFB. Finally, the fourth scenario involved adding a progressive condensation unit, which increased the CAPEX by 3-4%, while increasing revenues by 32–35%. A sensitivity analysis highlighted the importance of financial support towards capital cost and the full valuation of bio-oil for the economic viability of fast pyrolysis

processes. Progressive condensation leading to more added-value bio-oil makes the stand-alone fast pyrolysis process more profitable.

Introduction

Today's forest products industry is decarbonizing, and increasingly, seeks to achieve net-zero GHG emissions by 2050. This will require sustainable biorefinery technology pathways deployed at large-scale within the next years. To choose the best technologies, triaging at the early design stage can be complex for many reasons, including especially that biorefinery technologies are at different levels of readiness, and that cost estimates as well as risks are difficult to assess systematically and accurately.

In recent years, most of fast pyrolysis technologies have been implemented at pre-commercial scales, with goals of implementing large-scale commercial units by 2030.For example, the Canadian company Vyterra (Ensyn) has a 100 tonne/day plant in Ontario operating for many years, and more recently has installed 2 parallel lines of the same capacity in Québec [1]. At the same time, the next generation of fast pyrolysis processes is being developed considering, for example, integrating progressive condensation of the pyrolysis vapours to intensify the pyrolysis process, and, full recovering of biochar, as well as rethinking the design that will driven by modular off-the-shelf pyrolysis system. An example of this next generation pyrolysis technology is the process being developed at Iowa State University (ISU), where a novel "auto-thermal" pyrolysis reactor includes a progressive condensation of pyrolysis vapors for the production of added-value products [2]. ISU is developing their modularized and process intensified approach at the RAPID (Rapid Advancement in Process Intensification Deployment) Institute [3].

However, fast pyrolysis has not found widespread application as quickly as expected, due mainly to marginal economics and the need for an updated, ambitious and robust regulatory environment (e.g. mandatory renewable content in fuels, capital cost support, carbon credits, incentives for biofuels, etc.). Feedstock quality and costs are also critical to the economic viability of the fast pyrolysis technologies. With volatile oil prices, uncertainties in climate policy and related instruments, and competitive access to biomass, the return on investment for fast pyrolysis is often not attractive.

On the other hand fast pyrolysis process implementation in an industrial symbiosis context, for example integrated with existing mills (e.g., sawmills, pulp mills, etc.), can potentially lower

feedstock transportation costs and/or generate higher revenues for the host site. Implementing a fast pyrolysis plant alongside an existing mill is attractive because, forest residuals (slash) and/or sawmill residues can be used as feedstock, energy integration is possible for feedstock drying, and in some cases the pyrolysis oil can be used on the host site to displace fossil and reduce GHG emissions accordingly.

In recent years, the development of fast pyrolysis technologies has resulted in diverse variants in process configuration. These variants incorporate a difference in the core of the reactor operation and/or the bio-oil production and purification method. Some of these technologies have made progress in recent years and have reached a technology readiness level (TRL) of 6 and beyond. In this work, three technologies with TRLs of 6 and beyond compared from a technical and economic perspectives. Distinguishing between different configurations of fast pyrolysis technologies, but also identifying the conditions under which the technology is economically viable, is essential to incorporate the most appropriate and sustainable pyrolysis strategy.

Literature review

Fast pyrolysis: Science and different modes of pyrolysis

To effectively distinguish between the fast pyrolysis technologies used for this case study, certain fundamentals of fast pyrolysis are reviewed.

The pyrolysis process exists since decades, however it has been developed to maximize liquids production only in the last 40 or so years. Fast pyrolysis (FP) is a thermochemical conversion process, in the near absence of oxygen, that can liquefy solid biomass into liquid bio-oil, with a high potential for energy applications as well as value-added bioproducts. Fast pyrolysis operates at a temperature of around 500°C, a short vapour residence time (typically less than 2 seconds, versus 5 seconds to hours for other modes of pyrolysis) and a short solids residence time (typically under 10 seconds).

According to Bridgewater [4], five important characteristics should be considered for the fast pyrolysis process:

1. Feed moisture of less than 10%: A higher moisture content lowers the product heating value and can lead to phase separation.

2. High heating rates and high heat-transfer rates with finely ground biomass (less than 3 mm): The small particle diameter increases biomass surface area and heat transfer rates.

3. A controlled temperature of about 500°C and a short vapour residence time of less than 2 seconds: Various methods can be used to provide the required heat to stabilize the reactor temperature [5]:

- Hot walls or hot tubes in the reactor
- Hot fluidizing gas
- Use of recycled hot sand (heated separately)
- Controlled addition of oxygen to permit in situ heat generation (so-called "auto-thermal" operation)

4. Rapid removal of the biochar produced to minimize cracking of hot vapours.

5. Rapid cooling of the pyrolysis vapours to produce bio-oil.

Typical yields for fast pyrolysis are [4, 6]:

- Liquid (bio-oil and water): 60–75 wt%;
- Biochar: 15–25 wt%;
- Non-condensable gases: 10–20 wt%.

Table 1 summarizes the main properties of crude bio-oil. There is a significant wide range of values, which is mainly due to the process configuration including the reactor as well as downstream processing.

Table 1 Properties of crude bio-oil obtained with fast pyrolysis process[7, 8]

Property	Typical value	Range
Moisture content	25%	15–35%
Density	1.2 kg/L	-
Elemental analysis	C: 57% H: 6% O: 37% N: trace Ash: trace	C: 55–60% H: 5.5–7% O: 35–40% N: 0–0.2% Ash: 0-0.2%

HHV (depends on water)	18 MJ/kg	16–19 MJ/kg
Appearance		Dark brown flowing liquid (depends on the feedstock and the mode of fast pyrolysis).
Odor		Acrid smoky smell due to presence of aldehydes and acids.
Miscibility		Single-phase mixture with 15% to 35% water. Immiscible with petroleum-derived fuels, but miscible with polar solvents.

As discussed above, these technologies have been further developed to bring them up to TRLs of 6 or beyond, such as circulating fluidized bed (CFB), bubble fluidized bed (BFB), rotating cone, vacuum, ablative vortex, mechanically assisted fluidized bed (MFB), the auger reactor, or microwave pyrolysis. Table 2 presents the key characteristics of these technologies.

Table 2 Fast pyrolysis technologies and features

Fast pyrolysis technology	Particle size (mm)	Residence time (s)	Bio-oil yield (on dry feed)	Features	References
Circulating fluidized bed (CFB)	1–2	0.5–1	60–70%	- Suitable for high throughput - Higher gas velocities - Improved heat transfer between biomass particles and bed material	[7, 9, 10]
Bubble fluidized bed (BFB)	Less than 2–3	2–3	70–75%	- Good temperature control - Easy scaling - Residence time of solid and vapours controlled by fluidizing gas flow rate	[7, 9, 10]
Rotating cone (RC)	0.2 µm–2 cm	1	50–70%	- Centrifugation used to drive hot sand and biomass - Less carrier gas requirement for the reactor	[7, 11, 12]
Vacuum	2–5 cm		30–45%	- Less biochar in the liquid product due to lower gas velocities - No requirement for carrier gas - Mechanically complicated	[7, 9, 13]
Ablative vortex	Up to 20	50–100 milliseconds	60–65%	- Processing equipment is small because there is no inert gas - Limited by heat supply to reactor	[7, 9]
Mechanically assisted fluidized bed (MFB)	4–8	0.7–1.7	40–60%	- Mechanically mixed - No fluidization gas used - Good mixing between the injected biomass and the bed material	[14,15]
Auger/screw reactor	Up to 20	5–30	30–50	- Does not require carrier gas - Lower process temperatures (400°C) - Rapid heating biomass if granular heat carriers used	[10, 16-18]

Microwave	2–6	10-25 min	20–40 (depending on temperature)	- Heating happens by the interaction of biomass with the electric element of the electromagnetic wave - Large particles can be used without the need for an energy-intensive pre-treatment to reduce particle size	[19-21]

The current trends in fast pyrolysis technologies are changing the historical process paradigm by considering value-added liquids, value-added biochar, or modularization. Some examples of current trends in fast pyrolysis are listed below:

•BTG Bioliquids and TechnipFMC completed a construction of fast pyrolysis plant in January 2022 to convert sawmill residues in Gävle (Sweden). The plant will have a production capacity of 24,000 tons of bio-oil per year with the rotating cone fast pyrolysis technology developed by BTG-BTL [22].

•In 2016, Vyterra licensed a circulating fluidized bed pyrolysis technology in Port-Cartier (Quebec, Canada) to produce 40 million L/year from 65 000 dry metric tons of cellulosic woody biomass per year [23].

•Bio-TechFar (Ontario, Canada) has more recently developed a new, mechanically fluidized reactor that has four by-products: pyrolysis oil and an aqueous fraction through progressive condensation, biochar, pyrolysis gas [24].

For this study, three fast pyrolysis technologies are reviewed and compared systematically: circulating fluidized bed (CFB), rotating cone (RC), and mechanically-assisted fluidized bed (MFB). Understanding the specific designs of these and exploring the relative conditions under which each would be economically viable are an important part of this study.

The simplified process flow diagrams of the selected fast pyrolysis technologies are provided in Figure 1, which are different from pyrolysis reactor design and configuration perspectives:

- CFB:
  - Fluidized bed using sand as a heat carrier;
  - Flue gas used to dry the biomass;
  - Two types of biochar (primary and secondary) as value-added products.

- MFB:
  - No use of sand (and no fluidizing gas);
  - Residence time controlled by the vapour production rate;
  - Purified biochar (not contaminated with sand) as a value-added product.
- RC:
  - Good flexibility with regard to incoming material, good biomass yield, and ability to process small particles;
  - Residence time fixed by rotation speed;
  - Flue gas used to produce steam.

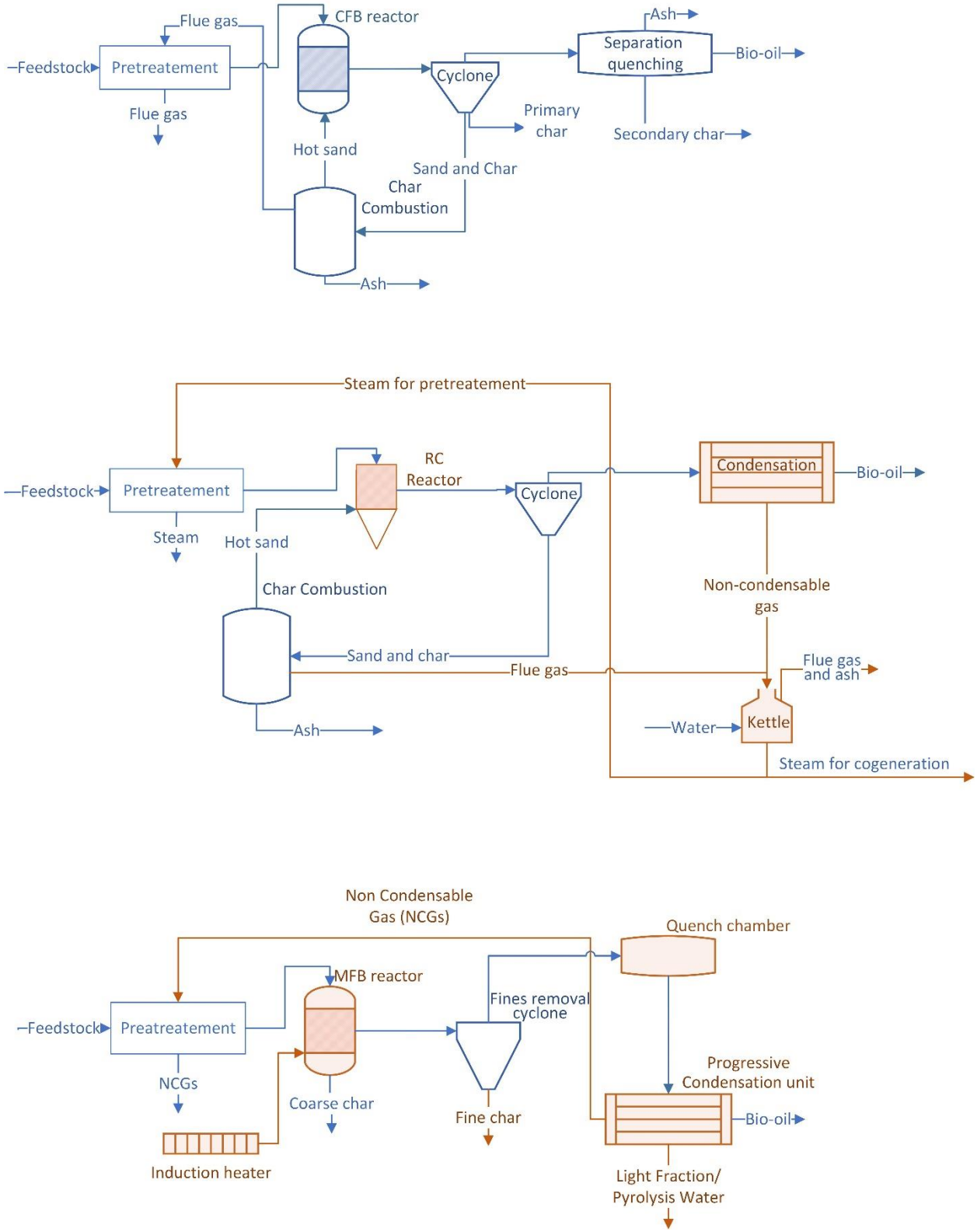

Figure 1 Flow diagram of three technology configurations. From top to bottom: circulating fluidized bed (CFB), rotating cone (RC) and mechanically assisted fluidized bed (MFB).

Implementation risks

The implementation of these configurations at commercial scale faces unique risks related to market, technology, financial, regulatory, and supply chain. Each of these risk categories requires effective mitigation strategies that should be considered in the early stages of biorefinery process design. One way to have insight into which parameters are the most critical is to perform a sensitivity analysis, and where appropriate, consider mitigation strategies that should be applied – possibly considering a phased implementation approach[25]. The lowest-risk technology option is considered as the "base case", so that variants of the base case can be considered on a risk-return basis.

Figure 2 summarizes the phased implementation approach for addressing technology and market risks in conjunction with business transformation and related risk mitigation strategies, presented by Clerc et al. [26], considering three generic phases. To ensure that a biorefinery process/technology is implemented with mitigated risk, a strategic vision based on long- and short-term goals and a diversified portfolio of value-added products must be established. The last phases should determine the first one, where the main goal is to lower operating costs while increasing revenues by developing new products. Market opportunities and partnership potential must be assessed, as well as supply chain management.

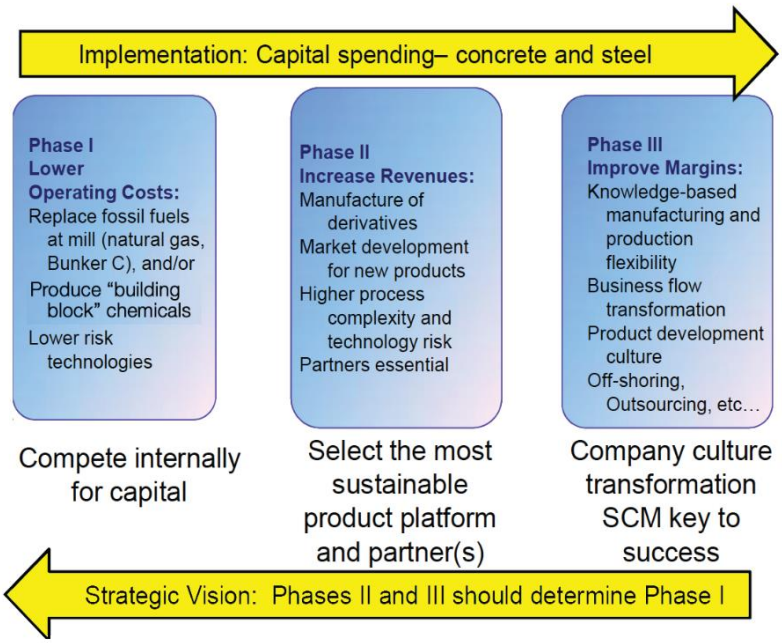

Figure 2 Phased implementation approach [26]

At the early design stage, it is essential to estimate relative capital costs, operating costs, and revenues for different process options being considered. A techno-economic framework based on the TRL and on the information available was developed by Buchner et al. [27]. It implies that different estimation methods should be used depending on the level of maturity of the technology studied, which is not an adequate mode of comparison when using different technologies. Trottier et al. [28] presents a systematic methodology for estimating relative capital and operating costs at the early design stage called large block analysis (LBA), initially introduced by Hytönen and Stuart [29]. The refined methodology of Trottier et al. can be adapted to address process risks while developing the capital and operating costs on a comparable basis. Figure 3 summarizes the LBA approach, used in this study. A key element of this methodology is that once the initial estimate basis has been obtained, it is necessary to define a cost structure by selecting the most detailed option and to estimate individual cost elements on the same basis (considering fundamental differences as well as year and capacity). Once this step has been completed, the most reliable cost is used as the basis to identify the differences between the base case and the other technologies considered.

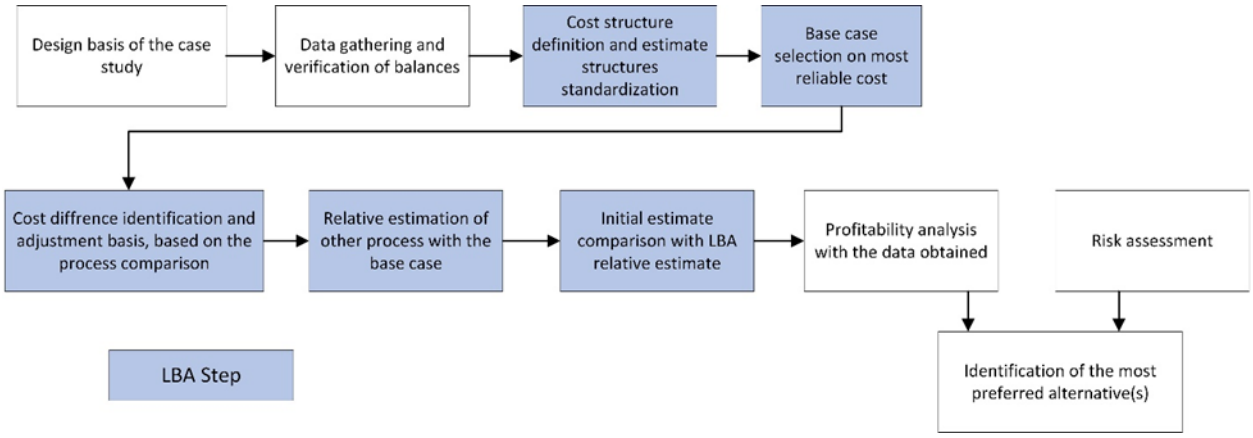

Figure 3 Adapted LBA approach [28]

With reliable estimates for capital and operating costs, it is possible to balance risk with return on investment. Birkhofer [30] developed four principles of risk-driven design. After identifying uncertainties regarding design risks, the second principle is about making risk-driven decisions. A balance between higher-risk, higher-return options and lower-risk, lower-return options needs to be established. At an early design stage, there are numerous risks regarding scale-up, yields, operating costs, future improvements in costs as the technology matures, and feedstock availability and cost [31]. Risks linked to the phased implementation, capital and operating cost estimates,

economic viability and balancing risk with return requires a systematic assessment and good engineering judgement that is consistent with scientific and engineering principals and available technical and commercial information.

For this study, the goals were (1) to determine the conditions for economic viability of three technologies: a conventional fast pyrolysis process and two emerging intensified fast pyrolysis processes leading to value-added products, considering a phased approach for risk mitigation; and (2) to elucidate the relative strengths and weaknesses of four fast pyrolysis implementation scenarios.

Materials and methods

Methodology

The methodology presented in Figure 4 summarizes the four steps used to perform the systematic comparative analysis and benchmarking of the three fast pyrolysis technologies. Once the project battery limits were defined in the first step, it was essential to define the necessary technical performance and economic attributes of the technologies. The third step is crucial because of the need to clarify the differences in technology at a macroscopic level by identifying first the expected differences between the technologies, and then assessing how to realistically reflect these in the economic estimates. The techno-economic results were confirmed using the I-BIOREF decision-making tool, developed by CanmetENERGY of Natural Resources Canada [32]. The I-BIOREF software can be used for modelling and analysis to perform technical, economical, environmental, and socio-economic assessment of implementation biorefinery processes either in existing industrial host site (e.g. pulp mills, sawmills, etc.) or on standalone basis.

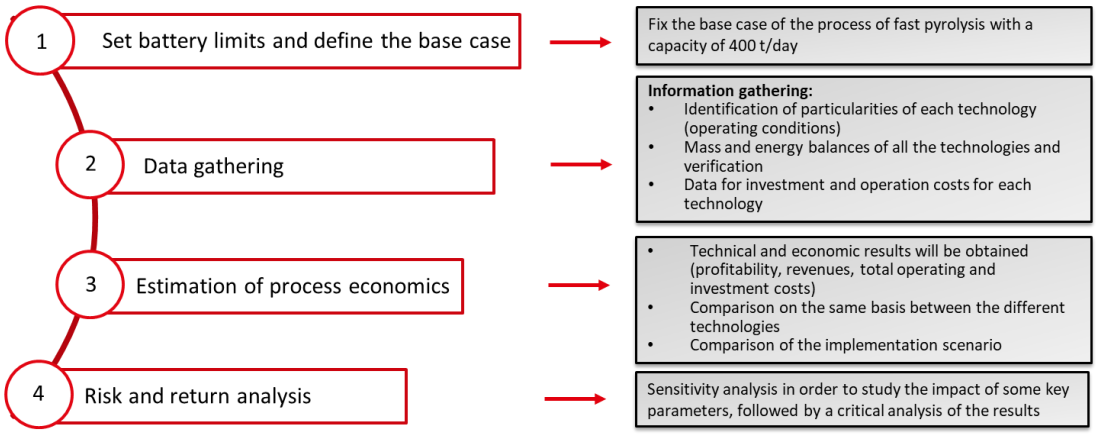

Figure 4 Methodology followed for the study case

Industrial Case Study

Table 3 summarizes the implementation scenarios considered for fast pyrolysis. The four-implementation scenarios were evaluated for each of the three chosen fast pyrolysis technologies introduced above, and were defined in order to consider the symbiotic integration of biorefinery process and the various elements of regulatory ecosystem including government support, incentives for bio-oil, or carbon credits.

The first scenario focuses on a stand-alone fast pyrolysis process. The second implementation scenario is related to an integration of fast pyrolysis within an existing sawmill to examine the opportunity of using sawmill residues as feedstock. For this second scenario, the OPEX of the sawmill was added to the operating cost associated with the fast pyrolysis plant, and the revenues included selling biochar and bio-oil, along with the lumber produced at the sawmill.

The regulatory environment is critical to economic viability for fast pyrolysis and other biofuel processes, especially with regard to incentives/carbon credits eligibility for bio-oil. For this case study, renewable identification numbers (RINs) will be considered as incentives for bio-oil in the implementation scenario #3, where the assumption of selling bio-oil in the United States of America (USA) will be made. RINs are credits linked to the Renewable Fuel Standard Program of the USA [33].

For the fourth implementation scenario, progressive condensation was added to the fast pyrolysis configurations. Such unit improves the quality of bio-oil, which contributes to a higher selling price. Dry bio-oil has a higher energy content and produces a purer, more stable, and more efficient oil. As shown in the block flow diagram in Figure 1, the MFB technology also includes a progressive condensation unit. The same unit will be added to the CFB and RC technologies to study its impact on the profitability of selling bio-oil at an upgraded price.

Table 3 Implementation scenarios and phased approach for the case study

Implementation scenario	Products	Phase 1 (0-2 years)	Phase 2 (3-25 years)	Revenue diversification
1. Fast pyrolysis stand-alone	Crude bio-oil Biochar	Fast pyrolysis (400 t/day)	-	- Bio-oil sold in Canada

				- Biochar sold as agricultural fertilizer
2. Fast pyrolysis integrated with a sawmill	Crude bio-oil Biochar Lumber	Sawmill (850 t/day)	+Fast pyrolysis (400 t/day)	- Bio-oil sold in Canada - Biochar sold as agricultural fertilizer
3. Fast pyrolysis integrated with a sawmill + full valuation of bio-oil	Crude bio-oil Biochar Lumber	Sawmill (850 t/day)	+Fast pyrolysis (400 t/day)	- Incentives for bio-oil in USA - Biochar sold as agricultural fertilizer
4. Fast pyrolysis +progressive condensation unit	Upgraded bio-oil, biochar	Fast pyrolysis (400 t/day) + installation of progressive condensation unit		- Bio-oil sold as a value-added product - Biochar sold as agricultural fertilizer

Process techno-economics

Table 4 summarizes the assumptions used in the techno-economic assessment, as well as for the operating and capital costs. Table 5 provides the product pricing.

Table 4 Case study assumptions

Parameters	Value	Justification
Assumptions for the techno-economic analysis		
Average operating time	7600 hours	First two years' operating time will be lower, after which full-time operation will be reached
Project lifetime	25 years	2 years for construction, 23 for operations
Debt	0%	All equity available
Equipment depreciation	50%/ 25%/ 25%	Nominal 3-year accelerated depreciation
Government support for capital costs	40%	Federal and provincial granting programs
Income tax rate	30%	Nominal tax rate
Capital and operating cost assumptions		
Biomass cost	70 $/bdmt	Chipped biomass delivered to mill gate

Water purchase cost	0.79 $/m3	
Electricity purchase cost	8$/MWh	Typical value from 5–15 $/MWh
Sand cost	200$/ton	Delivered price

Table 5 Product basis pricing

Product	Product substituted	Price	Justification
Pyrolysis oil	Heavy fuel sold locally	330 $/t	70 $/barrel /long-term estimate [34]
Pyrolysis oil	Heavy fuel sold in U.S.	330 $/t 2.54$/gal-RIN	Sale of biofuel on the U.S. market. Most probable D3 RINs value in 2020. [35]
Pyrolysis oil	Upgraded bio-oil (based on HFO)	1.3$/L	HFO average price in 2021 [36]. Price of upgraded oil will be adjusted for each technology by the LHV ratio of HFO and pyrolysis oil.
Biochar	Agricultural fertilizer	200 $/t	For lowest risk application as soil amendment
Carbon credits	CO_2	50 $/t $CO_{2\text{-eq}}$	Conservative carbon price [37]
Lumber	-	630 $/t	Average price on the market [38]
Steam	Steam for cogeneration	22$/klbs	Average price of producing HP steam

Table 6 indicates the assumed operating conditions. The reactor temperature and retention time were chosen as a function of the overall temperature of the fast pyrolysis process, knowing that all three reactors can operate at about this temperature. Forest residues at 50% moisture were chosen as process feedstock and dried to reach 10% moisture at the reactor inlet.

Table 6 Assumed operating conditions for the three fast pyrolysis technologies

Assumed operating condition		References & comments
Reactor temperature	500°C	[4]
Retention time	<2 seconds	[4]
Biomass feed	Forest residues	Engineering judgment
Moisture at the reactor inlet (%)	10	[39]
Moisture in the biomass (%)	50	Overall moisture of biomass
Biomass input (dry basis) (t/day)	400	Base case definition
Biomass input (wet basis) (t/day)	800	

Table 7 presents an overview of the assumed yields of the three fast pyrolysis products, which are bio-oil, biochar, and non-condensable gases (NCGs). In general, as was seen in Figure 1, the non-condensable gases is used for drying in the CFB and MFB processes and for burning RC to obtain steam for generation. The various yields are based on literature values. The RC reactor has a better bio-oil carbon content because it can handle smaller particles better than the other two types of reactors, as shown in Table 2. Furthermore, this reactor produces less biochar, which is why the carbon content is lower than in the CFB or MFB reactors.

Table 7 Assumed fast pyrolysis products properties and yields

	CFB	RC	MFB	Comments & references
Feedstock carbon content (%)	60			Typical value for forest residue [40]
Product content				
Bio-oil carbon content (%)	56	60	56	[4, 40]
Char carbon content (%)	34	20	35	[41]
Non-condensable gas carbon content (%)	12	22	12	[40]
Bio-oil carbon yield (%)	60			[40]
Char carbon yield (%)	100			Assumption made that char is composed of only carbon
NCG carbon yield (%)	15			

Results and Discussion

Technical analysis

The presentation of the case study results is segregated into two parts. First, the technical analysis with mass and energy balance are presented, followed by an economic analysis including capital and operating costs, as well as the KPIs (key performance indicators).

Table 8 shows the results for the mass balance inputs, and outputs at the reactor exit and at the process exit. The two types of outputs were differentiated because the RC and CFB configurations do not have the same outputs at the end of the process as the MFB. In RC, all the biochar going out of the reactor is assumed to be burned to produce steam in a boiler; in CFB, half the biochar will be burned to produce flue gas to dry biomass. The particularity of the MFB process is that the bio-

oil will be almost completely dry at the end of the process, due to the progressive condensation unit.

The energy balance inputs and outputs are also presented. According to these results, the MFB process has a higher energy demand, mainly because the reactor is heated by an induction heater.

Table 8 Summary of overall mass and energy balances for the three technologies

	CFB	RC	MFB	Comments
Mass balance/Inputs				
Biomass (bdt/d)	400			As presented in the assumption tables
Moisture(bdt/d)	400			
Carbon in biomass (bdt/day)	240			
Mass balance/Outputs at the reactor exit				
Pyrolysis oil (bdt/day) /Overall yield (%)	264/66	288/70	264/66	Quantity of oil obtained with the assumption made in Table 7
Moisture (%)	22			10% moisture at the reactor inlet + 12% of water produced by the reactions
Pyrolysis biochar (bdt/day)/ Yield (%)	82/20	48/12	82/20	Results obtained with the assumed yields in the preceding tables
Pyrolysis gas (bdt/day)/ Yield (%)	54/14	64/16	54/14	
Mass balance/Outputs at the exit of the fast pyrolysis unit				
Bio-oil (bdt/day) /Yield dry basis (%)	216/54	232/58	216/54	**MFB**: Pyrolysis oil will be nearly completely dry at the end of the process. **CFB and RC**: Pyrolysis oil will have 22% moisture
Pyrolysis biochar (bdt/day)	41	-	82	**CFB:** 50% of the biochar produced by the reactor goes to combustion to produce flue gas for pre-treatment

				RC: All the biochar goes to combustion to produce flue gas for the boiler MFB: All the biochar will be valued as biochar
Steam (t/day)	-	516	-	Steam produced by burning of biochar
Energy balance/Inputs				
Heat Energy (GJ/d)	-	-	(1519)	Some of the bio-oil energy will be recirculated to be used for heat energy
Biomass (GJ/d)	7053 (7600–547)	7600	7600	**CFB:** Some energy will be released because 7% of biomass is lost after pre-treatment (547 GJ), which means that the biomass entering in the reactor will bring less energy
Electrical energy (GJ/d)	913	132	308	**CFB:** Electrical energy calculated with I-BIOREF where a waste treatment unit is considered with the fast pyrolysis plant, which explains the higher need in electricity
Steam (GJ/d)	3	(19)	-	**RC:** Steam needed for the process will be provided by the boiler
Water(GJ/d)	5	15	-	
Total energy needed (GJ/d)	7974	7747	7908	
Energy balance/Outputs				
Flue gas (GJ/d)	-	482	-	
Bio-oil (GJ/d)	4120	4074	3729 (5248–1519)	**MFB:** Energy in the bio-oil will recirculate to be used for heat energy in the input
Steam (GJ/d)	-	1598 (1617–19)	-	Steam needed for the process in the inputs will be provided by the boiler
Bio-biochar (GJ/d)	800	-	1600	**MFB:** More energy is associated with the biochar than in CFB because there

				is more biochar going out of the process
Unaccounted-for losses (GJ/d)	2954	1076	1757	No specific use for the unaccounted losses
Heat rejected (GJ/d)		517	821	
Total energy out of the process (GJ/d)	7974	7747	7908	Input energy needed equals the output energy

Economic analysis

The techno-economic results were obtained using LBA methodology, presented earlier. RC technology was considered as the base case having the most reliable cost, and other technologies estimated independently based on this. In Appendix 1, Tables 14 and 15 show the detailed capital and operating cost obtained after the LBA was applied for the four implementation scenarios and the three technologies. The estimates should not be considered as absolute values, but rather values relative one to another.

To compare the profitability and economic viability of the fast pyrolysis technologies in the context of the four implementation scenarios, some key performance indicators (KPI) were chosen. They are presented in Appendix 2, Table 16.

Table 9 Economic results for Implementation scenario 1: Fast pyrolysis stand-alone

	Base line process FP-400: circulating fluidized bed (CFB)	FP-400: rotating cone (RC)	FP-400: mechanically fluidized bed (MFB)
CAPEX (M$)	182	149	178
OPEX(M$/year)	21	21	21
Revenues (M$/year)	31	39	34
IRR (%)	5	12	7
ROI (%)	2	9	4
EBITDA (M$/year)	11	18.5	14.3
EBITDA margin (%)	36	47	42
Payback period (years)	11.3	6.2	8.9

Table 9 gives the results of the first implementation scenario. The incomes presented in the table correspond to the sales of bio-oil, biochar, and steam for cogeneration for one year.

The RC technology has more bio-oil at the end of the process compared to the two other technologies and does not produce any biochar to sell, but it produces steam for cogeneration, which represents 8M$ of total revenues. This explains why this technology has the more revenues. In CFB, half the biochar is burned to produce flue gas for drying the feedstock. The other half is sold as biochar, which explains the observation that this technology has the smallest income. MFB has a slightly higher revenue than CFB, because unlike the CFB technology, all the biochar produced is sold as biochar.

The IRR for RC is greater than the other options for this implementation scenario, and it is the technology with the smallest capital investment. More revenues are associated with MFB, which mitigates the impact from` having a high CAPEX.

EBITDA is highest for RC because it has the highest revenues, which is also reflected in the EBITDA margin, and the payback period is the shortest. Even if the TRI is similar for the CFB and MFB, the EBITDA is higher for the MFB, as the revenues are larger as well.

It is important to mention that MFB offers a diversified product portfolio compared to CFB because it has three products and likely a more robust business model because of this.

Table 10 Economic results for Implementation scenario 2: Fast pyrolysis integration with a sawmill

	Base line process FP-400 circulating fluidized bed (CFB)	FP-400 rotating cone (RC)	FP-400 mechanically fluidized bed (MFB)
Lumber (t/day)	365.5		
CAPEX (M$)	182	149	178
OPEX (M$/year)	62	63	62
Revenues (M$/year)	107	112	110
IRR (%)	23	29	24
ROI (%)	21	30	23
EBITDA (M$/year)	45.3	49.5	48.6
EBITDA margin (%)	43	44	44
Payback period (years)	3.2	2.5	2.9

Results of implementation scenario 2 where fast pyrolysis is integrated into a new sawmill is presented in Table 10. In the OPEX, the costs of operations related to the sawmill have been added. They include wood purchase, wood transport, and the operations necessary for the functioning of

the sawmill. The costs of wood purchase for fast pyrolysis have been removed because, as explained in the case study presentation, the residues coming out of the sawmill will be used as input biomass for fast pyrolysis. These factors result in a higher OPEX, but the revenues are proportionally higher as well because the sale of lumber helps with the return on investment.

A significant improvement can be observed in the IRR for each technology compared to case 1. Assuming that an IRR of 20% is necessary for a project to be profitable, all technologies can be profitable when integrated within an existing sawmill.

As for the other KPIs, significant improvements are observed as well underlining the benefits of an integration. This implementation scenario is closer to profitability than the first one. The payback period is very much shorter than in the first case (3 years vs 11 years for CFB).

Table 11 Economic results for Implementation Scenario 3: Fast pyrolysis integration with a sawmill+ full valuation of bio-oil

	Base line process FP-400 circulating fluidized bed (CFB)	FP-400 rotating cone (RC)	FP-400 mechanically fluidized bed (MFB)
Lumber (t/day)	365.5		
CAPEX (M$)	185	152	181
OPEX (M$/year)	62	63	62
Product revenues (M$/year)	108	127	110
RIN revenues (M$/year)	43	44	56
IRR (%)	38	51	43
ROI (%)	44	70	53
EBITDA (M$/year)	88.8	108.5	104.7
EBITDA margin (%)	59	63	62
Payback period (years)	1.7	1.2	1.7

In the third implementation scenario, policy incentives were considered in the selling price of bio-oil, sold in the United States to obtain RIN credits. Table 11 shows the results for the RIN credits that can be obtained for each technology. The CAPEX is 3M$ higher for each technology to accommodate bio-oil transport from Canada to USA. It is important in this case to consider the energy content of the bio-oil obtained with different technologies. As previously explained, the

bio-oil extracted from the MFB technology is almost dry, and its energy content is higher, which explains the increased RIN revenues. As for the CFB and RC technologies, even if RC has more bio-oil extracted, because the moisture in the bio-oil is 22%, the energy content is lower, meaning that fewer RINs will be obtained. For CFB, the RIN revenues are 1M$ less than those of RC because of the smaller quantity of bio-oil. The larger IRR is associated with the RC technology because the CAPEX is the lowest, even if the MFB has the largest revenues. The EBITDA associated with the MFB configuration is 9M$ higher than the CFB one, which is mainly due to the larger revenue coming from the RIN credits.

Compared to Implementation scenario 2, remarkable performance improvements were achieved, largely due to the bio-oil incentives.

Table 12 Economic results for Implementation Case 4: Fast pyrolysis + Progressive condensation unit

	Base line process FP-400 circulating fluidized bed (CFB)	FP-400 rotating cone (RC)	FP-400 mechanically fluidized bed (MFB)
Upgraded bio-oil (t/d)	216 (10% moisture)	232 (10% moisture)	216 (almost dry)
CAPEX (M$)	187	155	178
OPEX (M$/year)	21	22	21
Revenues (M$/year)	51	60	67
IRR (%)	15	24	23
ROI (%)	11	22	22
EBITDA (M$/year)	29.5	37.9	46.3
EBITDA margin (%)	58	63	69
Payback period (years)	5	3.3	3.1

The fourth implementation scenario reflects the integration of a progressive condensation unit with the fast pyrolysis process providing a dried, more stable, and more efficient oil. The order-of-magnitude capital cost of the progressive condensation train has been estimated at 10M$ for CFB and RC (it is already in the base case of MFB). It has been assumed that the bio-oil is dried to under 10% moisture. As presented in Table 5, the selling price of bio-oil is based on the HFO price on

the market as in the first case, and the price of bio-oil will be based on the LHV ratio between HFO and pyrolysis oil. As the quality of the oil is improved by the progressive condensation unit (10% vs 22% moisture), the selling price will be higher for CFB and RC configuration. The selling price will be higher for the oil from MFB because the bio-oil is almost dry at the end, unlike the other two technologies. The results are presented in Table 12. As a conclusion, the revenues show great improvement compared to Implementation scenario 1, where the higher IRR was 12%. In this case, RC and MFB processes are near profitability threshold because the IRR is higher than 20% in both cases. By looking at the CFB and RC reactors, it is possible to determine that the CAPEX increased by 3-4% vs. an increase of 32–35% in revenues. The addition of the progressive condensation unit greatly improved revenues. A significant improvement can also be observed for the EBITDA and the payback period, where the longest period is related to the CFB process (5 years). In the first implementation scenario, the payback period of the same technology was 11 years.

With the presentation of these cases and their results, it was possible to analyze income diversification and how it can drive project profitability. Furthermore, it was possible to understand the importance of selling not only locally, but also outside the territory to expand the market shares. Finally, the integration of downstream processing systems such as the progressive condensation system led to noteworthy performance improvements of fast pyrolysis processes.

Sensitivity analysis

A sensitivity analysis was completed considering key parameters related to the economic viability of the technologies, under the various implementation scenarios, in order to help identify risks and their mitigation. Table 13 summarizes these parameters and the values considered for the sensitivity analysis, where the impact on Internal Rate of Return (IRR) was estimated. Figures 5.1 through 5.5 show the results for the different scenarios, noting that the scale for IRR changes between the different Figures. For each parameter two scenarios of the four presented above were chosen to be analyzed, depending on the implication of the parameter on the implementation scenario.

Table 13: Parameters studied for the sensitivity analysis

Parameter		Value	Justification
Crude bio-oil price	Minimum	0.10$/L	16$/barrel
	Base case	0.40$/L	70$/barrel – Long-term estimate [34]
	Maximum	0.80$/L	140$/barrel - Oil price rise

Assumed government support towards capital costs	Minimum	0%	Hypothesis of no government support
	Base case	40%	Assumed support from all levels of government
	Maximum	70%	Hypothesis of maximum support by government
RIN pricing	Minimum	0	Base case: most probable D3/D7 RIN value in the reference year (e.g., 2.5 CAN$/RIN gal in 2020), depending on available volumes of cellulosic biofuels and demand intensity [35]
	Base case	0.66 $/L	
	Maximum	1.32$/L	
Biomass feedstock price	Scenario 1.1	40$/t	Low cost of biomass
	Base case	70 $/t	Base case
	Scenario 1.2	100 $/t	High biomass cost found for higher volumes, more complex logistics…
Estimate of capital investment	Scenario 1.1	90%	Slight underestimation of capital costs
	Base case	100%	As described in each case and technology
	Scenario 1.2	150%	Assumption of additional costs due to potential integration of new equipment or an update.

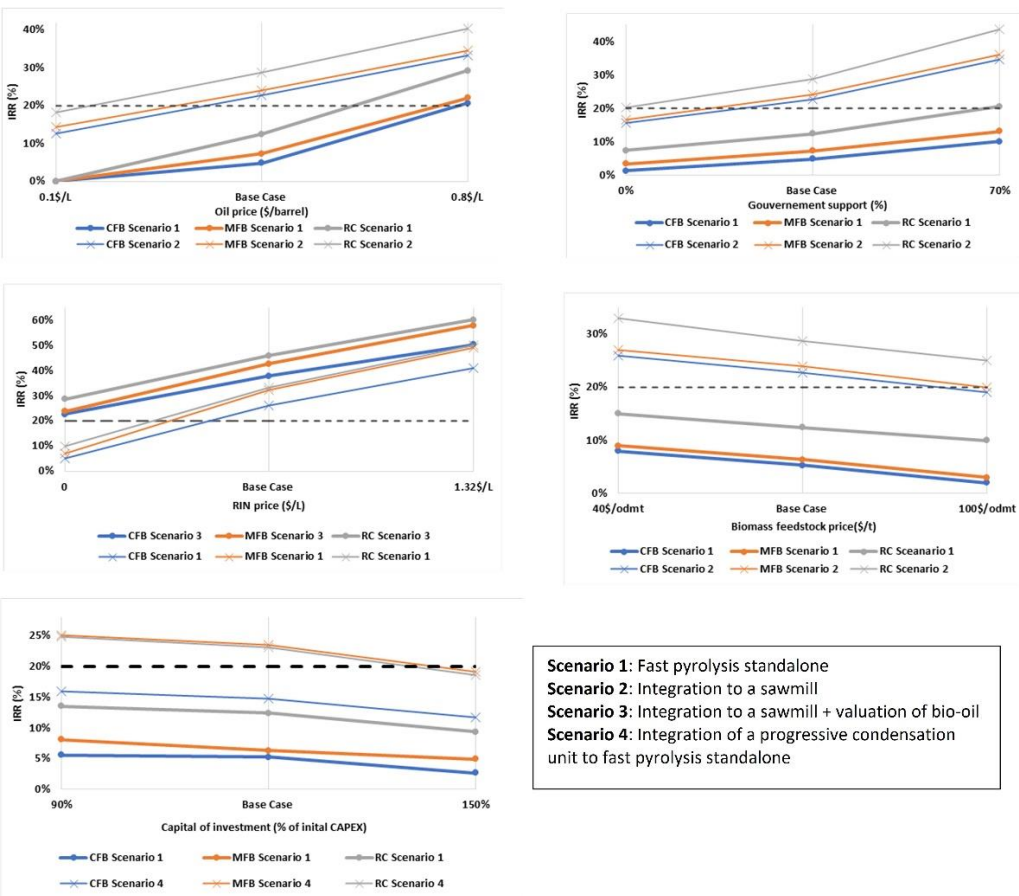

Figure 5 Sensitivity analysis results

There are three parameters that substantially improve the IRR when they are at their higher values for the sensitivity analysis: bio crude oil price, government support for capital cost, and the incentives on the bio-oil represented by the RINs value.

For Implementation scenario 1, where fast pyrolysis standalone is considered, a higher oil selling price brings the CFB and MFB technology near economic viability (assumed to be 20% IRR). On the other hand, a lower selling price brought all the technologies under the 20% target IRR, but none of the scenarios had a large negative cash flow, so the process would be robust for short-term (very) low selling prices. The profitability of the fast pyrolysis process is sensitive to the crude oil price. Implementation scenario 4, where the progressive condensation unit was integrated, shows a similar trend. Doubling the price of HFO can bring the IRR to a very attractive 44% for RC, 40% for MFB, and 33% for CFB, further emphasizing the advantage of having higher bio-oil quality at the end of the process.

Government support for capital cost is critical. In the first scenario, the RC technology was economically attractive if government support reached 70%. For the second implementation scenario, the absence of government aid has noticeable consequences on process profitability for all three technologies. On the other hand, maximum support creates an evident improvement in the three configurations IRRs.

The impact of bio-oil price incentives examined for Implementation scenario 3 has shown that having higher-value RIN credits definitely brings the profitability to a very high IRR, which even for the CFB technology is a great opportunity. However, it is crucial to understand how the variability of these parameters can either bring a process close to non-profitability or create a high revenue and a good economic viability. Besides studying this parameter for case 3, these credits were also added to Implementation scenario 1, which was the fast pyrolysis stand-alone case, to see how selling the credits to the U.S. could affect profitability. Adding the RINs to the first scenario effectively brings all three technologies to profitability. This shows that the fast pyrolysis process stand-alone case can be profitable, but only if incentives for bio-oil are there and can be used.

The last two parameters studied for the sensitivity analysis were the biomass price and government support for capital cost. Figure 5.4 shows that expensive biomass feedstock further reduces the IRR, as would be expected. The impact of increased capital investment costs also reduces the return

on investment as expected, but not to the degree found for other more capital intensive biofuel processes. History has shown that the actual capital cost for projects can be substantially higher than early-stage estimates, and it is important to consider this possibility. A 50% higher cost was considered.

Finally, one salient factor related to these results concerns policy linked to biofuels, including incentives for low-carbon fuel projects. Following recent COP26 discussions, countries and companies are increasingly making commitments to reach net zero GHG emissions by 2050. Biofuels can contribute to achieving these net-zero targets. In the U.S., while there has been investment in low-carbon fuels, however more investment is needed [42]. The Inflation Reduction Act, signed in USA, in last 16th of August, will help private companies to produce more renewable energy by using incentives to combat climate change with a total investment of 370$ billion [43].

Conclusions

In recent years, most of fast pyrolysis technologies have begun to be implemented at pre-commercial scales, but the economic viability is still a challenge due to various risks, uncertainties and the need of a supportive regulatory environment. This study has examined three fast pyrolysis technologies having different value-added products in order to determine the general conditions for economic viability. With the traditional CFB fast pyrolysis technology considered, biochar and bio-oil are produced. The RC technology produces steam for cogeneration in addition to bio-oil. Finally, the MFB technology produces biochar, pyrolysis water (which in this case has not been fully valued, but might be in the future), and lastly bio-oil which is almost dry in the process configuration considered.

Four implementation scenarios were considered with phased implementation to examine integration with a sawmill, incentives for bio-oil, and integration of a progressive condensation unit. The Large Block Analysis (LBA) methodology was used to estimate the costs, better ensuring that relative costs were estimated for comparisons. Table 14 summarizes the results, for the assumptions considered.

For implementation scenario 1 where the stand-alone fast pyrolysis technology platform was considered, all three technologies had a marginal return, under a base case scenario of 40% support for capital cost and a premium on biocrude selling price typical of what one might expect from RINs. This captures an important reason why fast pyrolysis has not yet been more widely implemented, even considering the potential GHG emission reduction benefits that could be realized.

The second implementation scenario took into account the integration of the fast pyrolysis plant to an existing sawmill. An improvement was observed for the IRR for all three technologies, where their values was higher than 20%. For the same assumptions, implementation scenario 3 where fast pyrolysis is integrated with a sawmill and there is full valuation of bio-oil results in a highly-attractive investment.

However, in the last two scenarios, when bio-oil quality was considered, MFB showed an improvement in profitability (43% for the third scenario vs 24% for the second one). The implementation scenarios demonstrated that implementing fast pyrolysis processes in a sawmill or adding incentives to bio-oil evidently improves the outcome. Specifically, the progressive

condensation unit improves economic viability for all fast pyrolysis process configurations because the quality of the bio-oil substantially increases the revenues while increasing the CAPEX by only a small amount.

Finally, with the sensitivity analysis it has been shown the importance of having a government support and incentives on the bio-oil price. These policies are essential for the project economic viability. The price of barrel also can impact the IRR as a lower price means a lower selling price of the bio-oil produced, therefore the importance of an updated and robust regulatory environment.

In conclusion, fast pyrolysis processes undoubtedly represent an opportunity for the future of bio-oil and for achieving net-zero goals.

Table 14 Summarize of the implementation scenarios studied and their most valuable results

Implementation Scenario	CFB	RC	MFB
1. Fast pyrolysis stand-alone **CAPEX(M$)/IRR (%)**	182/5	149/12	178/7
2. Fast pyrolysis integrated with a sawmill **CAPEX(M$)/IRR (%)**	182/23	149/29	178/24
3. Fast pyrolysis integrated with a sawmill + full valuation of bio-oil **CAPEX(M$)/IRR (%)**	185/38	152/51	181/43
4. Fast pyrolysis + progressive condensation unit **CAPEX(M$)/IRR (%)**	187/15	155/24	178/23

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support received from the Program on Energy Research and Development (Project OERD-CEV-19-106) and the Forest Innovation Program of the Canadian Forest Service (CFS Biorefinery Flagship Project) at Natural Resources Canada. The authors would like also to express their deepest gratitude to Nima Ghavidel Mehr and Cédric Diffo Téguia for their technical support in efficient use of I-BIOREF software.

Literature Cited

[1] A. Pattiya, "Fast pyrolysis," dans Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications, 2018, p. 3-28.

[2] I. S. U. o. S. a. T. Bioeconomy Institute. (2021) Fast Pyrolysis Pilot Plants. [En ligne]. Disponible: https://www.biorenew.iastate.edu/research/thermochemical/fastpyrolysis

[3] Bioeconomy Institute et Iowa State University of Science and Technology. (2021) Iowa State University, BEI Partner in RAPID Institute. [En ligne]. Disponible: https://www.biorenew.iastate.edu/research/rapid

[4] T. Bridgwater, "Challenges and Opportunities in Fast Pyrolysis of Biomass: Part I," vol. 62, no. 1, p. 118-130, 2018, 118.

[5] T. Bridgwater et K. Maniatis, "The Production of Biofuels by the Thermochemical Processing of Biomass," dans Molecular to Global Photosynthesis, 2004, p. 521-611.

[6] M. M. Wright et al., "Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels," Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2010.

[7] A. V. Bridgwater, D. Meier et D. Radlein, "An overview of fast pyrolysis of biomass," vol. 30, no. 12, p. 1479-1493, 1999, 1479.

[8] A. Bridgewater, "Biomass fast pyrolysis," vol. 8, no. 2, p. 21-50, 2004, 21.

[9] M. Ringer, V. Putsche et J. Scahill, "Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis," Golden CO: National Renewable Energy Laboratory, 2006.

[10] J. P. Polin et al., "Process intensification of biomass fast pyrolysis through autothermal operation of a fluidized bed reactor," vol. 249, p. 276-285, 2019, 276.

[11] B. M. Wagenaar et al., "Rotating Cone Bio-Oil Production and Applications," dans Progress in Thermochemical Biomass Conversion, 2001, p. 1268-1280.

[12] B. M. Wagenaar et al., "The Rotating Cone Flash Pyrolysis Reactor," Bridgwater A.V. (eds) Advances in Thermochemical Biomass Conversion, p. 1122-1133, 1993.

[13] C. Roy et al., "Conceptual Design and Evaluation of a Biomass Vacuum Pyrolysis Plant," dans Advances in Thermochemical Biomass Conversion, 1993, p. 1165-1186.

[14] V. Lago, "Application of Mechanically Fluidized Reactors to Lignin Pyrolysis," Chemical and Biochemical Engineering, The University of Western Ontario, Electronic Thesis and Dissertation Repository.2779, 2015.

[15] D. Barry et al., "Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge," vol. 122, p. 472-480, 2019.

[16] D. Mohan, C. U. Pittman et P. H. Steele, "Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review," vol. 20, no. 3, p. 848-889, 2006, 848.

[17] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," vol. 38, p. 68-94, 2012.

[18] N. Puy et al., "Valorisation of forestry waste by pyrolysis in an auger reactor," vol. 31, no. 6, p. 1339-49, Jun 2011. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21333517

[19] Y.-F. Huang, P.-T. Chiueh et S.-L. Lo, "A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass," vol. 26, no. 3, p. 103-109, 2016, 103.

[20] D. Beneroso et al., "Microwave pyrolysis of biomass for bio-oil production: Scalable processing concepts," vol. 316, p. 481-498, 2017, 481.

[21] E. T. Kostas, D. Beneroso et J. P. Robinson, "The application of microwave heating in bioenergy: A review on the microwave pre-treatment and upgrading technologies for biomass," vol. 77, p. 12-27, 2017, 12.

[22] A. Sherrad. (2019) Pyrocell selects TechnipFMC and BTG-BTL to build Swedish bio-oil plant. [En ligne]. Disponible: https://bioenergyinternational.com/technology-suppliers/pyrocell-selects-technipfmc-and-btg-btl-to-build-swedish-bio-oil-production-plant

[23] Ensyn. (2015) Port-Cartier, Quebec - Biocrude Expansion [En ligne]. Disponible: http://www.ensyn.com/quebec.html

[24] Bio-TechFar. (2016) Bio-TechFar. [En ligne]. Disponible: https://www.bio-techfar.com/

[25] C. Abbati de Assis et al., "Risk management consideration in the bioeconomy," vol. 11, no. 3, p. 549-566, 2017, 549.

[26] F. Clerc, V. Chambost et P. Stuart, "Lessons learned: Designing the forest biorefinery," vol. 14, no. 9, p. 609-616, 2015, 609.

[27] G. A. Buchner et al., "Techno-economic Assessment Framework for the Chemical Industry-Based on Technology Readiness Levels," vol. 57, p. 8502-8517, 2018.

[28] É. Trottier, C. Myers et P. Stuart, "Comparing Biorefinery Processes at the Early Design Stage Using Large Block Analysis ", 2021.

[29] E. HytÖNen et P. R. Stuart, "Early-stage design methodology for biorefinery capital appropriation," vol. 11, no. 4, p. 9-23, 2012, 9.

[30] J. Oehmen et W. Seering, "Risk-Driven Design processes: Balancing Effiency with Resilience in Product Design," dans The Future of Design Methodology, H. Birkhofer, Édit. London: Springer, 2011, p. 181-197.

[31] M. A. Quintero-Bermudez et al., "Early design-stage biorefinery process selection," vol. 11, no. 11, p. 9-16, 2012, 9.

[32] M. Benali. (2015) I-BIOREF Software – Modeling and Analysis for Technical, Economic, and Environmental Assessment of Biorefinery Processes. [En ligne]. Disponible: https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/publications/energy-publications/publications/i-bioref-software-modeling-and-analysis-technical-economic-and-environmental-assessment-biorefinery/17887

[33] U. S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022) Renewable Identification Numbers (RINs) under the Renewable Fuel Standard Program. [En ligne]. Disponible: https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-identification-numbers-rins-under-renewable-fuel-standard

[34] Deloitte, "Oil and gas price forecast: New realities for energy security and decarbonization," Calgary, 2022. [En ligne]. Disponible: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/energy-resources/ca-en-energy-resources-industrials-o-g-price-forecast-report-Q2-fy23-aoda.pdf

[35] EPA et United States Environnemental Protection Agency. (2022) RIN Trades and Price Information. [En ligne]. Disponible: https://www.epa.gov/fuels-registration-reporting-and-compliance-help/rin-trades-and-price-information

[36] N. R. Canada. (2022) Energy Sources. [En ligne]. Disponible: https://www2.nrcan.gc.ca/eneene/sources/pripri/prices_byyear_e.cfm?ProductID=5

[37] Canada of Government. (2022) The federal carbon pollution pricing benchmark. [En ligne]. Disponible: https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/carbon-pollution-pricing-federal-benchmark-information.html

[38] Trading Economics. (2022) Lumber. [En ligne]. Disponible: https://tradingeconomics.com/commodity/lumber

[39] A. Bridgwater, "Fast pyrolysis processes for biomass," vol. 4, no. 1, p. 1-73, 2000, 1.

[40] H. Ben et al., "A Comprehensive Characterization of Pyrolysis Oil from Softwood Barks," vol. 11, no. 9, Aug 23 2019. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31450759

[41] Bartoli et al., "An Overview of Temperature Issues in Microwave-Assisted Pyrolysis," vol. 7, no. 10, 2019, 658.

[42] E. Cools. (2021) Scaling Up 2021: ‘a clear but challenging path’ ahead for Canada’s bioeconomy. [En ligne]. Disponible: https://www.canadianbiomassmagazine.ca/scaling-up-2021-a-clear-but-challenging-path-ahead-for-canadas-bioeconomy/

[43] A. B. Wang. (2022) Biden signs sweeping bill to tackle climate change, lower health-care costs. [En ligne]. Disponible: https://www.washingtonpost.com/politics/2022/08/16/biden-inflation-reduction-act-signing/

Appendix 1

Table 15: Detailed capital Investment costs for economic analysis

Investment costs	RC	CFB	MFB	Justification
	Million $			
Direct costs				
Equipment cost				
Feedstock handling and preparation	9.9			Same pre-treatment cost for every technology
Thermal fast pyrolysis system				
Reactor and auxiliaries	48	52	40	CFB has two fluidized beds MFB only one fluidized bed which dissociates the temperature and the mixing
Vapor phase train	13	9	18	More expensive for MFB because of the progressive condensation unit
Biochar recovery system	-	10	10	Only CFB and MFB have biochar as a value-added product
Total purchased equipment	71	81	78	
Construction	Included in equipment cost			
Service facilities	14	16	16	20% of total purchased equipment cost
Piping	-	6	6	8 % of total purchased equipment cost
Electrical, control & instrumentation	4	4	4	5% of total purchased equipment cost
Total Direct Costs	89	107	104	
Indirect costs				
Engineering	13	16	16	15% of total direct costs
Construction management	11	13	12	12% of total direct costs
Owner's costs	3	3	3	3% of total direct costs
Start-up & commissioning	2	2	2	2% of total direct costs
Total Indirect Cost	28	34	33	
Fixed Capital Investment	117	142	137	
Contingency	18	21	20	15% of fixed capital investment
Working capital	14	19	19	10% of total capital investment
Total Capital Investment	149	176	208	

Table 16 Detailed operating costs for economic analysis

Operating costs	RC	CFB	MFB	Justification
	Million $			
Feedstock (biomass)	9.24			Same quantity of feedstock
Utilities				
Electricity	0.09	0.64	0.27	Higher demand in electricity for the CFB process due to the waste treatment unit
Steam	-	-	0.11	**MFB:** Steam used to heat the reactor
Water	0 .19	0.03	0.8	**MFB:** More water used to cool the reactor
Sand	0.20	0.91		
Operations				
Labour	1.28			12 operators and 1 director
Laboratory charges	0.19			15% of labour
Maintenance				
Maintenance and repairs	4.47	3.10	3.69	3% of total capital investment
Operating supplies	0.67	0.46	0.55	15% of maintenance and repairs
Other expenses				
Plant operating overhead	1.73	1.31	1.49	30% of labour, maintenance, and repairs
Sales and marketing	0.42	0.32	0.36	5% of operations, maintenance, and plant operating overhead
Admin fees	0.26			20% of labour
Insurance	0.60	0.70	0.83	0.4% of total capital investment
Taxes	1.49	1.76	2.08	1% of total capital investment
Total operating cost	20.82	20.21	21.16	

Appendix 2

Table 17 Key performance indicators (KPI) used for the techno-economic analysis

KPI	Definition	Interpretation	Equation
Profitability			
IRR	Discount rate that makes the net present value of all cash flows resulting from the biorefinery implementation equal to zero.	The higher the IRR, the more profitable the biorefinery is. As of the 2019 reference year, a typical threshold for the IRR of biorefinery projects is 20%.	IRR for which $\sum_{i=0}^{Project\ lifetime} \frac{Cash\ Flow_{Year\ i}}{(1+IRR)^i} = 0$
ROI	Return on investment (ROI) is the ratio of the net value generated by a biorefinery plant over a given period, to the corresponding capital investment.	Negative values of ROI indicate that the project has not reached profitability but might be profitable in the future. The higher the ROI, the more profitable a biorefinery project is.	$ROI_{Year\ T} = \frac{Cumulative\ cash\ flow_{Year\ T}}{Cumulative\ capital\ investment_{Year\ T}}$
Robustness			
EBITDA	The EBITDA is the operating income that a biorefinery project generates, not accounting for depreciation and amortization expenses.	The EBITDA is a measure of the biorefinery project's financial performance, expressed as a cash profit (or deficit) from its operations. The higher the EBITDA, the higher is the potential of a biorefinery project to generate net profit.	EBITDA= Revenue-Operating cost
EBITDA Margin	Ratio that shows the fraction of revenues that is available to cover non-operating expenses before depreciation and amortization are accounted for.	Indicator of how financially robust a biorefinery project is, expressed based on cash generation from its operations. Higher values of EBITDA margin are preferred.	EBITDA margin=$\frac{EBITDA}{Revenue}$
Capital efficiency			

CAPEX	The CAPEX is the total amount of capital invested to implement the biorefinery plant.	Measure of the capital intensity of a biorefinery process, considering government subsidies. Lower CAPEX generally implies a lower financing risk because annual investments by private companies are usually budget-capped and access to external sources of funding is limited.	CAPEX= Fixed Capital Investment + Total other costs
Payback period	The payback period is the time required to recover the capital invested for implementing a biorefinery plant. It is calculated using the capital investment costs, annual revenue, and operating costs of the biorefinery plant at full capacity for the annual uptime provided.	The payback period is a measure of the project's ability to rapidly balance capital investment through cash flow generation. Shorter payback periods are preferred.	Year T for which $\sum_{i=start-up\ year}^{T} Cash\ Flow_{Year\ i} = Total\ capital\ investment$

ANNEXE B ARTICLE 2 : TECHNOLOGY PATHWAYS FOR THE PRODUCTION OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE BIOFUELS: MULTI-CRITERIA ASSESSMENT.

Soumis dans Biofuels, Bioproducts and Biorefining Journal (Biofpr) le 23 août 2022

Georgiana Bele[1], Marzouk Benali[2] and Paul Stuart[1]

1. Polytechnique-Montréal, 2900 Boulevard Edouard-Montpetit, Montréal, QC H3T 1J4
2. Natural Resources Canada, CanmetENERGY, Varennes, Québec, Canada

ABSTRACT

One of the key pathways that can contribute to net-zero goals is to enhance the use of renewable and sustainable biofuels. However, uncertainties remain due to critical challenges to selecting the right sustainable biofuels technology most suitable for the longer-term. These uncertainties can be partly addressed using a multidisciplinary perspective for scenarios and multi-criteria decision-making analysis. Multi-criteria decision support tools (DSTs) are a powerful means to conduct the comparison of technology pathways at different technology readiness levels (TRLs). For this case study, a multidimensional DST was used to compare two technology pathways: (1) gasification combined with Fischer-Tropsch and (2) hydrothermal liquefaction (HTL) for the production of biofuels. The metrics available in the DST were examined, and five metrics related to evaluating profitability, robustness and capital efficiency as well as socio-economic performance have been selected. HTL was found to have a higher yield for renewable gasoline and diesel and largely due to higher economic performance and reduced environmental footprint as compared to the integrated gasification Fischer-Tropsch process. However, the TRL of 8-9 of biomass gasification was higher than that of HTL, which is still at 5-6, reflecting that the gasification process is essentially proven at pre-commercial scale. Based on sensitivity and scenario analyses, the importance of government support for capital cost, and of biofuel price incentives, were identified as critical. From this comparison, HTL emerges as an attractive process for the future because of its outperformance from technical and environmental perspectives, but still further demonstration efforts are needed at commercial scale.

Introduction

An important contributor in support of significant reduction of GHG emissions by 2030 and 2050 goals will be the production of renewable and sustainable biofuels. However, there remains significant risks and large-scale deployment challenges related to factors such as adequate biomass feedstock at large scale, the scaling-up of the technologies, and issues of project risk especially considering the investment costs needed for large capacity biofuel processes. At the same time various government policies including support for capital cost, incentives on biofuels or carbon credits are being implemented by countries around the world to encourage the production of second-generation biofuels, and develop a regulatory environment that supports this industry for the long term. More importantly, the legislation instruments and frameworks are not yet harmonized. In this context, it is important to address technology uncertainties using a multidisciplinary decision-making perspective, and establish assessment criteria (economic, socio-economic, environmental, and risk-related) that represent the visions and the needs of bioeconomy project stakeholders.

A decision-making process is needed to triage biofuel technologies at the early design stage. Systematic decision-support methods and tools can assist companies in creating a consensus between decision-making stakeholders. In particular, multi-criteria decision-support tools are ta suitable means to conduct the analysis, evaluation, and comparison of technology pathways and related diverse configurations. Furthermore, access to a database and multidisciplinary criteria can help stakeholders make informed technology triage decisions. Table 1 provides some examples of various stakeholders in a biofuels project decision-making process and their needs, which can potentially be considered using a decision support tool. Even if decision-making values are not the same for different stakeholders, typical data and computational needs revolve around access to a database, the range of decision-making metrics, and the ability to perform sensitivity and scenario analyses. This article will examine the use of a decision support tool to evaluate two biofuel technologies using multi-criteria assessment. This article will examine the use of a decision support tool to address the uncertainties of implementing a biofuel process and to compare various existing strategies using multicriteria assessment.

Table 1 Typical Biorefinery Project Stakeholders Needs

Stakeholder	Typical stakeholder needs/values	Data and computational needs
Industry	• Create **competitive advantage** with biorefinery implementation. • Distinguish between different biorefinery process technologies for **triage** at the early design stage. • **Economic viability** and **market/technology risk**. • Accomplish **corporate sustainability** objectives.	• Information about availability, cost and quality of biomass feedstock. • Gamut of metrics to help make decisions about the biorefinery process and demonstrate the competitive advantage resulting from technologies. • Ability to perform sensitivity analyses and set up scenarios.
Government	• **Social:** Number of jobs created in the region. • **Economic:** Development sector robustness for the longer term. • **Environmental:** Contribution to GHG emission reductions relative to targets, considering replicability of projects. • Pertinent business model resulting in improved prosperity.	• Information database for biorefinery process families, with flexibility to examine implementation conditions. • Variety of metrics that enable economic, social, and environmental analysis. • Ability to perform sensitivity analysis and set up scenarios.
Consultants	• Assist in **decision-making** for industry and government. • Create value and **accelerate process evaluation**.	• Information about availability, cost and quality of biomass feedstock. • Variety of metrics that enable economic, social, and environmental analysis. • Variety of metrics that reflect the needs that companies are trying to meet. • Ability to perform sensitivity analyses and set up scenarios.

Literature review

Renewable fuels, and more specifically those derived from lignocellulosic biomass are contributing to the growing bioeconomy. Biorefinery strategies that generate biofuels must take into account sustainability, reutilization, and recycling of biomass as well as environmental performance.[1] Furthermore, identifying successful biorefinery strategies remains complex due to uncertainties and risks, such as emerging technologies yet to be demonstrated at large-scale, production cost of biofuels is not yet competitive relative to fossil-based alternatives, relatively high investment costs

and limited access to financing. This literature review will highlight the key existing risks and uncertainties and will address various methods that could help companies compare biorefinery strategies and mitigate risks, considering different criteria and key related quantified metrics.

Risk and decision-making for the bioeconomy

The early-stage design of a biorefinery implementation faces diverse uncertainties and risks. There are uncertainties linked to information on emerging technologies, linked to scale-up, process yields, operating and total investment costs, and future investments that will be needed when the technology matures. Market, technology, financial, regulatory, and supply chain are some of the risks associated with biorefinery process implementation.[2] Assis et al.[3] developed a table for the biobased economy with these categories, highlighting the nature of the risks for each and the associated mitigation. For market risks, uncertainties regarding raw material costs and cost volatility of the final product were highlighted. For technology risks, feedstock flexibility scale-up and yield have been flagged among the most important ones. Regulatory risk is one of the most central risks because policies and subsidies evolve over the years, and their impact on the biorefinery process economics is crucial. Finally, supply chain risks are related to feedstock availability and distribution, yield, and variability, as well as the intermediate and final products distribution, which can be decisive for the economic viability of a given biorefinery pathway. Such risks can be mitigated through a phased implementation of the biorefinery strategy or by applying large block analysis (LBA) methodology to estimate relative costs at the early design stage.[4] Another way to mitigate strategy is by carrying out a comprehensive risk analysis, which can be qualitative or quantitative and can include subjective, deterministic, and stochastic methods.[3, 5] Sensitivity and scenario analyses, which are examples of deterministic methods, are some of the most commonly used for quantitative risk assessment. This help to identify the input variables having the greatest impact on the process and is a relevant for making informative decisions.[3] Once the sensitivity or scenario analysis is completed, the next step is to consider mitigation strategies that minimize risks and optimize return on investment. Considering these uncertainties at an early design stage, it is necessary to explore in further deep the wide spectrum of criteria for structured and informative decision-making processes.

Multicriteria Decision-Making Analysis

In the bioeconomy projects implementation, and more specifically biorefinery projects, risk factors and uncertainties must be considered, as well as the values of the company or the stakeholders involved in the project. Defining a set of criteria is crucial for informed decision-making to ensure that the important aspects of a biorefinery implementation are being considered, and that one single criterion is not over-emphasized. The need for multi-criteria decision-making analysis is relevant for risk management, even performing sensitivity analysis.[6]

Multi-criteria decision-making (MCDM) analysis compared to other methods has some key advantages[7]:

- It helps capturing the preferences of decision-makers in relation to various criteria.
- It helps the stakeholders to find a consensus.
- It emphasizes the interpretation of each criterion.
- Because this approach is not limited to a specific field of application, it can be applied in different contexts, such as biorefinery.

In recent years, sustainability and circularity criteria have become increasingly important in MCDM.

Madden et al.[8] carried out a study that measured the sustainability of renewable diesel production by multi-criteria decision-making with respect to economic, environmental, technical and fuel-quality aspects. Gonzalez Cruz et al.[9] conducted a study with the goal of developing an optimal design for selecting a biodiesel production process using MCDM. The study demonstrated that a variety of biorefinery sustainability criteria are essential, especially those linked to environmental aspects such as the non-renewable energy used, the environmental emissions reduction after biorefinery implementation, the global warming potential, and other LCA criteria such as human toxicity potential. Social aspects were also considered by estimating the number of jobs created. Finally, for the economic aspect, criteria such as operating costs, net income, and the economic performance of the biorefinery were considered. Lin et al.[10] proposed a hybrid decision-making framework to establish a multi-criteria decision-making model for the sustainable screening of biorefinery technologies under uncertainties. The technical, economic, socio-economic, and environmental dimensions were shown to be critical indicators for biorefinery implementation.

Policies and regulations aspects are increasingly being used as part of the net-zero carbon emissions framework and are becoming more established. Cohen et al.[11] demonstrated in a study that using these two aspects in an MCDM provides flexibility to stakeholders and decision-makers to evaluate different synergies, but also to make trade-offs between different policy options. Several types of policies can be applied at different levels of governance, such as national, state, or local. The policies can be incentive-based, for example subsidies or tax credits, market-based with direct regulation of the market, or information-based with training, labels, or the use of specific websites.[12]

Choosing appropriate decision-making criteria for a project is essential to ensure that the decision-making process will lead to an informed decision. The choice of criteria and quantified metrics in an MCDM depends on the projects and the biorefinery process itself, as well as the stakeholders involved and their vision of the projects.

Distinct aspects must be considered for including appropriate criteria in a multi-criteria decision-making exercise:

- Criteria should reflect the values of the stakeholders, the decision-makers, or both;[13, 14]
- Criteria should be appropriate for the context and be useful in distinguishing between the different strategies under consideration;[13]
- Interpretation of criteria should be unique for each criterion;[15]
- Criterion must address short- and long- term objectives;[15]
- Each criterion should include a practical and ideal definition, as well as a related formulated metric.[15]

To guarantee that stakeholder involvement will be relevant for the MCDM, a pre-panel and a panel are typically used[2]. In the pre-panel, stakeholders become aware of the various alternatives or options related to the objectives of the MCDM to establish the criteria, and ensure that every participant has an understanding of the criteria. In the panel, stakeholders discuss each decision metric to refine the interpretations for each criterion, and then make trade-offs between criteria to establish preferences. Ahmad et al.[16] established another framework where stakeholder participation was included for sustainable aviation fuel pathways. It was shown that depending on stakeholder perspectives, the results of pathway scoring were different, but the rankings had the

same trend. There are definite advantages in using stakeholder participation in the MCDM process: [14, 16]

- It enhances decision-making quality by considering the priorities and opinions of decision-makers, implicitly addressing decision-maker uncertainties.
- It helps decision-makers and stakeholders align on the outcome, even if in the beginning, stakeholders did not necessarily have the same understanding.

However, if the problem is not well structured at the beginning of the MCDM, this can lead to exclusion of important criteria, and even to inclusion of criteria that will not be entirely independent.[16] A portfolio of metrics in various categories is essential for an MCDM, but gathering and quantifying them can be complicated. Using an interface where the results interpretation is available in numerical and visual form can help decision-makers arrive at a decision.

Decision-making tools in the biorefinery

A decision support system (DSS) can help providing valuable information. Usually, a DSS is made up of[17]:

- Multiple databases;
- Model and analytical tools;
- Communication with the DSS architecture and network;
- User interface.

Decision support tools (DST) can help managing a variety of constraints and uncertainties in the biorefinery context, especially at the early design stage, to make decisions on the most preferred strategy. Some of the advantages of using a DST are:[17]

- Improved productivity by enabling decision-makers to become more at ease with data processing;
- Creating competitive advantage such as making strategic investments and/or implementing strategic changes in current business model, etc.

However, DST can also have limitations:[17, 18]

- Can be structured only for one specific field of use;
- Does not often include technical performance indicators;
- Must be integrated into decision-making processes;
- Does not describe well-established and emerging technologies.

A DST can be developed for general purposes or for a specific application.[18, 19]General-purpose DSTs are the most common because they are not customized to address specific needs, but provide guidance on how to perform an analysis. The decision-maker has the responsibility to decide how to use it correctly, based on experience. Some of the best-known general-purpose DSTs are 1000minds, Analytica, and DecideIT.

Application-specific DSTs are to address specific contexts and are suited for the bioeconomy context because multiple factors and indicators can be considered such as technical performance, economic viability, social aspects, environmental footprint, LCA indicators, and the supply chain. Benali et al.[18] described examples of studies where hybrid methods with multiple tools were used to complete a multi-criteria decision analysis in the biorefinery context.

BioSTEAM, a process simulator in Python, was developed for biorefinery design, simulation, and techno-economic analysis. Cortes-Pena et al.[20] showed that it can perform techno-economic analysis at an early stage and deliver results comparable to other simulation software such as but not limited to Aspen and MATLAB. However, in the sensitivity analysis, a change in the basic assumptions was found to be needed to ensure an informed decision-making process. An LCA framework was also developed as an installable package for Python, whereby environment impacts could be studied. An external tool is required to obtain the impact assessment for emissions or the metrics related to LCA.[21]

PlanEval is a DST used for multi-criteria decision-making, developed for forest planning.[19, 22] It analyzes the impact of different forest planning scenarios on various economic, ecological, and social aspects. Even if this tool is not categorized as a general-purpose DST, it was demonstrated in a study of decision-making tools that PlanEval was built mostly with general metrics and indicators.[19]

mDSS or MULINO-DSS was developed for environmental management.[23] It has three parts: the conceptual phase, the design phase, and the choice phase. Different projects can be examined:

agriculture, urban land use, water resource management, and water resources. Once the software has simulated the chosen project, the user must select the most suitable option. A sensitivity analysis is performed by the tool, and a TORNADO diagram generated. This enables the user to compare options and identify the most sensitive parameters for the chosen option.

SaMBA tool was developed in the scope of the INTERREG Alpine Space Project. It considers policies and estimates their impact when considering mobility.[24, 25] By selecting a goal from a predefined list and filling in the parameters specific to the project area, the tool gives the user a list of measures and incentives related to sustainable forms of transportation, environmental protection, or climate protection.

Finally, I-BIOREF, a DST developed by Natural Resources Canada, is a software platform specifically developed for the biorefinery, considering either integrated or standalone biorefineries.[26] Depending on the selected biorefinery technology, the user can select the specific context (location, specific inputs for the technology) and evaluate the project using different metrics divided into categories such as economic, environmental, life cycle assessment, socio-economic, sustainability, circularity and policy aspects. A feedstock database is embedded based on the specific location of the biorefinery project to be evaluated. I-BIOREF also enables sensitivity and scenario analyses, where inputs and parameters can be changed. It is structured to enable present and ex-ante scenarios. Benali et al.[18] demonstrated its robustness and flexibility for two industrial cases for kraft pulp mill sites.

Because the focus of this study is biofuels and existing technology pathways, it was important to choose a decision support tool that would represent and assess the specific biorefinery technologies being considered. Especially for this reason, the I-BIOREF tool was the most appropriate and the state-of-the art biorefinery DST and provides access biofuels technology data, and a variety of multi-criteria decision metrics and detailed sensitivity analysis.

Biofuel technologies

Second-generation biofuels have greater land-use efficiency and better environmental performance than first generation biofuels.[27, 28] It is important to assess lignocellulosic biomass variability in physical and chemical composition, and the technical challenges of adapting the biofuels technologies. Two types of conversion processes are used to produce second-generation biofuels: biochemical and thermo-chemical.[27, 29] With biochemical conversion, processes such as

anaerobic digestion or fermentation are used. Thermochemical conversion processes include pyrolysis, hydrothermal liquefaction, torrefaction, and gasification to produce biohydrogen, bio-synthetic natural gas, and drop-in hydrocarbons.

This case study focusses on the production renewable diesel and/or jet fuel, along with co-products such as gasoline or marine diesel. Two of the most promising strategies for producing biofuels are gasification with Fischer-Tropsch and hydrothermal liquefaction (HTL). For each of these two processes, the intermediate product must be upgraded to obtain the targeted biofuels and ensure that the quality of the final product meets the required fuel characteristics. Table 2 describes the two chosen processes for evaluation in this case study, and their upgrading step.

For gasification, the biomass must be dried to a moisture of about 10%, but for the HTL process, the biomass entering the reactor does not need to be dried. Another important distinction between the two processes is their technology readiness level or TRL. Gasification has been used by industry for a long time for coal processing, and has a higher level of development for biomass processing than HTL, which is still at a pilot scale. Some examples of projects where these technologies and their upgrading step have and are being used are presented in the table.

Figure 1 introduces a simplified block flow diagram for the two processes. The first process is gasification with the water gas shift (WGS) reactor, followed by the FT synthesis unit and finally the upgrading unit. The process uses natural gas to heat the reactor. The second block flow diagram represents the HTL process. After the HTL reactor, there is the biocrude separation in order to then be upgraded before obtaining the final products.

Table 2 Characteristics of selected biofuel production processes and upgrading

Process	Features	Limitations	TRL [13, 14]	Examples	References
Gasification	• Feedstock converted to a gaseous intermediate (synthesis gas) using a given air/oxygen ratio. • Diverse types of gasifiers. • Temperature between 800 and 1500 ℃.	• Moisture content at the reactor inlet from 10% to 20%. • Cleaning conditions can be necessary to adjust the syngas composition and the different ratios.	7-8	• Sierra BioFuels plant by Fulcrum Bioenergy in Nevada is expected to create 11 million gallons/ year of syncrude (syncrude will be processed by another plant into transportation fuel by hydrotreating).[32] • COMSYN project in Europe to develop a new compact gasification and synthesis process.[33] • Enerkem Alberta Biofuels located in Edmonton, where waste is transformed to biofuels for a production of 38 million litres/year of biofuels. It is the first commercial size waste-to-biofuels facility.[34]	[35-39]
Fischer-Tropsch upgrading for syngas	• Polymerization reaction that uses catalysts, in particular CO or Fe, where the CO and H_2 from the syngas will form a chain. • Conversion of syngas to hydrocarbons and water. • High temperature creates smaller molecules, which are suitable for gasoline; low temperature creates longer molecules, which are suitable for diesel.	• Needs clean syngas with a stochiometric H_2/CO ratio slightly higher than 2. • Temperature control and heat dissipation are crucial. • Requires upgrading with hydrotreatment to respect the specifications of drop-in fuel.	9		
Hydrothermal liquefaction (HTL)	• Biomass with any water content can be treated. • Biomass treated in an aqueous medium near its critical point. • Hot pressurized environment (250 to 420°C). • Higher bio-crude yield than for gasification F-T. • Lower oxygen content in the bio-crude.	• Crude bio-oil can be viscous, which makes transportation and storage difficult. • Tar contains large amounts of oxygen and nitrogen. • Diversity of feedstock can have a substantial impact on the intermediate products. • Challenging operating conditions.	5	• Arbios Biotech (joint venture of Licella Holdings and Canadian Forest Products) will build a biofuel plant in British Columbia to produce 50,000 barrels of bio-oil/year with HTL technology [40]. • Silva Green Fuel (collaboration between Statkraft and Sodra) will build a plant in Norway to be ready to operate by 2025 and produce 4000 L of biofuels per day [41].	[38, 42-42]
Hydrotreatment upgrading to transportation fuel	• Removes O, N, and S. • Use of a heterogeneous catalyst is necessary.	• Needs high pressure and temperature (10–20 MPa and 250–450°C). • Catalyst deactivation could happen.	8		[43, 45]

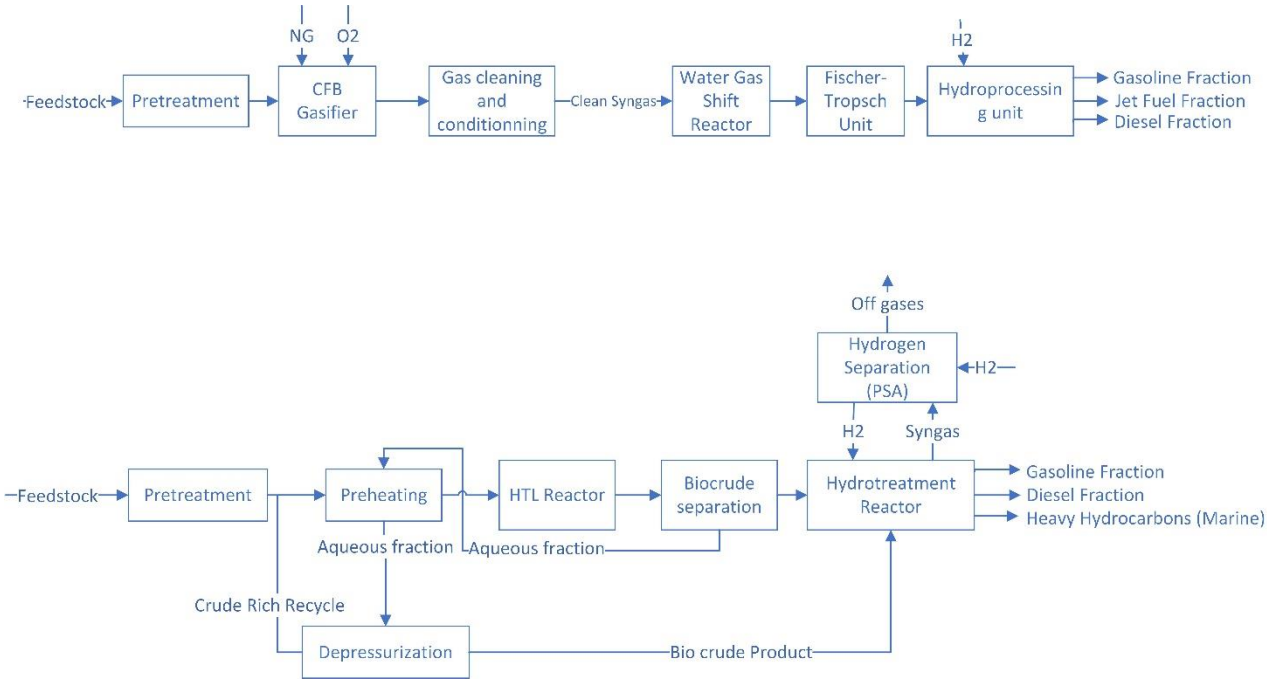

Figure 1 Block flow diagrams from top to bottom: Gasification/F-T process and HTL process

aviation fuel is the Bioenergie La Tuque (BELT) project.[46] The goal of the BELT project is to produce about two hundred million liters of hydrocarbon fuels from forest residues. A multidisciplinary team examined over 600 technologies and identified 14 as promising technologies mature enough for commercial deployment by 2025. High TRL was one of the key assessment criteria. After further investigation and information gathering from technology providers, the list was reduced to four conversion pathways:

- Entrained flow gasification with syngas cleaning, WGS, low-temperature FT, and hydrocarbon reforming;
- Steam reforming gasification with syngas cleaning, WGS, low-temperature FT fixed-bed micro-reactor, and hydrocarbon reforming;
- Integrated catalytic hydro-pyrolysis and hydro-treating;
- Hydrothermal liquefaction and hydro-treating.

After further technical, economical, and risk analysis, two pathways were considered for implementation: gasification with FT synthesis, and hydro-pyrolysis. The published report highlights that biomass feedstock price and capital cost can be barriers to implementation of the

pathways. In addition, the importance of a biofuel mandates as well as the availability of incentives for biofuels, have been addressed in the conclusion. Without these elements, the project attractiveness for investors is small.

The main objective of this study was to compare two biorefinery strategies for biofuels production at the early design stage, considering several decision metrics. In addition, the goal was to explore future scenarios to examine the robustness of the decision.

Materials and Methods

As described earlier, this study was conducted with the I-BIOREF project modelling and evaluation tool for evaluating biorefinery projects in a stepwise manner, performing scenario analysis and assessing the technical, economic, environmental, and socio-economic impacts of a scenario within a single platform.[26] It was created to enable companies and government to identify viable biorefinery process solutions, and to assess the benefits of implementing these processes considering decision-making criteria. The gasification and HTL processes can be simulated in the tool, i.e., modules specific to these technologies have been developed in I-BIOREF. Different types of gasifiers can be selected such as the fixed bed, the circulating fluidized bed, or a hybrid solution. For the purpose of this project, the circulating fluidized bed was considered. For the HTL process, there are also two pathways that can be evaluated: biocrudes; and drop-in fuels.

For each process, I-BIOREF needs inputs about the features of the process, the capital and operating costs, along with direct and indirect costs and the products selling prices. Furthermore, it is necessary to identify the battery limits of the project to be sure that the same limits apply to the two processes. Figure 2 summarizes the methodology used for this study. In the first step, the battery limits were defined, and a base case was built. After gathering the data necessary for input to I-BIOREF, the selection of the decision-making metrics was made. I-BIOREF has more than fifty multidisciplinary metrics, and therefore a proper approach was necessary to ensure that appropriate metrics were employed. A methodology was developed to select the decision metrics:

- Identify critical issues and prioritize stakeholder values;
- Critically analyze each of the metrics in I-BIOREF;
- Triage criteria to retain the most pertinent ones for the specifics of the project context.

Once the most important criteria were identified, it was possible to assess the results given by the tool and proceed with sensitivity and scenario analyses to interpret and identify the strengths and weakness of each process.

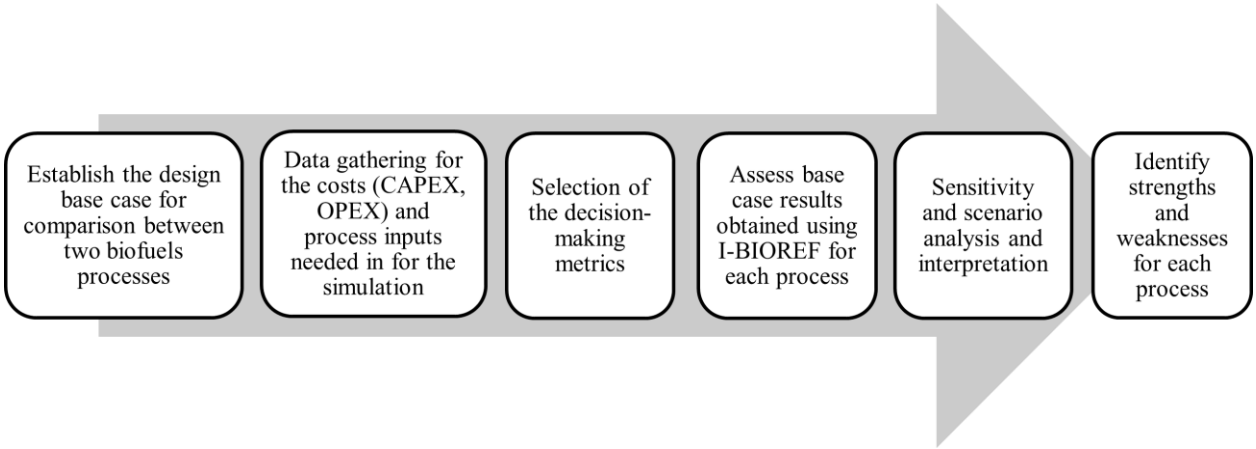

Figure 2 Methodology employed for the case study

Besides process-related inputs, general economic inputs are also needed. Table 3 provides the assumptions that were used for capital and operating costs, as well as for the economic analysis. Table 4 indicates the price basis that was used for the economic analysis. Incentives have been used for the prices of renewable diesel, gasoline, and jet fuel.

Table 3 General assumptions used for the tool simulation

Parameter	Value	Justification
Assumptions for the techno-economic analysis		
Average operating time	8 000 hours	First two years' operating availability will be lower, after which expected capacity will be reached.
Project lifetime	20 years	2 years for construction, 23 for operation.
Debt	0%	All equity available.
Government support for capital costs assumed from all levels of government	40%	Federal and provincial granting programs.
Income tax rate	30%	Nominal tax rate.
Weighted average cost of capital (WACC)	6%	
Capital and operating cost assumptions		

Feedstock input for the base case	2 000 bdmt/day	Commercial-scale process.
Forest residue cost	70 $/bdmt	Chipped biomass delivered to mill gate.
Water purchase cost	0.12 $/m^3	Typical cost of water.
Electricity purchase cost	5$/MWh	Typical value from 5–15 $/MWh for case study context

Table 4 Product pricing basis

Products	Price	Justification
Fossil-based diesel	0.70$/L	Range January to April 2022: 0.70$/L–1.07 $/L (EIA)*
Fossil-based gasoline	0.84$/L	Range January to April 2022: 0.84$/L–1.1 $/L (EIA)*
Fossil-based jet fuel	0.65$/L	Range January to April 2022: 0.65$/L–1.03 $/L (EIA)*
Heavy hydrocarbons (marine)	0.48$/L	Price on the market (Ship & bunker, January 2022)
Biofuel incentives	50% increase of fossil-based price	Nominal government policy with low-carbon fuel standard

** Prices have been going up due to geopolitical reasons. The prices of January 2022 have been considered for this work, however long-term estimated values could have been used. Source: US Energy Information Administration, https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_m.htm [accessed 28 May 2022]*

Various categories of metrics can be found in I-BIOREF such as economic performance, environmental performance, life-cycle assessment, socio-economic assessment, and policy. Table 5 summarizes these categories and the types of metrics that are already embedded.

Table 5 Metric categories and their nature in I-BIOREF

Metric Category*	Number of metrics found	Nature of the metrics
Economic performance	21	Metrics available are different from one another because some of them highlight the profitability of the project, whereas others emphasize the robustness, the capital efficiency, or the business value proposition
Environmental performance	15	Metrics in this category show the stress on the environment with landfill generation, highlighting GHG emissions with the carbon intensity metrics and annual emissions of the project. Two carbon sequestration

		metrics are also calculated, which represent the number of years required to restore forest carbon stocks.
Life cycle assessment	16	LCA metrics are divided into five categories linked to the indicator categories used for a typical LCA evaluation: human health, ecosystem quality, climate change, resources, and water scarcity footprint.
Socio-economic	5	Direct and indirect jobs, as well as the attractiveness of the project to the labour force and acceptance by the local economy, are represented.
Policy	7	Policy indicators were implemented at different levels in the inputs, and the policy metrics are represented by the carbon credits or the incentives that should be considered.

** A category of circularity metrics is currently being developed where waste and carbon circulation metrics will be calculated.*

After a critical analysis of the most pertinent metrics, five were selected for the case study. These metrics are summarized in Table 1.

Table 1 Selected decision-making metrics for the case study

Metric	Ideal Definition	Calculation basis	Interpretation	Critical analysis
Economic performance				
IRR	Discount rate that makes the net present value of all cash flows resulting from the biorefinery implementation equal to zero.	IRR for which $\sum_{i=0}^{Project\ lifetime} \frac{Cash\ Flow_{Year\ i}}{(1+IRR)^i} = 0$	The higher the IRR, the more profitable the biorefinery is. As of the 2019 reference year, a typical threshold for the IRR of biorefinery projects was 20%.	IRR is a pertinent metric for a decision-making process because its value demonstrates the economic viability of the process; its sensitivity to different parameters should be studied.
EBITDA	EBITDA is the operating income that a biorefinery project generates, not accounting for depreciation and amortization expenses.	EBITDA= Revenue-Operating cost	The EBITDA is a measure of a biorefinery project's financial performance, expressed as a cash profit (or deficit) from its operations. The higher the EBITDA, the higher is the potential of a biorefinery project to generate net profit.	The EBITDA metric highlights the cash flow generated over time versus paying back the capital investment and operating profitability.
CAPEX	CAPEX is the total amount of capital invested to implement the biorefinery plant.	CAPEX= Fixed Capital Investment+ Total other costs	Measure of the capital intensity of a biorefinery process, considering government subsidies. Lower CAPEX implies a lower financing risk because annual investments by private companies are usually budget-capped and access to external sources of funding is limited.	CAPEX represents investment in biorefinery projects, with comes with many uncertainties, especially at an early-stage design when processes are evolving, as well as the yields and the main equipment.
Environmental performance				
Carbon intensity of biorefinery products (CIBP)	Annual amount of GHG emissions resulting from the implementation of the biorefinery per unit of bioproducts.	CIBP= $\frac{Annual\ GHG\ emissions\ by\ the\ biorefinery\ project}{Annual\ production\ rate\ of\ biorefinery\ products}$	Lower values are preferred because bioproducts are expected to have a reduced environmental footprint and therefore result in a lower impact than counterparts produced from non-renewable resources.	This metric is more used for business plans. The carbon intensity has to do with how favoured the bioproduct is in many jurisdictions, not just biofuels, but biofuels with low carbon intensity.
Socio-economic				
Total number of jobs created (TJC)	TJC is the number of full-time equivalent permanent jobs resulting from implementation of the biorefinery project, accounting for its overall systemic impact on the local economy. It includes direct, indirect, and induced jobs.	TJC= Direct Jobs +Indirect Jobs+ Induced Jobs* Where **Indirect jobs** are represented by employment in industrial sectors supporting the activities of the biorefinery and **Induced jobs** are the household expenses of the direct and indirect jobs created.	The TJC is a measure of socio-economic benefits generated by the biorefinery project for the local economy. The higher the TJC, the more socially beneficial a biorefinery project is.	The number of jobs created is an important metric, and its definition shows the references for the three jobs included in the calculation basis.

**It is calculated using the design capacity of the biorefinery plant and multiplying factors representative of the systemic impact of the biorefinery project on the local economy*

Results and Discussion

The results associated with biofuel production from the two processes are summarized in Les résultats techniques associés à la production de biocarburants à partir des deux procédés sont présentés dans le Tableau 3.17. Il est important de préciser que les données techniques utilisées pour la simulation sont celles présentes par défaut dans I-BIOREF. Ces données se basent sur des projets industriels et de recherche prouvés. À première vue, la HTL a un meilleur rendement que la gazéification, avec une production plus importante de diesel et d'essence renouvelables. Les deux procédés ont des coproduits : le procédé de gazéification a le kérosène renouvelable dont le prix de vente est proche du prix de vente du diesel ; le procédé HTL a le carburant marin qui peut également être vendu, mais sans taux incitatif pour cette étude. Même si le procédé HTL a un rendement plus élevé, il est important de souligner que son NMT n'est pas aussi avancé que celui de la gazéification, ce qui implique que malgré une production plus élevée de biocarburants, le procédé n'est pas encore à l'échelle commerciale.. HTL has a higher yield than gasification, having more production of renewable diesel and gasoline. Both processes have co-products: the gasification process generates jet fuel whose selling price is of the same order of magnitude as that of diesel. The HTL process generates marine fuel, which can also be sold, but without incentives considered in this study. Even if HTL has a higher yield, its TRL is not as advanced as that of gasification.

Table 7 Comparison of Gasification F-T with HTL: Overall Yields

	Yield* (%)	**Bio-products obtained (t/day)**				**TRL**
		Renewable diesel	Renewable gasoline	Jet fuel	Heavy hydrocarbons (marine)	
Gasification/FT	25.3	59.5	211	232.7	-	8-9
HTL/Hydrotreatment	31.5	295.6	188.7	-	144.7	5-6

**Density weight yield*

Table 8 indicates the economic results obtained from I-BIOREF. The capital cost is based on the equipment cost for the various process units, as well as the direct and indirect costs as normally used for an economic assessment. Working capital and assumed capital support are included in the CAPEX. OPEX is based on the price of feedstock and on chemical and utility costs, as well as other direct costs such as labour and maintenance. The revenues considered in Table 8 are based on the sale of the biofuels.

Table 8 8 Comparison of Gasification F-T with HTL: Overall economic results

	Gasification/FT	HTL/Hydrotreatment
CAPEX (M$)	1,185	1,149
OPEX (M$/year)	138	107
Revenues (M$/year)	217.2	253.7

Table 9 introduces the metrics obtained after simulation with I-BIOREF. As expected, the HTL process had better economic performance than gasification, mostly because of the higher yield. The difference in CAPEX between the processes is relatively small, as well as the number of jobs created. As for environmental performance, the HTL process has a smaller environmental footprint in terms of emissions and tons of CO2eq. In I-BIOREF, natural gas is used for gasification, which explains the significant difference between the CIBP of the two processes.

Table 9 Comparison of Gasification F-T with HTL: Decision-making metrics

	Gasification/FT*	HTL/Hydrotreatment
Economic performance		
IRR (%)	7	14
EBITDA (M$/year)	79	146
CAPEX (M$)	1,185	1,149
Environmental performance		
CIBP (kg CO_2 eq/MJ)	2.0	0.3
Socio-economic		
TJC (jobs)	177	188

**Use of natural gas for heat*

Sensitivity and scenario analysis

To help evaluate the risks of each process, a sensitivity analysis was done on certain parameters that were found to be important for profitability and economic viability. Table 10 presents these parameters and their variation.

Table 10 Studied parameters for sensitivity analysis

Parameter		Value	Justification
Capital investment	Minimum	90%	No under-estimation of costs
	Base case	100%	As described for each process
	Maximum	150%	Assumption of additional costs due to uncertainty in implementation

			requirements at the early technology development stage.
Forest residue feedstock price	Minimum	40 $/t	Biomass at typical low cost
	Base case	70 $/t	Base case
	Maximum	100 $/t	Biomass at typical high cost
Capacity	Minimum	1,000 odmt/day	Unavailability of feedstock
	Base case	2,000 odmt/day	Base case
	Maximum	4,000 odmt/day	Additional feedstock availability
Assumed capital support	Minimum	0%	No government support available
	Base case	40%	Assumed base case support by government
	Maximum	70%	Hypothesis of maximum support by government
Incentives on biofuel price	Minimum	Fossil-based price	No incentives for bio-fuels available
	Base case	50%	Base case
	Maximum	100%	Higher value of the incentives available on biofuels

Figure 3 shows the variation in the cumulative cash flows by changing the capital investment (CAPEX) and the forest residue price. The impact on IRR is shown in Figure 4.

As depicted in Figure 3, a higher CAPEX when implementing a process would have a strong impact on return on investment for both processes. For example, in the case of the HTL process, a significant difference can be observed between the base case where the cumulative discounted cash flow becomes positive around the 10th year, versus the 150% CAPEX where it becomes positive around year 16. The uncertainties around CAPEX are more likely for low TRL technologies, and it is thus more probable for the HTL process to have a larger CAPEX than the base case estimate. A lower

CAPEX was also studied, as shown in Figure 4, and the return on investment was better for both processes by about two years.

The second parameter shown in Figure 3 is the forest residues of biomass feedstock price. As expected, paying less for feedstock creates an improvement in the return on investment for both processes. This parameter is important as well because, depending on project location, the aailability of forest residues further away from the plant can affect project viability.

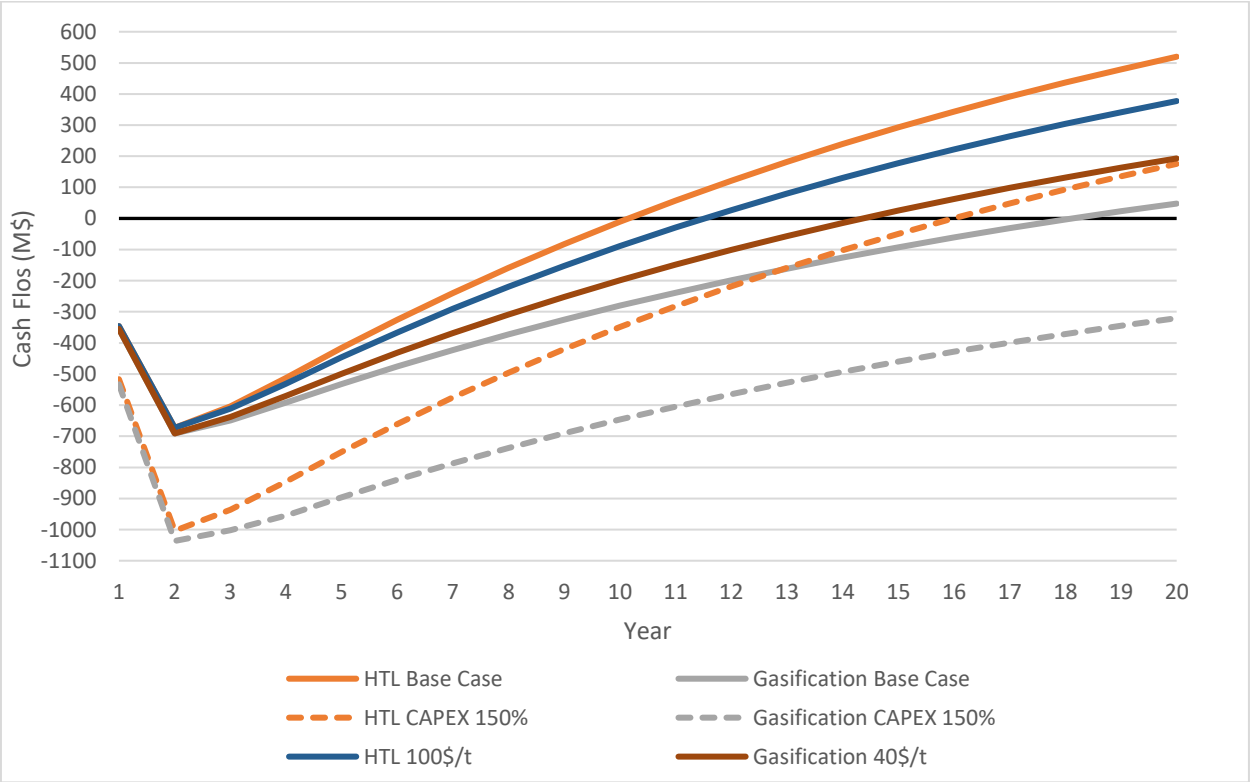

Figure 3 Cash flow analysis for varying capital investment and forest residues price

At first sight, in Figure 4, capital support and incentives related to biofuels are two parameters that most significantly improve the IRR when they are at higher values.

The assumed capital support corresponds to the maximum support from all levels of government or other stakeholders. When 70% of the capital investment is financed for this high capital cost project (which is unlikely), the impact on viability is significant for both processes. Even if gasification does not reach the targeted IRR of 20%, its improvement is impressive. As for HTL, with maximum support, the IRR can reach 27%. On the other hand, when no financial support is available, the

viability of the project is questionable because the IRR of both processes falls below 10%. Clearly, these projects will be built in jurisdictions that offer strong support for capital cost.

The IRR is also sensitive to the incentives available regarding the biofuel selling price. If such incentives are not yet accessible, then the projects are not profitable. There is no IRR for gasification, and the IRR of the HTL process is only 6%. However, when the incentives in the base case are doubled, which is a plausible scenario, the IRR is improved for both processes. These two parameters highlight the importance of having access to capital support or incentives that are available for the final products.

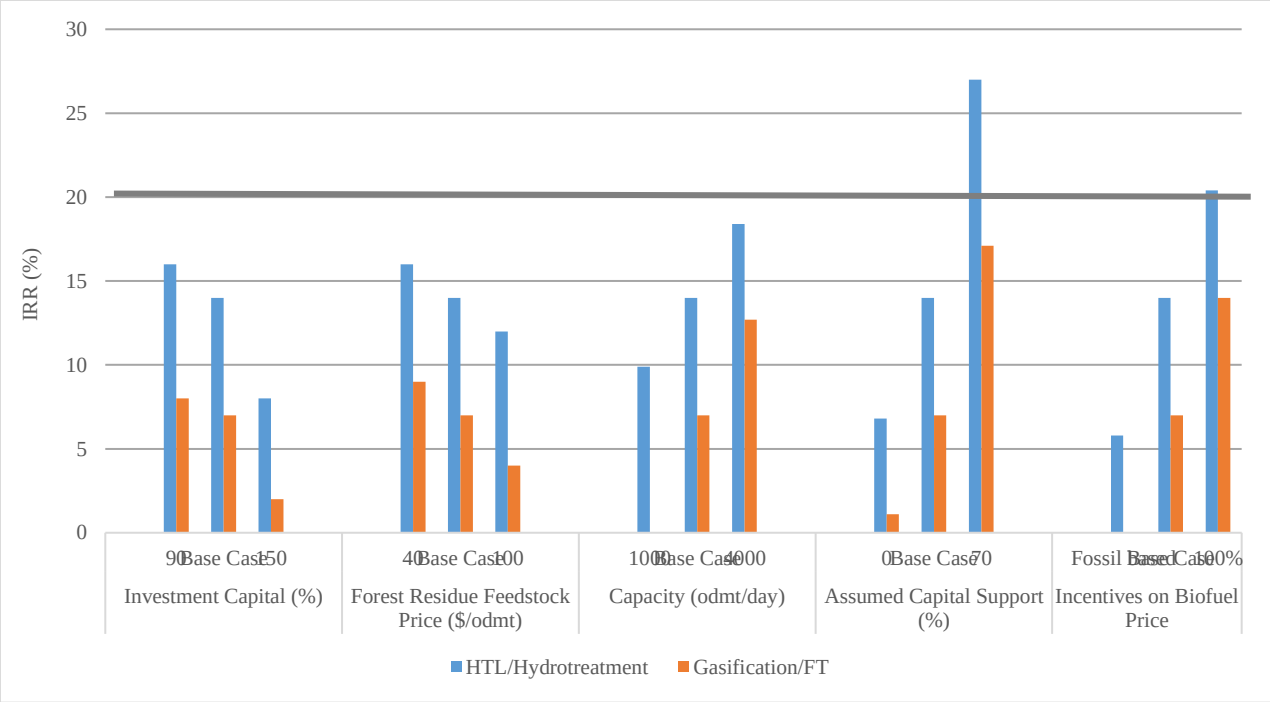

Figure 4 IRR sensitivity to the chosen parameters

Process capacity can have a strong impact not only on the IRR and its sensitivity, but also on other decision metrics chosen earlier. Higher capacity improves IRR as well as revenues, even if investment capital will be greater, if adequate forest residues are available near the plant. In the case where less feedstock is available and the capacity needs to be less than 2000 odmt/day, the viability of the project will be affected, especially for gasification, where there will be no IRR.

Tables 9 and 10 present the decision metrics used for the case study and their variation with changing capacity. With increased capacity, the revenues as well as the EBITDA are higher. There is no change in the CIBP because the metric is presented in kg CO2eq/MJ. However, if the units were changed to a function of biofuel production, the CO2eq emissions would be higher with larger capacity. Finally, the total number of jobs created shows linear growth when going from 1,000 odmt/day to 4,000 odmt/day. Table 4 illustrates that the calculation of the total number of jobs in I-BIOREF was based on the design capacity of the biorefinery plant and considered direct, indirect, and induced jobs including jobs in woodlands, in production, and in product delivery.

Table 11 Capacity parameter influence on HTL process

	HTL/Hydrotreatment 1,000 odmt/day capacity	HTL/Hydrotreatment Base Case	HTL/Hydrotreatment 4,000 odmt/day capacity
Economic performance			
IRR (%)	10	14	18
EBITDA (M$/year)	67	146	310
CAPEX (M$)	734	1,149	1,797
Environmental performance			
CIBP (kg CO_2 eq/MJ)	1.8	1.8	1.8
Socio-economic			
TJC (jobs)	95	188	375

Table 12 Capacity parameter influence on gasification process

	Gasification/FT 1,000 odmt/day capacity	Gasification/FT Base Case	Gasification/FT 4,000 odmt/day capacity
Economic performance			
IRR (%)	-	7	13
EBITDA (M$/year)	15	79	214
CAPEX (M$)	754	1,185	1,862

Environmental performance			
CIBP (kg CO_2 eq/MJ)	43.6	43.6	43.6
Socio-economic			
TJC (jobs)	90	177	352

To examine the robustness of the processes, three scenarios were examined as shown in Figure 5.

•The first scenario was built to evaluate the case in which a maximum of 70% assumed capital support and maximum incentives on biofuels selling price are available.

•The second scenario was built to analyze a drop in oil price to 40$ per barrel, as occurred in early 2020, to see the impact on the selling price of biofuels.

•The third scenario considers an increase in oil price of 145$ per barrel.

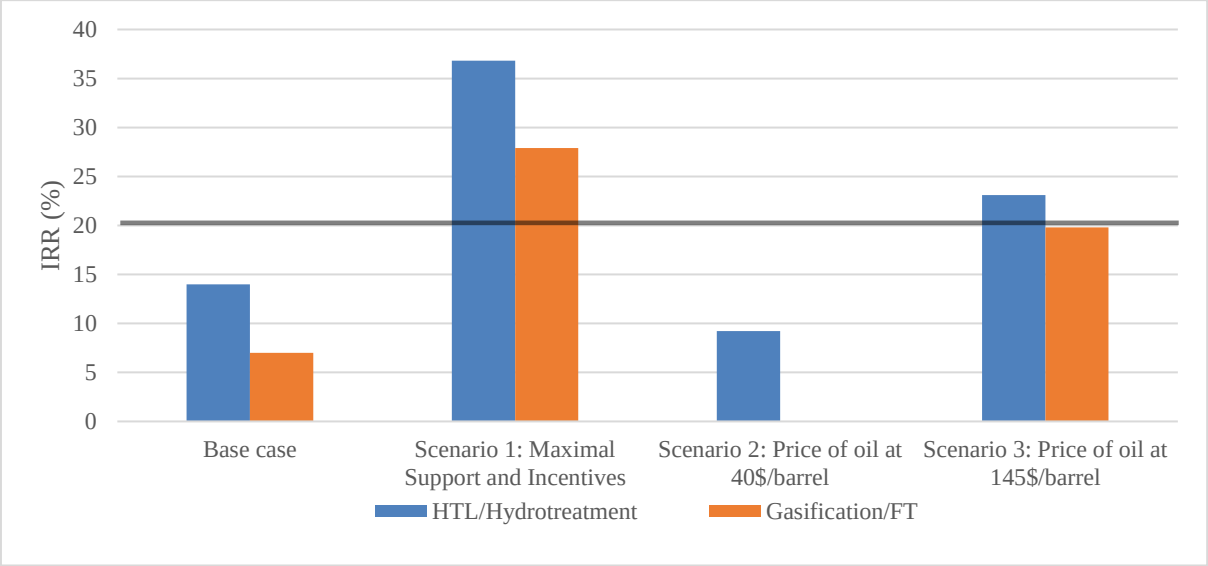

Figure 5 Scenario analysis

In these scenario analyses, the HTL process continues to outperform gasification. Considering the 3 scenarios and the likelihood of the high and low oil prices, it is clear that government support is essential for establishing a biofuels project.

Conclusions

Two state-of-the-art biorefinery processes for biofuel production were compared in this case study, namely gasification with Fischer–Tropsch (F-T), and Hydrothermal Liquefaction (HTL), both with biocrude upgrading to drop-in biofuel. Gasification is a complex process that has been demonstrated at the pre-commercial scale and has a TRL of 8-9, whereas the HTL process is advancing rapidly but at earlier stages of development and currently has a TRL of 5-6. The systematic methodology used to compare the technologies employed a decision support tool called I-BIOREF, effective for advancing early design stage biorefinery assessments and including a unique set of decision-making criteria.

A critical analysis and a triage of the multidisciplinary metrics found in I-BIOREF resulted in the identification of five decision-making metrics for this study: IRR (Internal Rate of Return), EBITDA, CAPEX, CIBP (Carbon intensity of biorefinery products), and TJC (Total direct jobs created). It was estimated that HTL outperforms gasification economically, as well as having a smaller environmental footprint. Gasification F-T had a larger environmental footprint due mainly to the use of natural gas for heating.

By performing sensitivity and scenario analyses, policies such as government support towards the capital cost and/or incentives on biofuel price were found to be essential for project economic viability. The HTL process had better metrics than Gasification F-T for all scenarios, but it is important to consider the risk associated with its lower TRL. Based on typical technology developments, it was surmised that the HTL process may have a significant increase over the base case CAPEX estimate made in this study when eventually implemented at the commercial scale, because of its lower TRL and that this represents a major risk. This work illustrates the importance of making systematic analyses of competing biorefinery processes, considering a range of assessment metrics for decision-making, and the challenge of balancing risk with return for technologies at different TRLs. Also, the use of a DST with multidisciplinary metrics available helped manage a variety of uncertainties in the biorefinery context, especially at the early design stage by evaluating from the technical results to the economic ones, and then the decision-making metrics the biofuel production processes selected.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful for the financial support received from the Program on Energy Research and Development (Project OERD-CEV-19-106) and the Forest Innovation Program of the Canadian Forest Service (CFS Biorefinery Flagship Project) at Natural Resources Canada. The authors would like also to express their deepest gratitude to Nima Ghavidel Mehr and Cédric Diffo Téguia for their technical support in efficient use of I-BIOREF software.

References

[1] A. K. Chandel et al., "The role of renewable chemicals and biofuels in building a bioeconomy," vol. 14, no. 4, p. 830-844, 2020, 830.

[2] M. A. Quintero-Bermudez et al., "Early design-stage biorefinery process selection," vol. 11, no. 11, p. 9-16, 2012, 9.

[3] C. Abbati de Assis et al., "Risk management consideration in the bioeconomy," vol. 11, no. 3, p. 549-566, 2017, 549.

[4] É. Trottier, C. Myers et P. Stuart, "Comparing Biorefinery Processes at the Early Design Stage Using Large Block Analysis ", 2021.

[5] E. HytÖNen et P. R. Stuart, "Early-stage design methodology for biorefinery capital appropriation," vol. 11, no. 4, p. 9-23, 2012, 9.

[6] H. Karunathilake et al., "Decision making for risk management: A multi-criteria perspective," dans Advanced Methods of Risk Assessment and Management, 2020, p. 239-287.

[7] S. Sanaei, V. Chambost et P. R. Stuart, "Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: sustainability assessment using multi-criteria decision-making (MCDM)," Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr, vol. 12, p. S73-S86, Aug 2018, S73. [En ligne]. Disponible: <Go to ISI>://WOS:000443223800007

[8] S. Madden, K. Alles et Y. Demirel, "Measuring sustainability of renewable diesel production using a multi-criteria decision matrix," vol. 15, no. 6, p. 1621-1637, 2021, 1621.

[9] L. A. González-Cruz et al., "Optimal ecodesign selection for biodiesel production in biorefineries through multicriteria decision making," vol. 23, no. 8, p. 2337-2356, 2021, 2337.

[10] R. Lin et al., "Sustainability prioritization framework of biorefinery: A novel multi-criteria decision-making model under uncertainty based on an improved interval goal programming method," vol. 251, 2020, 119729.

[11] B. Cohen et al., "Multi-criteria decision analysis in policy-making for climate mitigation and development," vol. 11, no. 3, p. 212-222, 2018, 212.

[12] D. U. Pascoli et al., "The US bioeconomy at the intersection of technology, policy, and education," vol. 16, no. 1, p. 9-26, 2021, 9.

[13] V. Chambost, M. Janssen et P. R. Stuart, "Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: investment decisions for sustainable biorefinery business models," vol. 12, p. S9-S20, 2018, S9.

[14] E. Vassoney et al., "Comparing Multi-Criteria Decision-Making Methods for the Assessment of Flow Release Scenarios From Small Hydropower Plants in the Alpine Area," vol. 9, 2021-April-16 2021. [En ligne]. Disponible: https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2021.635100

[15] C. D. Téguia, V. Chambost et P. R. Stuart, "Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: market competitive analysis for business model development," vol. 12, p. S35-S45, 2018, S35.

[16] S. Ahmad et al., "A stakeholders' participatory approach to multi-criteria assessment of sustainable aviation fuels production pathways," vol. 238, 2021, 108156.

[17] D. J. Power, Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers. Faculty Book Library: Faculty of Northern Iowa, 2002.

[18] M. Benali et al., "Decision support systems for assessment of biorefinery transformation strategies," vol. 96, no. 10, p. 2155-2175, 2018, 2155.

[19] J. Mustajoki et M. Marttunen, "Comparison of Multi-Criteria Decision Analytical Software," Finnish Environment Institute, 2013.

[20] Y. Cortes-Peña et al., "BioSTEAM: A Fast and Flexible Platform for the Design, Simulation, and Techno-Economic Analysis of Biorefineries under Uncertainty," vol. 8, no. 8, p. 3302-3310, 2020, 3302.

[21] R. Shi et J. S. Guest, "BioSTEAM-LCA: An Integrated Modeling Framework for Agile Life Cycle Assessment of Biorefineries under Uncertainty," vol. 8, no. 51, p. 18903-18914, 2020, 18903.

[22] A. Korosuo et al., "An integrated MCDA software application for forest planning: a case study in southwestern Sweden," vol. 3, p. 75-86, 2011.

[23] C. Giupponi, "Decision Support Systems for implementing the European Water Framework Directive: The MULINO approach," vol. 22, no. 2, p. 248-258, 2007, 248.

[24] J. Schmitt et D. Lahnsteiner, "Guideline for implementing the SaMBA Tool," 2021.

[25] A. Butzhammer et al., "Concept for SaMBA Tool for finding policies & estimating impacts in terms of mobility behavior change," 2021.

[26] M. Benali. (2015) I-BIOREF Software – Modeling and Analysis for Technical, Economic, and Environmental Assessment of Biorefinery Processes. [En ligne]. Disponible: https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/publications/energy-publications/publications/i-bioref-software-modeling-and-analysis-technical-economic-and-environmental-assessment-biorefinery/17887

[27] V. Aristizábal-Marulanda et C. A. Cardona Alzate, "Methods for designing and assessing biorefineries: Review," vol. 13, no. 3, p. 789-808, 2018, 789.

[28] J. R. Ziolkowska, "Biofuels technologies: An overview of feedstocks, processes, and technologies," dans Biofuels for a More Sustainable Future, 2020, p. 1-19.

[29] F. Müller-Langer, S. Majer et S. O'Keeffe, "Benchmarking biofuels—a comparison of technical, economic and environmental indicators," vol. 4, no. 1, 2014.

[30] Y. Jafri et al., "Multi-aspect evaluation of integrated forest-based biofuel production pathways: Part 2. economics, GHG emissions, technology maturity and production potentials," vol. 172, p. 1312-1328, 2019, 1312.

[31] A. Brown et al., "The Role of Renewable Transport Fuels in Decarbonizing Road Transport: Production Technologies and Costs," 2020.

[32] F. BIOENERGY. (2022) Sierra BioFuels Plant. [En ligne].

[33] Comsyn. (2022) Comsyn Project (May 2017-April 2021). [En ligne]. Disponible: https://www.comsynproject.eu/project/

[34] Enerkem. (2022) Facilities & Projects. [En ligne]. Disponible: https://enerkem.com/company/facilities-projects/

[35] M. Wang et al., "Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective," vol. 74, p. 31-49, 2019, 31.

[36] V. S. Sikarwar et al., "Progress in biofuel production from gasification," vol. 61, p. 189-248, 2017, 189.

[37] H. Shahbeig et al., "Exergy sustainability analysis of biomass gasification: a critical review," vol. 9, no. 1, p. 1592-1607, 2022, 1592.

[38] S. van Dyk et al., "Potential synergies of drop-in biofuel production with further co-processing at oil refineries," vol. 13, no. 3, p. 760-775, 2019, 760.

[39] M. Shahabuddin et al., "A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes," vol. 312, p. 123596, Sep 2020. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32507633

[40] B. International. (2021) Arbios outlines plans for new biofuels plant in British Columbia. [En ligne]. Disponible: https://biofuels-news.com/news/arbios-outlines-plans-for-new-biofuels-plant-in-british-columbia/

[41] Statkraft. (2022) Silva Green Fuel. [En ligne]. Disponible: https://www.statkraft.com/about-statkraft/where-we-operate/norway/silva-green-fuel/

[42] H. Chen, G. Luo et S. Zhang, "Hydrothermal Liquefaction of Lignocellulosic Biomass for Bioenergy Production," dans Sustainable Resource Management, Volume I, vol. 1st, Wiley, Édit., 2021, p. 83-107.

[43] S. Zhang et al., "Liquefaction of Biomass and Upgrading of Bio-Oil: A Review," vol. 24, no. 12, Jun 17 2019. [En ligne]. Disponible: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31212889

[44] T. H. Pedersen et al., "Renewable hydrocarbon fuels from hydrothermal liquefaction: A techno-economic analysis," vol. 12, no. 2, p. 213-223, 2018, 213.

[45] C. U. Jensen et al., "Hydrofaction™ of forestry residues to drop-in renewable transportation fuels," dans Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications, 2018, p. 319-345.

[46] N. Ghavidel Mehr et al., "BIOENERGIE LA TUQUE (BELT) PROJECT SUMMARY (PUBLIC VERSION)," Project Updating Report, 2021.

ANNEXE C ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Choix des Indicateurs de Performance clés (IPC)

Le tableau suivant résume les IPC présentés dans la section 3.5.2 avec les détails de calcul.

Tableau : Choix des indicateurs de performance clés (IPC) pour l'analyse

IPC	Base de calcul
TRI (%)	TRI pour lequel $\sum_{i=0}^{Durée\ du\ projet} \frac{Fonds\ de\ roulement_{Année\ i}}{(1+TRI)^i} = 0$
ROI (%)	$ROI_{année\ T} = \frac{Fonds\ de\ roulement_{Année\ T}}{Investissement\ en\ capital\ cumulatif_{Année\ T}}$
EBITDA (M$)	EBITDA= Revenu-Coûts d'exploitation
Marge EBITDA (%)	Marge EBITDA $=\frac{EBITDA}{Revenu}$
CAPEX (M$)	CAPEX= Investissement en capital fixe+ Autres coûts
Délai de récupération (ans)	Année T pour laquelle : $\sum_{i=année\ de\ démarrage}^{T} Fonds\ de\ roulement_{Année\ i} = Investissement\ en\ capital$

Résultats de l'analyse économiques suite à l'application de la méthodologie LBA

Les deux tableaux suivants résument les coûts d'investissement et les coûts d'exploitations obtenus à la suite de l'application de la méthodologie LBA.

Tableau : Résultats de l'estimation des coûts d'investissement suite à l'application de LBA

Coûts d'investissement	RC	CFB	MFB	Justification
	En Million $			
Coûts directs				
Coûts des équipements				
Manipulation et préparation des matières premières	9.9			Même prétraitement pour les 3 configurations
Unité de pyrolyse rapide				
• Réacteur et équipements auxiliaires	48.3	49.1	54.7	
• Traitement des vapeurs de pyrolyse	13	8.8	18	Plus cher pour le MFB, car il y a l'unité de condensation progressive
• Système de récupération du biochar	-	10.0	10.0	Juste les configurations CFB et MFB ont du biocharbon comme un produit à valeur ajouté
Total des coûts des équipements	71.2	77.8	92.6	
Construction	Inclus dans les coûts des équipements			
Installation de service	14.2	15.5	18.5	20% du Total des coûts des équipements
Tuyauterie	-	6.2	7.4	8 % du Total des coûts des équipements
Électricité, contrôle et instrumentation	3.6	3.9	4.6	5% du Total des coûts des équipements
Total des coûts directs	89	103.4	123.1	
Coûts indirects				
Ingénierie	13.3	15.5	18.5	15% du Total des coûts directs
Gestion de la construction	10.7	12.4	14.8	12% du Total des coûts directs
Frais du propriétaire	2.7	3.1	3.7	3% du Total des coûts directs
Démarrage et mise en service	1.8	2.1	2.5	2% du Total des coûts directs
Total des coûts indirects	28.5	33.1	39.5	
Investissement en capital fixe	117.5	136.5	162.6	

Contingences	17.6	20.5	24.4	15% de l'Investissement en capital fixe
Besoin en fonds de roulement	14	19	21	10% de l'Investissement en capital fixe
Total des investissements en capital	**149**	**176**	**208**	

Tableau : Résultats de l'estimation des coûts d'exploitations à la suite du LBA

Coûts d'exploitation	RC	CFB	MFB	Justification
	En Million $			
Biomasse	9.24			Même quantité de biomasse entrante pour les trois configurations
Services				
Électricité	0.09	0.64	0.27	
Vapeur	-	-	0.11	**MFB:** Vapeur utilisée pour le chauffage du réacteur
Eau	0 .19	0.03	0.8	**MFB:** Plus d'eau utilisée pour le refroidissement du réacteur
Sable	0.20	0.91	-	**MFB** : pas d'utilisation de sable
Exploitation				Coûts d'exploitation identiques pour les 3 configurations
Main-d'œuvre	1.28			12 operateurs and 1 directeur
Charges de laboratoire	0.19			15% du coût de la Main-d'œuvre
Maintenance				
Maintenance et réparations	4.47	3.10	3.69	3% du Coût total d'investissement
Fournitures d'exploitation	0.67	0.46	0.55	15% du coût de la Maintenance et réparation
Autres dépenses				
Exploitation de l'usine	1.73	1.31	1.49	30% du coût de la Main-d'œuvre et la Maintenance et réparations
Ventes et marketing	0.42	0.32	0.36	5% du coût total de l'Exploitation, Maintenance et exploitation de l'usine
Frais d'administration	0.26			20% du coût de la Main-d'œuvre
Assurances	0.60	0.70	0.83	0.4 du Coût total d'investissement
Taxes	1.49	1.76	2.08	1% du Coût total d'investissement
Coût total d'exploitation	20.82	20.21	21.16	

Hypothèses pour l'analyse économique

Les deux tableaux suivants résument les hypothèses utilisées pour l'analyse économique. Le premier tableau présente les coûts unitaires utilisés pour le calcul des coûts d'exploitation. Le deuxième tableau présente les prix de vente utilisés pour le calcul des revenus.

Tableau : Coûts unitaires supposés pour le calcul des coûts d'exploitation

Hypothèses pour les coûts d'investissement et d'exploitation		
Coûts de la biomasse	70 $/tma*	Biomasse déchiquetée livrée à l'entrée de l'usine
Coût d'achat de l'eau	0,79 $/m^3	Coût moyen de l'eau
Coût de l'électricité	8$/MWh	Valeur typique de 5-15 $/MWh
Coût du sable	200$/tonne	Prix incluant la livraison

Tableau : Prix de vente supposés pour les produits

Produits	**Produits substitués**	**Prix**	**Justification**
Huile pyrolytique	Combustible lourd vendu localement	330 $/t	70 $/baril /Estimation à long terme [1]
Biochar	Engrais agricole	200 $/t	Pour une application à moindre risque, vendu comme amendement du sol
Bois de construction	-	630 $/t	Prix moyen sur le marché des cinq dernières années [2]
Vapeur	Vapeur pour cogénération	22$/klbs	Prix moyen de la production de vapeur HP

Analyse de sensibilité réalisée pour l'analyse indépendante du logiciel

Pour approfondir la comparaison entre les trois configurations de pyrolyse rapide, une analyse de sensibilité a été réalisée sur certains paramètres jugés importants pour la rentabilité et la viabilité économique des technologies dans les différents scénarios de mise en œuvre. Comme il a été expliqué dans le Chapitre 2, une analyse de sensibilité effectuée sur des paramètres importants est nécessaire pour atténuer les risques[41]. Le Tableau présente ces paramètres et leur variation pour l'analyse de sensibilité.

Tableau : Paramètres étudiés pour l'analyse de sensibilité et leurs variations

Paramètres		Valeur	Justification
Prix de la bio-huile	Minimum	0.10$/L	16$/baril
	Cas de base	0.40$/L	70$/baril- Estimation à long terme
	Maximum	0.80$/L	140$/baril – Croissance du prix du pétrole
Soutien présumé pour les coûts d'investissement	Minimum	0%	Hypothèse d'aucun support disponible
	Cas de base	40%	Support du gouvernement
	Maximum	70%	Hypothèse d'un support maximal
Prix des résidus forestiers	Minimum	40$/tma	Faible coût de la biomasse
	Cas de base	70 $/tma	Cas de base
	Maximum	100 $/tma	Biomasse disponible plus loin
Estimation de l'Investissement en capital	Minimum	90%	Pas de sous-estimation de coûts
	Cas de base	100%	Comme décrit pour chaque configuration
	Maximum	150%	Hypothèse de coûts supplémentaires dus à l'intégration éventuelle d'un nouvel équipement ou d'une mise à jour.

La Figure présente les résultats de l'analyse de sensibilité effectuée sur le premier scénario. À premier regard, il est possible d'observer qu'un plus grand prix de vente pour la bio-huile permet de rapprocher toutes les configurations vers une rentabilité, ce qui est représenté par la ligne horizontale de 20% dans le graphique. L'augmentation du prix de la bio-huile peut aussi être représentée par un taux incitatif, qui pourrait être applicable pour le projet. Le prix de la bio-huile est un paramètre important à étudier, car l'incertitude en ce qui concerne le prix du baril des dernières années peut totalement changer le futur du projet. La variation de ce paramètre peut soit amener un le procédé dans les marges de la non-rentabilité, soit créer un revenu élevé et une bonne viabilité économique. Dans les résultats il est possible de remarquer qu'un petit prix de vente de la bio-huile ne fournit aucune valeur de TRI, ce qui signifie que le procédé n'est pas viable économiquement.

Le soutien présumé pour le CAPEX est un autre paramètre qui peut être critique pour la rentabilité du procédé, car il fait partie d'un environnement réglementaire essentiel pour la rentabilité des procédés. Il est important de mentionner que le soutien pour le coût d'investissement peut provenir des différents niveaux du gouvernement (fédéral, provincial ou municipal) ou d'autres sources indépendantes. Pour le premier scénario, la configuration RC est proche de la rentabilité si le soutien gouvernemental atteint 70%. Pour les deux autres technologies, même le niveau maximal de soutien gouvernemental ne peut les aider à atteindre la rentabilité, mais un progrès du TRI est quand même observable. Dans le cas contraire lorsqu'aucun soutien n'est disponible, l'impact sur le TRI est néfaste, étant donné que pour toutes les configurations sa valeur est en bas de 5%.

L'impact des prix des résidus forestier est celui attendu. Le fait de payer un prix plus élevé pour la biomasse entrante peut avoir un impact sur le retour sur investissement, en particulier pour les configurations MFB et RC, où le TRI diminue en bas de 5%.

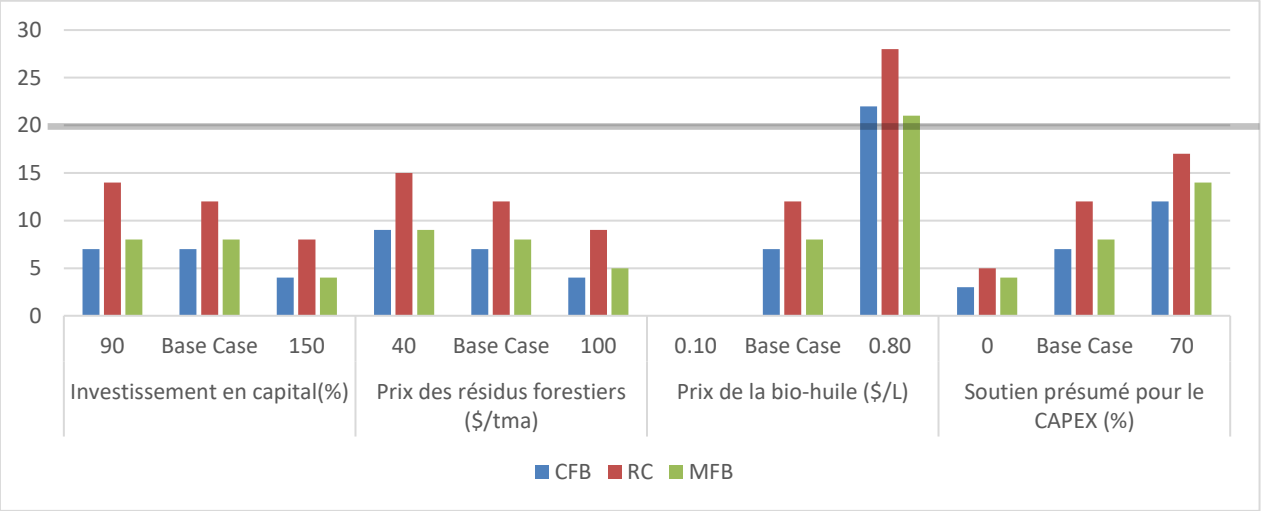

Figure : Analyse de sensibilité effectuée sur le premier scénario: Procédé de pyrolyse rapide sans intégration

Il est important d'étudier cette variation dans le cas où lors d'une période la biomasse entrante sera disponible dans un rayon plus grand et donc son prix d'achat et de transport pourra devenir plus grand.

En ce qui concerne les coûts d'investissement, comme prévu, ce paramètre a une influence significative sur le retour sur investissement. À un stade précoce de la conception, le coût d'investissement relatif peut être beaucoup plus important que les estimations initiales, et il est donc

important d'analyser ce paramètre et d'observer son impact sur les configurations, dans le cas où les coûts seraient plus grands. Un coût plus élevé de 150%, que celui initialement prévu, a un impact négatif sur les technologies. Pour les 3 configurations, il y a une diminution de 4% pour le TRI. Cela montre clairement qu'il est fondamental d'avoir une bonne estimation dès le début pour éviter les coûts supplémentaires, qui pourraient remettre en question la viabilité économique de la mise en œuvre. Par conséquent, il est également essentiel d'utiliser une méthodologie d'évaluation économique comme le LBA pour éliminer le plus possible les incertitudes et les risques reliés aux coûts.

La Figure démontre les résultats de l'analyse de sensibilité pour le deuxième scénario. Les mêmes variations que pour le premier scénario peuvent être observées. Cependant, la différence est au niveau du cas de base, qui pour toutes les configurations est au-dessus de 20%, ce qui fait en sorte que pour des variations bénéfiques le TRI augmente encore plus.

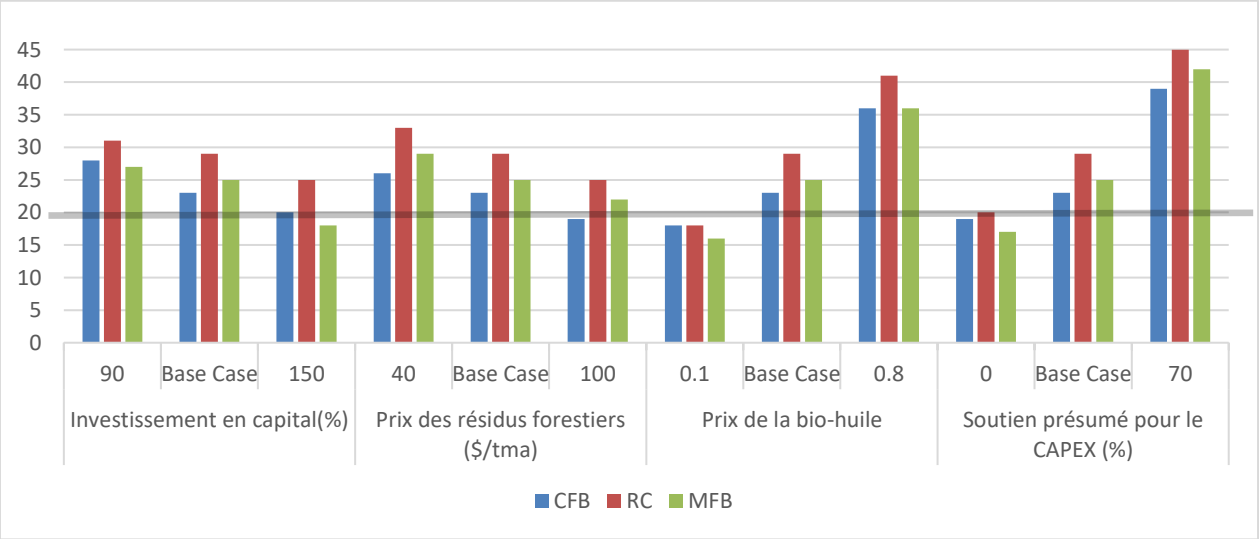

Figure : Analyse de sensibilité effectuée sur le deuxième scénario: Intégration du procédé de pyrolyse rapide à une scierie existante

Encore une fois, le TRI est plus sensible au prix de la bio-huile et au soutien pour le CAPEX. Des valeurs autour de 35% sont atteintes pour les trois configurations lorsque le soutien et le prix de vente sont à leur maximum. D'autre part, un prix de vente plus bas a ramené toutes les technologies sous le TRI cible de 20%, ce qui démontre évidemment l'impact d'un prix du baril plus bas sur le marché. De plus, l'absence du soutien pour le CAPEX peut entrainer des conséquences notables sur

la rentabilité et viabilité économique des trois technologies, car le TRI est plus faible que dans le cas de base. D'autre part, le soutien maximal crée une amélioration évidente des TRI du RC et du MFB.

Il est donc possible de conclure que la rentabilité du projet et le TRI sont très sensibles aux différents paramètres choisis. Il est aussi important de mentionner que pour le premier scénario d'implémentation avoir un plus grand prix de vente pour la bio-huile et un soutien maximal du gouvernement pourrait largement améliorer le retour sur l'investissement et la rentabilité d'un procédé de pyrolyse rapide mis en œuvre sans intégration. En revanche, comme il a été démontré dans les résultats et avec l'analyse de sensibilité, intégrer le procédé de pyrolyse rapide à une scierie, influence beaucoup la rentabilité du projet ce qui peut être bénéfique pour la compagnie. En ce qui concerne les configurations étudiées, le RC se distingue des deux autres configurations quant à sa performance économique.

ANNEXE D ANALYSE MULTICRITÈRE

Indicateurs de performance et métriques disponibles dans I-BIOREF

Le tableau suivant détaille sur les catégories de métriques et indicateurs de performance qui se retrouve dans l'outil d'aide à la décision I-BIOREF

Tableau : Catégories de métriques disponibles dans I-BIOREF

Catégorie de métriques*	Nombre de métriques	Caractéristiques des métriques
Performance économique	21	Les métriques disponibles sont différentes unes de l'autre, avec des interprétations différentes. Certaines représentent la rentabilité du projet, d'autres la robustesse, l'efficacité du capital ou la valeur ajoutée de l'entreprise
Performance environnementale	15	Les métriques de cette catégorie permettent de calculer le stress sur l'environnement avec la génération de déchets, en mettant de l'avant les émissions de GES, l'intensité carbone et les émissions annuelles du projet. Deux métriques de séquestration du carbone sont également calculées en lien avec le nombre d'années nécessaires pour compenser les stocks de carbone forestier.
Analyse de cycle de vie (ACV)	16	Les métriques de l'ACV sont divisées en cinq catégories liées aux catégories d'indicateurs utilisées pour une évaluation habituelle de l'ACV, à savoir : la santé humaine, la qualité de l'écosystème, le changement climatique, les ressources et l'empreinte de l'eau.
Socio-économique	5	Les emplois directs et indirects, ainsi que l'attrait du projet envers la main-d'œuvre et l'acceptation de l'économie locale sont représentés.
Réglementation	7	Les indicateurs des politiques et réglementations ont été mis en place à différents niveaux dans les intrants et ils sont représentés par les crédits de carbone ou les incitations qui devraient être considérées

** Une catégorie de métriques sur la circularité est en cours d'élaboration, où des métriques représentatives de la des déchets et de la circulation du carbone seront calculés*

Choix de critères pour l'analyse multicritère

Le tableau suivant présente la base de calcul et donc les indicateurs de performance reliés aux métriques utilisés pour la deuxième étude de cas, suite à un triage.

Tableau : Base de calcul pour les métriques choisies

Métrique	Base de calcul
TRI	TRI pour lequel $\sum_{i=0}^{Durée\ du\ projet} \frac{Fonds\ de\ roulement_{Année\ i}}{(1+TRI)^i} = 0$
EBITDA	EBITDA= Revenu-Coûts d'exploitation
CAPEX	CAPEX= Investissement en capital fixe+ Autres coûts
Intensité carbone des produits (CIBP)	CIBP=$\frac{Émission\ GHG\ annuelles\ du\ projet\ de\ bioraffinage}{Taux\ de\ production\ annuel\ de\ produits\ de\ bioraffinage}$
Nombre total d'emploi crées (TJC)	TJC= Emplois directs +Emploi Indirects+ Emploi Induits* Les emplois indirects sont représentés par les emplois dans les secteurs industriels soutenant les activités de la bioraffinerie et les emplois induits sont les dépenses des ménages pour les emplois directs et indirects créés.

* *Calculé en utilisant la capacité nominale de l'usine de bioraffinage et en multipliant des facteurs représentatifs de l'impact général du projet de bioraffinage sur l'économie locale.*

Hypothèses pour l'analyse économique

Le tableau suivant présente les prix de vente pour les quatre types de biocarburants, ainsi que le taux incitatif utilisé pour les trois premiers produits. Ces prix ont été utilisés pour l'obtention des revenus de la deuxième étude de cas.

Produits	Prix	Justification
Diesel d'origine fossile	0.70$/L	Prix entre Janvier et Avril 2022: 0.70$/L-1.07 $/L [3]
Essence d'origine fossile	0.84$/L	Prix entre Janvier et Avril 2022: 0.84$/L-1.1 $/L [3]
Kérosène d'origine fossile	0.65$/L	Prix entre Janvier et Avril 2022: 0.65$/L-1.03 $/L [3]*
Hydrocarbures lourdes (Carburant Marin)	0.48$/L	Prix sur le marché [4]
Taux incitatif sur les biocarburants	50% d'augmentation du prix des produits fossiles	Politique gouvernementale nominale avec norme de carburant à faible teneur en carbone

Tableau : Prix de vente supposés pour les produits

**Les prix des derniers mois ont augmenté pour des raisons géopolitiques. Les prix de janvier 2022 ont été considérés pour ce travail.*

Liste de référence Annexe D

[1] Deloitte, "Oil and gas price forecast: New realities for energy security and decarbonization," Calgary, 2022. [En ligne]. Disponible: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/energy-resources/ca-en-energy-resources-industrials-o-g-price-forecast-report-Q2-fy23-aoda.pdf

[2] Trading Economics. (2022) Lumber. [En ligne]. Disponible: https://tradingeconomics.com/commodity/lumber

[3] EIA, U.S. Energy Information Administration. (2022) PETROLEUM & OTHER LIQUIDS. [En ligne]. Disponible: https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_m.htm

[4] Ship&Bunker. (2022) LA / Long Beach Bunker Prices. [En ligne]. Disponible: https://shipandbunker.com/prices/am/nampac/us-lax-la-long-beach#IFO380