

Proposition d'un modèle d'évaluation de la soutenabilité intégrant la méthode d'analyse du cycle de vie à l'optimisation multiobjective de la chaîne logistique : cas des bioraffineries intégrées aux secteur des Pates et Papiers

BECHIR BEN DAYA¹, MUSTAPHA NOUR EL FATH²

¹ UNIVERSITÉ LAVAL
CIRRELT, QC Canada
bechir.ben-daya.1@ulaval.ca

² UNIVERSITÉ LAVAL
CIRRELT, QC Canada
mustapha.nourelfath@gmc.ulaval.ca

Résumé - Le passage d'une économie classique à taux de croissance infini à une économie responsable qui reconnaît le droit des générations futures à satisfaire leurs besoins est la bataille qu'il ne faut jamais rater. La déclinaison industrielle de l'économie responsable est l'ensemble des entités fortement intégrées qui s'approvisionnent des matières premières renouvelables et respectant l'environnement dont les bioraffineries. Mesurer la durabilité (soutenabilité) de ces dernières entités est une question fortement soulevées au niveau de la recherche scientifique à plus haut niveau. On présente au préalable une revue de littérature sur le sujet avant de proposer un modèle d'évaluation de la soutenabilité intégrant la méthode d'analyse du cycle de vie à l'optimisation multiobjective de la chaîne logistique. Ce modèle est confectionné selon une démarche multiniveaux intégrant l'analyse multicritères pour évaluer la soutenabilité des bioraffineries intégrées dans le secteur des pâtes et papiers au Canada.

Abstract - The transition from a traditional economy to a responsible economy that recognizes the right of future generations to meet their needs is the battle that we should never miss. The industrial declination of each responsible economy was the biorefineries highly integrated and having renewable raw materials as feedstock and respecting the environmental burden. Measuring Sustainability of biorefineries is a strongly issue addressed at the highest level of scientific research. Prior, we present a review of literature on the subject before proposing a multi-objective model integrating life cycle analysis to the supply chain optimization. This model is resolved using an approach integrating multi criteria analysis to assess the sustainability of integrated biorefineries in the Canadian pulp and paper sector.

Mots clés - Soutenabilité, Bioraffinerie, Analyse du cycle de vie LCA, Chaîne logistique, Optimisation multiobjective.

1 INTRODUCTION

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2010), la consommation totale de l'énergie dans le monde va augmenter de 50% pour passer de 5.22×10^{11} GJ en 2007 à 7.8×10^{11} GJ en 2035. Cependant, Les réserves en ressources non renouvelables dans le monde sont limitées et sont en disproportion avec le rythme de croissance de la consommation et des besoins des générations futures. Les minéraux et les hydrocarbures viennent en tête de ces biens limités, fortement exploités et dont l'industrie est fortement dépendante notamment dans les pays industrialisés. Cette situation a donné naissance à un mode de développement durable se matérialisant par la genèse d'un modèle industriel dit bioraffineries appelé à cadrer avec les paradigmes de la soutenabilité.

Les Bioraffineries de Première Génération (BRF 1G) s'approvisionnent en biomasses provenant des Agro-cultures de plantes sucrières et oléagineuses pour produire des biocarburants (bioéthanol et biodiésel). Leur exploitation a accusé des conflits avec les aspects environnementaux et sociaux dont l'exploitation des terres agricoles et l'utilisation excessive d'eau douce, des fertilisants chimiques et des pesticides. Cette situation embarrassante atteint à la notion de soutenabilité et suscite les chercheurs et les décideurs de la politique économique et environnementale dans les pays développés à réagir en conséquence pour en trouver des issues honorables quant au modèle à promouvoir conformément aux exigences de la soutenabilité.

Le modèle industriel émergent dit Bioraffineries de Deuxième Génération (BRF 2G) vient pour pallier aux anomalies suscitées et propose de s'approvisionner d'une biodiversité de biomasses non destinés à l'alimentation humaine avec une capacité de recyclage importante et un minimum d'émissions et de rejets. Toutefois, ce modèle demeure en phase expérimentale et rencontre de vrais problèmes d'implémentation à cause d'un défaut de validation technico-économique rassurante. Ce modèle s'approvisionne, entre autres, des déchets forestiers qui appartiennent au système d'équilibre universel d'échange de carbone à travers le phénomène de photosynthèse et de décomposition bactérienne. L'insuffisance de la capacité de séquestration du carbone renvoie le dioxyde de carbone non absorbé dans l'atmosphère. Cette dernière situation participe à l'échauffement du globe terrestre par l'amplification de l'effet de serre.

Le coût d'investissement dans les projets de bioraffineries demeure très élevé d'autant plus que la viabilité technologique laisse à désirer. Ce contexte pousse les décideurs à chercher des issues d'implémentation et d'expérimentation au sein de projets récepteurs actifs. Plusieurs pays au monde préfèrent le secteur des pâtes et papiers pour incubé ces projets dont la Suède, l'USA et le Canada. Toutefois, la décision d'intégration des BRF 2G doit cadrer avec une vision stratégique qui confronte les diagnostics internes de forces et faiblesses du secteur réceptif aux diagnostics externes sur les opportunités et menaces des projets de BRF. Ainsi, la planification stratégique doit étoffer l'optimisation de la chaîne logistique pour une implémentation soutenable du projet d'intégration.

De ce qui précède, un outil métrologique robuste est requis pour évaluer, voire optimiser la soutenabilité de l'intégration

des BRF 2G dans le secteur des pâtes et papiers à travers une gestion responsable et flexible de sa chaîne logistique au niveau de l'approvisionnement en ressources, de la sélection des technologies propres de conversion et des produits qui respectent l'environnement tout au long de leur cycle de vie.

Cette communication propose un outil d'évaluation de la soutenabilité d'intégration des BRF 2G dans le secteur des Pâtes et Papiers. Après avoir présenté une revue de littérature sur les méthodes d'évaluation de la soutenabilité, nous présentons l'outil d'évaluation proposée.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

On présente ci-après, une revue de littérature concernant l'évaluation des différents aspects de la soutenabilité avant de traiter les outils proposés pour évaluer et optimiser la soutenabilité des produits bioénergétiques réalisés dans le cadre des bioraffineries intégrées au secteur des pâtes et papiers.

2.1 Evaluation des différents aspects de la soutenabilité

L'évaluation de la soutenabilité se fait à travers l'évaluation de ses aspects économiques, environnementaux et sociaux (figure 1).

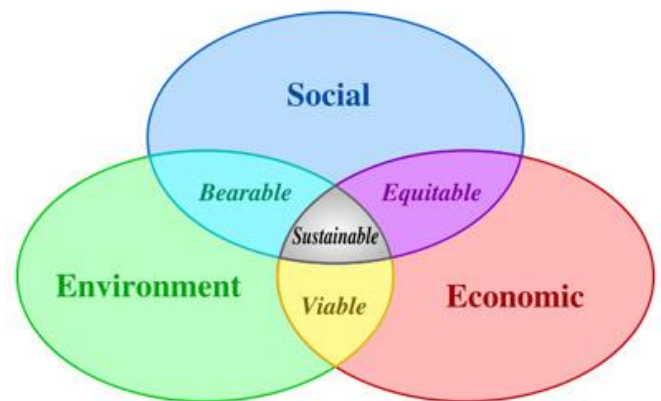


Figure 1 : triple bottom line approach

2.1.1 Évaluation économique des bioraffineries :

L'évaluation économique d'un projet est exprimée dans le cadre de l'optimisation de la chaîne logistique à travers des agrégats prévisionnels dont essentiellement la valeur actuelle nette (VAN). Cette dernière tient compte de la période de l'investissement, de la politique fiscale en matière de l'imposition directe, des taux de rémunération des emprunts, de la situation du marché d'approvisionnement et de la demande. Les objectifs derrière l'utilisation de ce puissant outil sont essentiellement les possibilités de traiter des alternatives logistiques et technologiques. Dans le cas de l'espèce, l'optimisation de la chaîne logistique permet de traiter des alternatives de biomasses comme matière première [Ghezzaz et Stuart, 2011], des alternatives de processus de production [Uslu et al, 2008], des technologies de conversion et la façon de choisir les fournisseurs [Caputo et al, 2005] et [Elghali et al, 2007] et des produits potentiels à réaliser

[Sarkar et al, 2011]. L'optimisation vise la sélection des voies de production, d'approvisionnement et de distribution les plus prometteuses de point de vue économique (minimisation des coûts ou maximisation des profits).

L'évaluation de la faisabilité des projets, dont l'intégration des bioraffineries dans des projets existants, fait aussi l'objet de certains travaux de recherches [Sarkar et Kumar, 2009] et [Bajpai, 2012]. [Machani et al, 2013] a présenté des outils d'aide à la décision pour l'optimisation globale d'une bioraffinerie intégrée dans une activité de Pâtes et Papier. En effet, la modélisation de la chaîne logistique renseigne sur la configuration la plus avantageuse de point de vue économique et ce, quelque soit l'outil mathématique qui pilote cette optimisation. Cette méthode d'évaluation permet l'élaboration d'un modèle d'affaires avec toutes ses déclinaisons décisionnelles au niveau stratégique, tactique et opérationnelle. Ce qui confirme son utilité pour exprimer les paramètres du système d'intégration des BRF 2G dans un ancien système de production actif.

2.1.2 Évaluation environnementale des bioraffineries

Nombreux outils d'évaluation environnementale sont disponibles actuellement, dont essentiellement les méthodes SFA (Substance Flow Analysis), EF2 (Substance Flow Analysis 2), EMS3 (Environmental Management System), et MFA4 (Material Flow Accounting) [Finnveden et Moberg, 2005] Toutefois, la méthode LCA ('Life Cycle Assessment' ou analyse du cycle de vie), renforcée par son adoption et normalisation par les institutions des Nations Unies (Normes ISO 14040 et 14044), est la plus fiable pour évaluer l'impact sur l'environnement d'un produit, activité ou processus. Cet outil est utilisé pour améliorer les processus de production et fournir une base solide pour des décisions éclairées en matière environnementale [Thomas et al, 1995].

Pareil à l'activité économique, l'évaluation de l'impact sur l'environnement peut avoir comme objectif l'évaluation d'un projet [Neupane et al, 2011], l'évaluation des alternatives de biomasses utilisées comme matières premières [Petersen Raymer, 2006] ou bien l'évaluation des voies de conversions de biomasses [Bright et Strømman, 2009] et des produits selon les voies thermo-chimiques ou biochimiques [Steubing et al, 2011], [Herrmann et al, 2014], [Amores et al, 2013]. Classiquement, la méthode LCA avait essentiellement comme objectif de produire des comparaisons entre les impacts des biocarburants par rapport au carburants à base de combustibles fossiles [Cavalett et al, 2013], [Muñoz et al, 2014] et [Wang, 2010] ou bien pour comparer les technologies de captures de CO₂ [Koiwanit et al, 2014]. La question de l'évaluation est plus compliquée, de point de vue portée, si l'optimisation concernait plusieurs aspects de l'impact sur l'environnement ce qui suppose, selon la logique de modélisation, plusieurs objectifs avec les contraintes s'y rattachant [Azapagic et Clift, 1999] et [Komly et al, 2012]. Cette dernière situation nécessite une modélisation multi-objective ou l'optimum se transforme en un ensemble de solutions optimales dans la zone de Pareto. Cette zone exprime le lieu de transaction entre les objectifs où aucun objectif ne peut s'améliorer sans la dégradation de l'autre.

2.1.3 Évaluation sociale

D'après le 'guidelines SLCA' (UNEP, 2009) les méthodes ELCA (désignée par LCA dans ce document) et SLCA (social LCA) peuvent fournir des informations utiles à la

prise de décisions mais ne peuvent pas fournir des informations pour la prise de décision concernant la production d'un produit déterminé. De ce fait, un SLCA fournit des informations complémentaires à l'ELCA pour que l'image soit plus complète à propos des impacts du cycle de vie des produits.

La méthode SLCA propose d'évaluer l'impact social d'un produit lors de son cycle de vie. L'idée principale derrière cette méthode est d'évaluer les impacts sociaux des produits ou services d'une manière similaire à la méthode ELCA [Arvidsson et al, 2014]. Le dernier auteur considère que la méthode SLCA n'est pas encore bien développée, mais il est toujours possible d'en esquisser plusieurs applications potentielles que l'entreprise puisse appliquer et intégrer dans sa gestion.

Toutefois, [Jørgensen et al, 2012] considère, qu'à travers l'analyse sociale du cycle de vie d'un produit, des impacts contradictoires pourront être enregistrés. En fait, l'amélioration du bien être des employeurs va se propager sur les coûts des produits et va impacter négativement les consommateurs qui vont acheter plus cher le produit concerné. Des interférences avec l'LCA sont aussi constatées au niveau des étapes de la méthodologie elle-même (Guidelines, UNEP, 2009) mais aussi au niveau de certains impacts qui ont les vocations environnementaux et sociaux en même temps. L'illustration la plus indiquée c'est l'atteinte à la santé humaine qui est considérée comme impact environnemental et en même temps un impact social. D'après le 'Guidelines' suscités, le but ultime d'une technique SLCA est de promouvoir l'amélioration des conditions sociales tout au long du cycle de vie d'un produit. Le bien-être humain constitue, à cet effet, un concept central qui doit être défini et articulé. Ainsi, de nombreux termes sont utilisés pour se référer au bien-être humain dont les plus courants sont la qualité de vie, le niveau de vie et le développement humain.

Toutefois, [Jørgensen, 2013] considère, que cette méthode n'est pas suffisamment mature pour faire ce qu'une méthode est censée faire. En effet, pour servir d'outil d'aide à la décision, la méthode SLCA doit aboutir à la possibilité d'améliorer positivement un contexte social à partir du cycle de vie d'un produit. Le cycle de vie doit être bien distingué et cerné et les entités microéconomiques doivent permettre l'accès aux informations requises à ce propos pour que la méthode soit utile. Le choix doit porter sur les thématiques sociales les plus intéressantes pour pouvoir faire de cette méthode un outil d'aide à la décision. L'auteur a fait indirectement soulever deux niveaux d'intérêts au titre de cette méthode :

- Celui de l'entreprise qui voulait tirer bénéfice de l'amélioration du profil social d'un produit à travers son cycle de vie ce qui procure à la méthode SLCA la qualité de méthode d'aide à la décision ;
- Et celui des autorités politiques qui visent par cette méthode de mesurer un impact social positif pour juger de la réussite d'un projet de point de vue social.

La question centrale se pose à propos de la corrélation entre la soutenabilité et l'amélioration de la situation sociale à travers la méthode SLCA. [Jørgensen, 2013] confirme que l'intérêt pratique n'est pas encore bien exprimé, vis-à-vis de l'utilisation de cette méthode, ce qui cause un déséquilibre au niveau de son approche d'évolution de haut en bas. Ainsi, son rôle en tant qu'outil de mesure de l'aspect social de la

soutenabilité reste à confirmer. [Jørgensen et al, 2012] s'interroge si le développement de la méthode SLCA est une approche fructueuse pour l'amélioration des conditions sociales à travers le cycle de vie du produit ?

[Domac et al, 2005] a étudié, en guise de revue, les aspects et motivations socioéconomiques des projets d'implémentation de la production des bioénergies. Il considère que la tendance vers l'exploitation énergétique à partir de la biomasse n'a pas été suffisamment communiquée à la communauté et les parties prenantes. Il voit en outre, que ce dossier est assez complexe au niveau de la mesure de l'impact social vu l'absence d'une terminologie précise qui définit les concepts et indicateurs de mesure d'une façon correcte loin de toute ambiguïté. En revanche, il reconnaît l'impact positif que peut avoir ces projets sur les communautés en matière de stabilité sociales, d'amélioration du bien être, de développement régional et de la dynamisation du réseau logistique et de marché.

2.2 Évaluation de la soutenabilité des bioraffineries

L'évaluation de la soutenabilité des bioraffineries a été, selon certaines études, motivées entre autres par l'augmentation de l'exploitation et l'extraction des biomasses ligneuses pour des raisons énergétiques ce qui nécessite des éclaircissements aux décideurs à ce sujet [den Herder et al, 2012], [Werhahn-Mees et al, 2011], [Päivinen et al, 2012] et [Krajnc et Domac, 2007]. Cependant, les méthodes adoptées pour cette évaluation sont assez multiples et récentes.

Ces méthodes se répartissent autour de deux tendances :

- La méthode LCSA 'life cycle sustainability assessment' qui permet, selon certains travaux de recherche [Cinelli, 2013], [Benoît et al, 2010] et [Swarr et al, 2011] ajoutée aux efforts de standardisation en cours, de résoudre l'essentiel des défis d'évaluation de la soutenabilité.
 - o [Kloepffer, 2008] présente le projet de la méthode LCSA comme une somme des trois méthodes LCA (Life cycle assessment), LCC (Life Cycle Cost) et SLCA (Social Life cycle assessment). L'évaluation proposée par l'auteur se fait d'une façon séparée pour chaque aspect.
 - o D'autres propositions de standardisation de la méthode LCSA ont été faites :
 - Révision de l'LCA pour intégrer les différents aspects de la soutenabilité en touchant aux normes ISO 14040 et 14044 ;
 - SLCA ajoutée à la nouvelle norme ISO en 'écoefficiency' (ISO 2012) qui égalise LCA et LCC ;
 - LCA ajoutée d'une analyse socioéconomique (méthode proposée par l'Institut Allemand des recherches en environnement en 2012).
- S'en servir du modèle managérial connu sous la dénomination de management de la chaîne logistique enrichi par les autres aspects de la soutenabilité (SCSM : Sustainable Supply Chain Management).

Enrichir la modélisation de la gestion de la chaîne logistique par d'autres méthodes d'évaluation pour exprimer tous les aspects de la soutenabilité sera sollicité et souhaitable [Liu et al, 2014]. L'intégration de la méthode LCA et SLCA à la

chaîne logistique fait partie des nouvelles tendances pour conférer à la chaîne logistique le label de soutenabilité. L'aspect social est représenté, dans les cas les plus simples, par la création d'emplois alors que l'impact sur l'environnement a été souvent représenté par l'indicateur GWP (Global Warm Potential) ou/et l'indicateur sur l'Ecosystème EI99 [Cambero et Sowlati, 2014]. Cependant, d'après plusieurs contributions, c'est l'alliance entre les aspects économiques et environnementaux qui prévalent pour exprimer l'évaluation de la soutenabilité [Shabbir et al, 2012] et [Gebreslassie et al, 2009]. Cependant, les décideurs politiques considèrent que l'aspect socioéconomique se présente comme la motivation principale de l'émergence des projets de bioraffineries [Domac et al, 2005].

2.3 Optimisation de la soutenabilité

L'optimisation de la soutenabilité est multiobjective de fait. Chaque aspect étudié est représenté par un ou plusieurs objectifs selon le contexte de modélisation envisagé. Ainsi, les objectifs environnementaux particulièrement peuvent englober plusieurs thématiques dont la consommation des énergies non renouvelables, l'indicateur sur le changement climatique et les autres indicateurs sur la santé humaine, l'écosystème et le changement de la vocation des terres etc. Chaque indicateur ou combinaison d'indicateurs fait un objectif à considérer dans la modélisation multiobjective.

On site, à titre indicatif, certains cas d'optimisation multiobjective de projet de bioraffinerie et les fonctions envisagées à l'optimisation.

[Liu et al, 2014] a étudié la conception d'une chaîne logistique soutenable d'un réseau de bioraffineries en Chine par une modélisation multiobjective. Selon cette communication, trois voies de production de biocarburants ont été considérées à savoir le Bioéthanol, le Biométhanol, et le Biodiésel. Pour atteindre la configuration optimale, un compromis a été analysé selon les conditions de transaction entre les objectifs environnementaux et économiques.

La même modélisation multiobjective a été appliquée pour l'optimisation de la conception soutenable de bioraffinerie produisant des biocarburants par voie de pyrolyse rapide [Gebreslassie et al, 2013] et par voie de gazéification pour le même auteur. Les paramètres optimisés concernent l'ensemble des alternatives à adopter pour une conception soutenable de la BRF 2G. Les fonctions économiques, environnementales et énergétiques ont été étudiées.

2.4 Indicateurs de la gouvernance et management de la soutenabilité

La gouvernance est une notion assez importante qui décrit le management de la soutenabilité prévu par la norme sur la responsabilité sociétale ISO 26000. En effet, toute entité opère dans un cadre de plus en plus complexe au niveau partenariat, législation, marché, etc. ce qui rend vitale la manière dont ces entités s'inscrivent dans leur environnement pour leur continuité et prospérité. La gouvernance est, à cet effet, un paramètre indicateur de la performance globale. La norme sus-indiquée décrit les lignes directrices pour agir de

façon socialement responsable en matière d'éthique et de transparence afin de renforcer l'immunité de l'entité vis-à-vis des aléas de son environnement.

Si la soutenabilité est considérée comme l'interférence entre les aspects économiques, sociaux et environnementaux, la gouvernance sera la meilleure façon de réaliser l'articulation de ces différents aspects. Pour cela, elle peut servir d'indicateur de la soutenabilité qui est, selon l'ISO 26000, la meilleure méthode pour en contrôler la performance. Toutefois, L'ISO 26000 ne recommande pas d'indicateurs spécifiques pour la soutenabilité alors que le GRI (Global Reporting Initiative) du 'Global compact' propose un éventail d'indicateurs liés aux composants de la soutenabilité.

La gouvernance de l'organisation publique, telle que définit par l'ISO 26000, « est le système par lequel l'organisation prend des décisions et les applique en vue d'atteindre ses objectifs ». Ainsi, pour répondre aux exigences de la soutenabilité, l'organisation publique doit promouvoir et perfectionner sa gouvernance.

La norme ISO 26000 « répond à la nécessité toujours plus grande à l'échelon mondial, d'établir des meilleures pratiques claires et harmonisées sur la façon d'assurer l'équité sociale, la santé des écosystèmes et la bonne gouvernance organisationnelle, avec l'objectif ultime de contribuer au développement durable» selon le rapport, [ISO 26000

Responsabilité sociétale, 2011]. Ces notions sont capitales pour la détermination d'une esquisse d'indicateurs selon les opportunités permises par le modèle d'évaluation et des données éventuelles qui puissent enrichir la scène à propos de la gouvernance des P&P lors de l'intégration des BRF 2G. Les critères d'évaluation de la soutenabilité des produits bioénergétiques a fait l'objet d'un projet de normalisation dont la première version a été votée le 19 Novembre 2014. Ainsi, vu le vide au niveau des méthodes d'évaluation, on propose de traiter cette question selon une évaluation multiniveaux ce qui va permettre de décomposer le système d'évaluation et de l'enrichir par l'ensemble des critères non quantifiables. Ci-après une explication sommaire de l'ensemble des niveaux du modèle proposé.

Niveau 1 : Evaluation de l'impact sur l'environnement

C'est le premier niveau de modélisation qui propose d'évaluer l'impact sur l'environnement du système objet de l'étude. Cette phase va fournir un ensemble de paramètres permettant de modéliser l'aspect environnemental dans le cadre d'un modèle mathématique d'optimisation multiobjectif. Dans le cas d'espèce, les paramètres sont constitués par l'émission des Gaz à Effet de Serre (GES) agrégés par l'indicateur GHG (Green House Gas) au niveau des différents processus du système dont la logistique de transport pour l'approvisionnement et la distribution. La figure 2 illustre la modélisation LCA pour ce dernier indicateur.

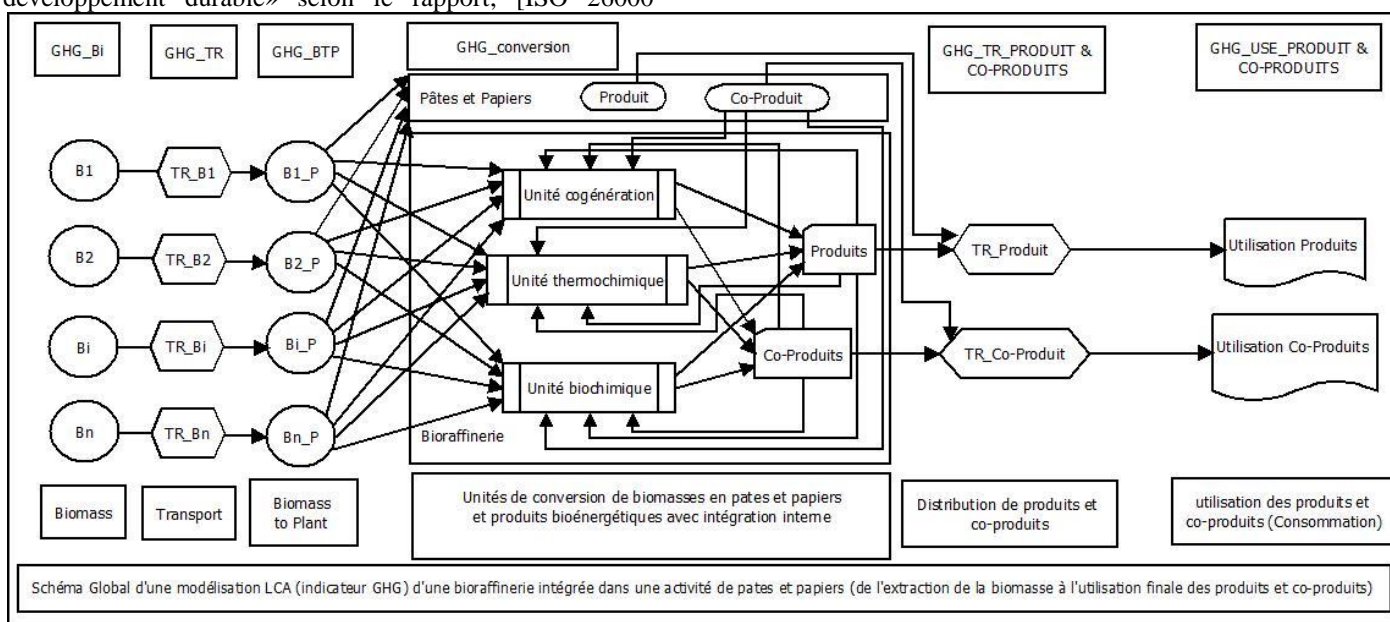


Figure 2 : Modélisation LCA de l'activité bioénergétique pour l'indicateur GHG.

3 OUTIL D'ÉVALUATION PROPOSÉ

Le dernier schéma met en évidence l'ensemble des éléments de la modélisation LCA qui couvre les étapes d'approvisionnement, de conversion, de distribution et d'utilisation des produits bioénergétiques.

Niveau 2 : Ce niveau concerne l'optimisation multiobjective de la chaîne logistique. L'optimisation des objectifs économiques et environnementaux vont permettre d'identifier une zone d'optimalité dite zone de Pareto qui permet certaines transactions entre les deux objectifs sans que l'optimalité globale change. La transaction entre les objectifs antagoniques nécessite un ensemble de critères qui puissent être évalués ou quantifiés éventuellement dans le cadre de l'outil d'aide à la décision multicritère.

Niveau 3 : Evaluation multicritères cette phase permet de confronter les différents critères économiques et environnementaux de la zone Pareto avec des scénarios de critères sociaux tout en déterminant l'effet sur l'activité économique de chaque choix social (effet positif ou négatif). Le résultat va nous renseigner sur les aspects de la solution optimale.

Niveau 4 : Evaluation de la performance de la soutenabilité à partir des critères de la norme ISO 13065 (Sustainability criteria for bioenergy) et la norme ISO 26000 sur la responsabilité sociale ou la gouvernance de la soutenabilité.

La figure 3 explique sommairement ces différents niveaux d'évaluation.

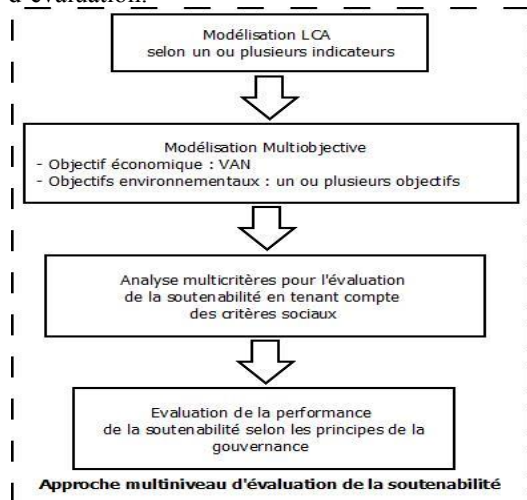


Figure 3 : Approche multi-niveau d'évaluation de la soutenabilité

Pour atteindre les objectifs annoncés plus haut, on présente les éléments de la méthodologie envisagée :

- Évaluation préalable de l'impact sur l'environnement à partir d'une analyse du cycle de vie des produits selon deux indicateurs standardisés (Le Global Warm Potential GWP et 'Ecosystem Indicator99' EI99). Le résultat de cette évaluation procurera au système étudié des paramètres qui serviront :
 - o Au modèle multiobjective : les indicateurs par étape du système à évaluer ;
 - o A la comparaison de l'impact avec les produits de BRF 1G ;

- o A l'optimisation de la chaîne logistique du projet d'intégration et évaluation de la soutenabilité.
- Optimisation multiobjective qui confronte la performance économique à la minimisation de l'impact sur l'environnement. A signaler que la notion des flux physiques joue le rôle de jonction entre les différents aspects considérés par l'optimisation ;
- Evaluation de l'impact social selon un ensemble de d'indicateurs transformés en critères au niveau de l'analyse multicritères ;
- Evaluation multicritères de la soutenabilité selon l'une des méthodes connues ;
- Production du modèle d'affaires soutenable et l'évaluation globale de la soutenabilité selon les principes de la gouvernance ;

En se basant sur le modèle [Machani et al, 2013], traitant d'une approche multiniveaux pour la conception d'un modèle d'affaires de BRF 2G intégrée pour les compagnies de Pates et Papiers, on propose d'élargir le champ de recherche en introduisant une autre avenue basée sur la notion du cycle de vie afin que le système décisionnel puisse se rabattre sur la dimension de la soutenabilité. On présentera ci-après, les phases les plus importantes du modèle envisagé comportant la modélisation LCA et son intégration dans le modèle multiobjectif global.

3.1 La méthode d'analyse du cycle de vie LCA

3.1.1 Le champ d'application : La méthode LCA s'applique sur tout le cycle de vie 'Cradle to Grave' des produits bioénergétique selon la figure 4.

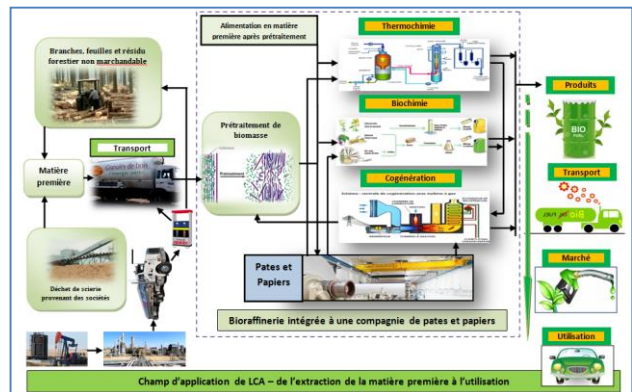


Figure 4 : champ d'application LCA

La BRF intégrée propose la production de biocarburants et de produits de cogénération (chaleur et électricité) usant des voies thermochimiques et biochimiques, selon la figure 4 précédente. L'unité fonctionnelle adoptée pour l'analyse de l'impact est le MJ, le litre, le m³ et le Kwh selon le produit bioénergétique concerné. L'impact visé englobe le transport, la fourniture de biomasses, la production des produits bioénergétiques ainsi que l'utilisation finale des différents produits. L'impact sur l'environnement est quantifié par les indicateurs GWP et éventuellement le EI99. L'indicateur GWP est une échelle relative qui compare l'impact

sur le réchauffement climatique d'un produit chimique donné, avec celle de la même masse de dioxyde de carbone où le GWP est égal à 1 par convention. Alors que l'indicateur EI99 fasse l'agrégation des impacts sur la santé humaine, la consommation des ressources non renouvelables et l'impact sur l'écosystème.

3.1.2 Analyse de l'inventaire

L'étape de l'analyse de l'inventaire recense les données d'entrée-sortie associés à l'exploitation de la bioraffinerie. Cet inventaire recense les émissions relatives à la biomasse, au transport de la biomasse, à la cogénération à la bioraffinage, à la distribution et à l'utilisation des produits bioénergétiques. Le gain éventuel des émissions induit par la bioraffinerie au niveau de la mission initiale de production de pâtes et papiers sera pris en compte. Une attention sera accordée aux flux de coproduits et d'énergies entre les deux systèmes de production comme illustré par la figure 2 plus haut. Les entrées de l'inventaire du cycle de vie peuvent être aussi extraites des bases de données environnementales standards qui stockent des données sur les émissions associées aux processus similaires.

3.1.3 Analyse d'impact

Au niveau de cette étape, l'inventaire des émissions sera caractérisé et agrégé selon un certain nombre d'indicateurs d'impact. Les indicateurs GWP et Eco-indicateur99 sont utilisés pour quantifier les impacts et dommages des différentes thématiques environnementales.

- GWP (Global Warm Potential) est l'indicateur du réchauffement global potentiel. Il est déterminé comme étant la somme de la GWP de chaque source d'émission dont les émissions provenant du transport de matières premières et de produits et les différentes émissions dues à l'exploitation de la bioraffinerie d'une façon générale ou bien de l'utilisation des produits après vente jusqu'à la fin de leur cycle de vie. C'est cet indicateur qui figure comme paramètre au niveau de la modélisation multiobjective sur toute la chaîne logistique comme illustré par la figure 2.

Eco-indicateur 99 : L'Eco-indicateur 99 propose 11 catégories d'impacts [PRé-Consultants The Eco-indicator 99, 2000] qui seront regroupées en 3 modèles de dégâts (dommages pour la santé humaine, la qualité des écosystèmes et l'épuisement des ressources non renouvelables). La modélisation multiobjective peut éventuellement être enrichie par cet indicateur ou bien par l'une des catégories d'impact qu'il en fasse l'agrégation.

3.1.4 Interprétation

L'évaluation de l'impact sur l'environnement procure un ensemble de paramètres qui caractérisent les produits étudiés. Ces paramètres ont trait à l'ensemble des consommations intermédiaires et des émissions selon les stades de cycle de vie. Ce qui permet :

- Différentes analyses sur les éléments qui participent gravement aux impacts sur l'environnement ;
- La comparaison avec d'autres produits différents (carburants à base de combustibles fossiles) ou similaires réalisés selon d'autres processus de conversion ;
- D'avoir des paramètres plus fines sur l'émission par unité de consommation (exemple : émissions relatives à un km de transport de biomasse ou de produits selon les conditions de transport et le carburant utilisé). Ces paramètres peuvent constituer des inputs pour la modélisation multiobjective.

3.2 Intégration des résultats de la modélisation LCA au modèle multiobjectif

La capacité de la chaîne logistique à gérer les flux financiers, physiques et d'informations permet d'intégrer tout aspect pouvant interférer avec ses flux. Ainsi, l'LCA étant que méthode d'évaluation de l'impact sur l'environnement d'un produit, service, processus ou activité puisse facilement intégrer l'optimisation de la chaîne logistique. Il y avait plusieurs niveaux d'intégration possibles de l'LCA à travers notamment les flux physiques de la chaîne logistique. On peut envisager trois niveaux de cette intégration tandis qu'il est possible d'en proposer plusieurs :

3.2.1 Intégration au niveau des différents flux physiques

Cette intégration peut concerner le flux des matières premières, des produits et de leur distribution. Dans ce cas, une modélisation LCA doit s'appliquer à chaque processus à part.

Nous désignons par processus :

- L'approvisionnement par type de biomasses (chaque type de biomasse est un processus LCA à part BM_P) ;
- Les technologies de conversion (chaque technologie est un processus $TECH_P$) ;
- La distribution et consommation des produits (chaque produit est un processus $PROD_P$ au niveau de la distribution, de la consommation et de la fin du cycle de vie).

Ainsi le nombre de processus à modéliser sera : $m * BM_P + n * TECH_P + p * PROD_P$ avec, m le nombre de type de biomasse, n le nombre de technologie de conversion et p le nombre de produits. Dans ce dernier cas, le domaine d'optimisation de la chaîne logistique peut englober certaines extensions lors d'une intégration d'un processus de recyclage ou pour représenter les interdépendances internes entre technologies de conversion.

Dans ce cas d'intégration au moins deux niveaux de détails puissent être envisagés :

- Le premier niveau concerne l'indicateur agrégé dont le GWP ou le EI99. On aura un ou plusieurs indicateurs par processus étudié ;
- Le deuxième niveau peut concerner un impact élémentaire dont le type d'émission (exemple CO_2). Ainsi, on doit adapter le modèle mathématique selon le niveau de détail retenu.
 - o Dans le premier cas le modèle suit les flux d'approvisionnement, de production, de distribution et d'utilisation finale d'une façon proportionnelle sachant que les flux physiques constituent les variables de décision dans un modèle à optimiser. Cette situation va permettre de transiger avec l'objectif économique dans le cadre d'une modélisation multiobjective et aussi de permettre l'analyse des impacts par processus et localiser les zones selon leur participation à l'impact. Il est à signaler en outre, qu'on peut modéliser autant d'indicateurs conformément à l'objectif préalable de l'étude envisagé.
 - o Dans le deuxième cas, il fallait prévoir dans le modèle tout le processus d'agrégation et de qualification des impacts avec les facteurs d'impact et le poids des différentes agrégations intermédiaires. La programmation du modèle dans ce cas va être plus lourde.

3.2.2 Intégration au niveau de l'équilibre de masse molaire pour les processus de conversion

Si le niveau de détail touche l'équilibre chimique au niveau des processus de conversion thermochimique et biochimiques, il faut déterminer l'équilibre massique à partir des réactions chimiques (masse molaire des différents composants chimiques faisant l'équilibre des réactions chimiques). Cette situation peut diverger du contexte réel qui ne peut être prouvé que par l'expérimentation vue que les conditions idéales pour une réaction chimique complète soit toujours difficile. En effet, les conditions de température, de pression, et du réacteur influence la réaction chimique dont l'émission fait partie.

Ce type d'intégration nécessite une modélisation au niveau de l'approvisionnement, de la conversion, de la distribution et de l'utilisation finale par type d'émission.

3.2.3 Intégration unique au niveau des flux de production

C'est la forme d'intégration la plus légère pour la modélisation de l'impact sur l'environnement. Toutefois, cette situation ne tient pas compte du détail du contexte d'approvisionnement et de conversion et ne permet pas en conséquence de localiser les zones hôtes de la chaîne en matière d'impact sur l'environnement.

Toutefois, et par objectif de souplesse, une combinaison de ces niveaux d'intégration est toujours possible. A ce titre, on peut adopter une méthode générique qui tient compte, selon le contexte du système et la disponibilité des détails d'inventaires, d'une sélection de niveau d'intégration par phase de la chaîne logistique. A titre d'exemple, on peut modéliser l'impact par indicateur pour chaque type de matière première consommée puis adopter l'équilibre de la masse molaire pour les réactions chimiques du processus de conversion pour déterminer les émissions propre à un produit bien déterminé et finir par adopter directement la valeur des impacts pour la distribution et la consommation finale à partir des revues de littérature. Cette situation prouve que la nécessité d'asseoir des standards pour gérer l'analyse du cycle de vie au sein de l'optimisation de la chaîne logistique demeure une nécessité. A l'heure actuelle, il faut pousser la recherche à ce niveau pour explorer les tendances d'évolution des outils d'évaluation de la soutenabilité.

En guise de récapitulation, l'évaluation de la soutenabilité d'intégration des bioraffineries est envisagée à partir d'un modèle hybride multiniveaux s'articulant respectivement sur les outils d'analyse et d'optimisation suivants :

- Une évaluation de l'impact sur l'environnement selon la méthode d'analyse du cycle de vie. L'impact peut être décrit par un ou plusieurs indicateurs selon le niveau de détail choisi comme s'est expliqué plus haut ;
- Une optimisation multiobjective de la chaîne logistique intégrant des objectifs économiques et environnementaux ;
- Une analyse du cycle de vie social S-LCA des produits en choisissant un partenaire à étudier (employeur, consommateur ou société) ;
- Une évaluation de la soutenabilité selon une analyse multicritère permettant une transaction optimale entre différents objectifs ;
- Une évaluation de la performance de la soutenabilité selon les principes de la gouvernance. Cette dernière notion est considérée, en outre, comme un quatrième aspect de la soutenabilité.

4 CONCLUSION

L'analyse du cycle de vie d'un produit selon ses différents aspects est l'approche la plus compacte de point de vue harmonie au niveau du champ d'étude dans le cas des analyses à postériori des systèmes. L'analyse selon cette approche se base sur les données comptables et financières des entités microéconomiques qui adopteront intuitivement des démarches d'optimisation de leur chaîne logistiques et/ou de compétitivité en général. Les tendances actuelles voulaient que la comptabilité décrive la traçabilité des opérations et fournissent l'inventaire des différents processus. Le management des déchets, le recyclage après consommation, l'allocation des intrants par produits et coproduits ainsi que l'émission de carbone font actuellement des thématiques de comptabilité et de finances. Dans ce contexte, la chaîne logistique peut être retrouvée dès que le système se stabilise sur des paramètres de soutenabilité. Les décideurs aujourd'hui transigent leur droit d'émission en bourse ce qui rend le management de ce droit une affaire environnementale à impact économique certain. La prise de décision en matière de soutenabilité mérite davantage d'outils métrologiques pour l'aide à la décision et autant de critères pour une articulation rationnelle entre les différents aspects antagoniques de la soutenabilité.

5 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Thomas N. Gladwin, James J. Kennelly, Tara-Shelomith Krause " Shifting Paradigms for Sustainable Development: Implications for Management Theory and Research", The Academy of Management Review, Vol. 20, No. 4, pp. 874-907, Oct. 1995
- [2] Machani M., Nourelfath M., D'Amours S. , "A scenario-based modeling approach to identify robust transformation strategies for pulp and paper companies" , International Journal of Production Economics, 2013.
- [3] H. Ghezzaz and P. Stuart, "Biomass availability and process selection for an integrated forest biorefinery," Pulp and Paper Canada, vol. 112, no. 3, pp. 19–26, 2011.
- [4] A. Uslu, A. P. C. Faaij, and P. C. A. Bergman, "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation," Energy, vol. 33, no. 8, pp. 1206–1223, Aug. 2008.
- [5] A. C. Caputo, M. Palumbo, P. M. Pelagagge, and F. Scacchia, "Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables," Biomass and Bioenergy, vol. 28, no. 1, pp. 35–51, Jan. 2005.
- [6] S. Sarkar, A. Kumar, and A. Sultana, "Biofuels and biochemicals production from forest biomass in Western Canada," Energy, vol. 36, no. 10, pp. 6251–6262, Oct. 2011.
- [7] S. Sarkar and A. Kumar, "Techno-economic assessment of biohydrogen production from forest biomass in western Canada," Transactions of the ASABE, vol. 52, no. 2, pp. 519–530, 2009.
- [8] B. Neupane, A. Halog, and S. Dhungel, "Attributional life cycle assessment of woodchips for bioethanol production," Journal of Cleaner Production, vol. 19, no. 6–7, pp. 733–741, Apr. 2011.

- [9] A. K. Petersen Raymer, "A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 7, pp. 605–617, Jul. 2006.
- [10] R. M. Bright and A. H. Strømman, "Life Cycle Assessment of Second Generation Bioethanols Produced From Scandinavian Boreal Forest Resources," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 13, no. 4, pp. 514–531, Aug. 2009.
- [11] B. Steubing, R. Zah, and C. Ludwig, "Life cycle assessment of SNG from wood for heating, electricity, and transportation," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 2950–2960, Jul. 2011.
- [12] M. den Herder, M. Kolström, M. Lindner, T. Suominen, D. Tuomasjukka, and M. Pekkanen, "Sustainability Impact Assessment on the Production and Use of Different Wood and Fossil Fuels Employed for Energy Production in North Karelia, Finland," *Energies*, vol. 5, no. 11, pp. 4870–4891, Nov. 2012.
- [13] W. Werhahn-Mees, T. Palosuo, J. Garcia-Gonzalo, D. Röser, and M. Lindner, "Sustainability impact assessment of increasing resource use intensity in forest bioenergy production chains," *GCB Bioenergy*, vol. 3, no. 2, pp. 91–106, Apr. 2011.
- [14] R. Päivinen, M. Lindner, K. Rosén, and M. J. Lexer, "A concept for assessing sustainability impacts of forestry-wood chains," *European Journal of Forest Research*, vol. 131, no. 1, pp. 7–19, 2012.
- [15] N. Krajnc and J. Domac, "How to model different socio-economic and environmental aspects of biomass utilisation: Case study in selected regions in Slovenia and Croatia," *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, pp. 6010–6020, Dec. 2007.
- [16] C. Cambero and T. Sowlati, "Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 62–73, Aug. 2014.
- [17] M. Cinelli, S. R. Coles, A. Jørgensen, A. Zamagni, C. Fernando, and K. Kirwan, "Workshop on life cycle sustainability assessment: the state of the art and research needs—November 26, 2012, Copenhagen, Denmark," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 18, no. 7, pp. 1421–1424, Aug. 2013.
- [18] C. Benoît, G. A. Norris, S. Valdivia, A. Citroth, A. Moberg, U. Bos, S. Prakash, C. Ugaya, and T. Beck, "The guidelines for social life cycle assessment of products: just in time!," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 15, no. 2, pp. 156–163, Feb. 2010.
- [19] T. E. Swarr, D. Hunkeler, W. Klöpffer, H.-L. Pesonen, A. Citroth, A. C. Brent, and R. Pagan, "Environmental life-cycle costing: a code of practice," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 16, no. 5, pp. 389–391, Jun. 2011.
- [20] W. Klöpffer, "Life cycle sustainability assessment of products," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 13, no. 2, pp. 89–95, Mar. 2008.
- [21] Z. Shabbir, D. H. S. Tay, and D. K. S. Ng, "A hybrid optimisation model for the synthesis of sustainable gasification-based integrated biorefinery," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 90, no. 10, pp. 1568–1581, Oct. 2012.
- [22] J. Domac, K. Richards, and S. Risovic, "Socio-economic drivers in implementing bioenergy projects," *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 2, pp. 97–106, Feb. 2005.
- [23] G. Finnveden and Å. Moberg, "Environmental systems analysis tools – an overview," *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, no. 12, pp. 1165–1173, Oct. 2005.
- [24] PRÉ-Consultants. (2000). *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment. In Methodology report and manual for designers.* Amersfoort, The Netherlands: PRÉ-Consultants.
- [25] A. Azapagic and R. Clift, "Life cycle assessment and multiobjective optimisation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 7, no. 2, pp. 135–143, Mar. 1999.
- [26] C.-E. Komly, C. Azzaro-Pantel, A. Hubert, L. Pibouleau, and V. Archambault, "Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 69, pp. 66–81, Dec. 2012.
- [27] B. H. Gebreslassie, G. Guillén-Gosálbez, L. Jiménez, and D. Boer, "Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment," *Applied Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1712–1722, Sep. 2009.
- [28] O. Cavalett, M. F. Chagas, J. E. A. Seabra, and A. Bonomi, "Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 18, no. 3, pp. 647–658, Mar. 2013.
- [29] I. T. Herrmann, M. Lundberg-Jensen, A. Jørgensen, T. Stidsen, H. Spliid, and M. Hauschild, "Enabling optimization in LCA: from 'ad hoc' to 'structural' LCA approach—based on a biodiesel well-to-wheel case study," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 19, no. 1, pp. 194–205, Jan. 2014.
- [30] I. Muñoz, K. Flury, N. Jungbluth, G. Rigarlsford, L. M. i Canals, and H. King, "Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 19, no. 1, pp. 109–119, Jan. 2014.
- [31] J. Koiwanit, L. Piewkhaow, Q. Zhou, A. Manuilova, C. W. Chan, M. Wilson, and P. Tontiwachwuthikul, "A life cycle assessment study of a Canadian post-combustion carbon dioxide capture process system," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 19, no. 2, pp. 357–369, Feb. 2014.
- [32] M. J. Amores, F. D. Mele, L. Jiménez, and F. Castells, "Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 18, no. 7, pp. 1344–1357, Aug. 2013.
- [33] P. Bajpai, "Integrated Forest Biorefinery," in *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*, Springer US, 2012, pp. 375–402.
- [34] M. Wang, "Life-Cycle Analysis of Biofuels," in *Plant Biotechnology for Sustainable Production of Energy and Co-products*, P. N. Mascia, J. Scheffran, and J. M. Widholm, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 385–408.
- [35] Z. Liu, T. Qiu, and B. Chen, "A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with

multi-conversion paths in China,” *Applied Energy*, vol. 126, pp. 221–234, Aug. 2014.

[36] B. H. Gebreslassie, M. Slivinsky, B. Wang, and F. You, “Life cycle optimization for sustainable design and operations of hydrocarbon biorefinery via fast pyrolysis, hydrotreating and hydrocracking,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 50, pp. 71–91, Mar. 2013.

[37] Arvidsson, H. Baumann, and J. Hildenbrand, “On the scientific justification of the use of working hours, child labour and property rights in social life cycle assessment: three topical reviews,” *Int J Life Cycle Assess*, pp. 1–13, Nov. 2014.

[38] A. Jørgensen, L. C. Dreyer, and A. Wangel, “Addressing the effect of social life cycle assessments,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 17, no. 6, pp. 828–839, Jul. 2012.

[39] A. Jørgensen, “Social LCA—a way ahead?,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 18, no. 2, pp. 296–299, Feb. 2013.

[40] “ISO 26000 Responsabilité sociétale - L’essentiel (2011-03-09) - ISO.” [Online].

[41] J. Domac, K. Richards, and S. Risovic, “Socio-economic drivers in implementing bioenergy projects”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 2, pp. 97–106, Feb. 2005.

[42] L. Elghali, R. Clift, P. Sinclair, C. Panoutsou, and A. Bauen, “Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, pp. 6075–6083, Dec. 2007.