

Développement d'un outil d'aide à la décision par analyse  
multicritère pour la durabilité des projets de chauffage à la  
biomasse forestière au Québec

par

Raphaël DIAS BRANDAO

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE  
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAITRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 5 AOÛT 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Raphaël Dias Brandao, 2021



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**

**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

Mme Annie Levasseur, directrice de mémoire  
Département de Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Evelyne Thiffault, codirectrice de mémoire  
Département des sciences du bois et de la forêt à l'Université Laval

M. Richard Arsenault, président du jury  
Département de Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Danielle Monfet, membre du jury  
Département de Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 28 JUILLET 2021**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier d'abord ma directrice Annie, qui dès notre première rencontre a tout de suite compris l'orientation que je souhaitais donner à ma maitrise en me guidant vers un sujet multidisciplinaire, et qui a su par la suite me rassurer face aux doutes qui m'habitaient dans les circonstances particulières de cette année de pandémie.

Un grand merci également à ma codirectrice Evelyne qui a su répondre à toutes mes interrogations et me guider vers les bonnes personnes pour obtenir l'information recherchée. Je garderais en mémoire notre unique rencontre physique en ce mois de mars 2020, à la veille du confinement qui aura rythmé le reste de ma maitrise.

Un grand merci à mes amis qui m'ont permis de vivre une expérience québécoise riche en dépit des difficultés sanitaires.

Finalement, je tiens à remercier ma famille de m'avoir soutenu dans mes choix et de toujours être présents quand il le faut malgré la distance.



## **Développement d'un outil d'aide à la décision par analyse multicritère pour la durabilité des projets de chauffage à la biomasse forestière au Québec**

Raphaël DIAS BRANDAO

### **RÉSUMÉ**

Le chauffage à la biomasse forestière résiduelle est une alternative aux combustibles fossiles qui s'inscrit dans les objectifs québécois et canadiens de réduction des gaz à effet de serre (GES). Si les opportunités et les bénéfices de tels projets peuvent être conséquents, il ne faut pas négliger les freins et impacts potentiels de ces projets sur l'environnement et la communauté en particulier. Cette étude vise le développement d'un outil d'aide à la décision permettant de guider et d'aider les décideurs publics à choisir le meilleur projet et à améliorer sa durabilité. Les indicateurs sont pondérés en fonction des orientations des différentes parties prenantes grâce à l'utilisation de la méthode d'analyse décisionnelle multicritères hiérarchique (Analytic Hierarchical Process, AHP). Cette méthode permet de différencier les pondérations et d'intégrer l'acceptabilité sociale au processus de décision. L'outil a été appliqué à deux scénarios fictifs pour montrer sa capacité à guider la prise de décision et mettre en avant la différentiation des pondérations et des scénarios permise par la méthode d'évaluation.



# **Development of a multi-criteria analysis decision-support tool for the sustainability of forest biomass heating projects in Quebec**

Raphaël DIAS BRANDAO

## **ABSTRACT**

Residual forest biomass for heating is an alternative to fossil fuels that is in line with global greenhouse gas emission reduction targets. Even if the opportunities and the benefits of such projects may be important, one should not neglect the barriers and potential impacts of these projects to assess their sustainability. The decision support tool developed and presented in this paper will help guide and support public decision makers in selecting the best project and improving its sustainability. A reliable and relevant weighting method is determined, based on the use of the Analytic Hierarchical Process multi-criteria decision analysis method, allowing the integration of stakeholders and the consideration of their views and opinions. This choice, combined with the privileged use of quantifiable qualitative data, allows the use of the tool in a preliminary phase of the project development, and enables the evaluation of the project and its sustainability from a social acceptability perspective. The tool was applied to two fictitious scenarios to demonstrate its ability to guide decision making and to highlight the differentiation of weights and scenarios through both weighting and evaluation methods.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE 1 ETAT DES CONNAISSANCES .....	5
1.0    Ressources bioénergétiques .....	5
1.1    Produits bioénergétiques .....	6
1.2    Potentiel de la bioénergie et perspectives au Québec .....	7
1.3    Bénéfices et impacts de la bioénergie .....	8
1.3.0        Aspects sociaux.....	8
1.3.1        Aspects économiques.....	10
1.3.2        Aspects environnementaux .....	10
1.4    Outils d'aide à la décision existants .....	12
1.4.1        Présentation des outils et base de données existants.....	13
1.4.2        Analyse des outils existants .....	16
1.5    Problématique .....	26
1.6    Objectifs général et spécifiques .....	26
CHAPITRE 2 DEVELOPMENT OF A MULTI-CRITERIA ANALYSIS DECISION-SUPPORT TOOL FOR THE SUSTAINABILITY OF FOREST BIOMASS HEATING PROJECTS IN QUEBEC .....	29
2.0    Abstract .....	29
2.1    Introduction.....	30
2.2    Method .....	32
2.2.1        Selection of indicators.....	34
2.2.2        Weighting method.....	38
2.2.3        Development of an evaluation method based on the indicators .....	42
2.2.4        Case study .....	47
2.3    Results and discussion .....	49
2.3.1        Prioritization of indicators by stakeholders .....	49
2.3.2        Displaying the performance of themes and dimensions .....	53
2.3.3        Strengths, weaknesses and mitigation measures.....	57
2.4    Framework for the use of the tool and method .....	58
2.5    Conclusion .....	59
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	61
BIBLIOGRAPHIE.....	66



## **LISTE DES TABLEAUX**

	Page
Tableau 1 Récapitulatif de la comparaison des outils d'aide à la décision choisis en se basant sur les critères d'Isabelle Bastien (2012).....	25
Table 2 The 70 indicators selected for the decision-support tool are divided into 30 themes and six dimensions.....	36
Table 3 Conversion table for qualitative data assessing actions taken or planned .....	46
Table 4 Number of relative differences above 100% by dimension and stakeholder. ....	52



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Research methodology implemented to meet the research objectives and enable the development of the tool .....	33
Figure 2 Example of hierarchical tree for indicators in theme G.3. Management, of the governance dimension. ....	39
Figure 3 Screenshot of the tool showing the pairwise comparison of the different dimensions considered in the tool to allow the determination of weights for each of them using the AHP method.....	40
Figure 4 Example of a value chain for the forest chips product type and full-tree felling. The thick brown arrows represent the studied value chain. The thin black arrows represent the possible alternatives. ....	44
Figure 5 Relative importance of stakeholder prioritization by indicator.....	50
Figure 6 Screenshot of the tab of the tool that displays the main points of divergence between the weightings given by the stakeholders. ....	52
Figure 7 Screenshot of the tab of the tool that displays the performances of the dimensions for each scenario according to the prioritization chosen. ....	54
Figure 8 Comparison of the performance of scenarios 1 and 2 for the different dimensions according to the chosen weighting.....	55
Figure 9 Comparison of the performance of scenarios 1 and 2 for the different themes according to the dimension considered. These results show that the tool allows a global, quick and efficient evaluation of the scenarios.....	56



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AHP : Analytic Hierarchical Process

BSCR : Biomass Supply Chain Risk

CI : Indice de cohérence (consistency index)

CMQ : Communauté Métropolitaine de Québec

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone

CR : Ratio de cohérence (consistency ratio)

DCE : Discrete choice experiments

EFI : European Forest Institute

GADD : Grille d'analyse en développement durable

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat

INL : Idaho National Laboratory

IPCC : Intergovernmental panel on climate change

MRC : Municipalité régionale de comté

ODD : Objectifs de développement durable

OIF : Organisation Internationale de la Francophonie

ONU : Organisation des Nations Unies

PJ : Pétajoules = 10<sup>15</sup> J

PSPP : Politique, stratégie, programme ou projet

SMART : Simple multiattribute rating technique

ToSIA : Tool for Sustainability Impact Assessment

UQAC : Université du Québec à Chicoutimi

UQAT : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Wh : Wattheure

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les changements climatiques sont un enjeu fondamental du XXI<sup>e</sup> siècle dont les conséquences se font d'ores et déjà ressentir à toutes les échelles : hausse de la température des océans et de l'atmosphère, fonte des glaciers et de la banquise arctique, élévation du niveau des mers et augmentation de l'incidence et de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes (GIEC, 2013).

Parmi les causes de ces changements climatiques, l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est considérée comme un facteur prépondérant. En particulier, les activités humaines seraient à l'origine de cette augmentation accrue depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle (GIEC, 2018). Notamment, les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) représentent la première source de GES anthropiques, *i.e.* d'origine humaine, en raison de la quantité émise dans l'atmosphère (GIEC, 2018).

La communauté internationale cherche donc à s'organiser collectivement pour permettre la diminution des émissions de GES dans l'atmosphère et vise à maintenir le réchauffement de la planète à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels tout en s'efforçant de limiter cette augmentation à moins de 1,5°C (Organisation des Nations Unies, 2015a). Le Canada, dans le cadre de sa contribution à l'Accord de Paris sur le climat, s'est engagé à réduire ses émissions de GES de 30% d'ici 2030 en comparaison au niveau d'émission de 2005 (Gouvernement du Canada, 2017). A l'échelle provinciale, le Québec s'est engagé à réduire ses émissions de GES de 37,5% d'ici 2030 en comparaison au niveau de 1990, et à atteindre la carboneutralité d'ici 2050 toujours par rapport au niveau de 1990 (Gouvernement du Québec, 2020).

Ces objectifs ambitieux s'accompagnent de plans d'actions qui permettent de déterminer les axes d'action envisagés pour permettre l'atteinte des cibles aux horizons 2030 et 2050. Au Québec, les objectifs de réduction des émissions s'appuient ainsi largement sur le volet énergétique (Gouvernement du Québec, 2012). En effet le secteur énergétique, incluant la production , le transport et la consommation d'énergie, représente 71% des émissions totales

de GES du Québec (Whitmore & Pineau, 2020). Aussi, le gouvernement du Québec vise à augmenter la production d'énergies renouvelables de 25% d'ici 2030, notamment la filière des bioénergies (Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources naturelles, 2017). Par ailleurs, le gouvernement ambitionne de convertir les bâtiments institutionnels et commerciaux aux énergies propres, incluant le chauffage à la biomasse (Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources naturelles, 2017).

Le gouvernement du Québec montre donc une volonté de développer la filière bioénergétique. Celle-ci, en plus de réduire les émissions de GES en comparaison avec les combustibles fossiles, permet également de contribuer au développement économique et social des communautés (Chum et al., 2011). Aussi, les municipalités sont appelées à participer à cet effort collectif de réduction des émissions. L'engagement des municipalités dans la filière bioénergétique est particulièrement envisagé par le chauffage des bâtiments institutionnels et commerciaux à la biomasse forestière résiduelle solide (granules de bois, écorces ou copeaux). Les opportunités potentielles associées à ce type de projet peuvent être nombreuses et diverses : économiques via la création de nouvelles chaînes de valeurs (Asikainen, Ikonen, & Routa, 2016), environnementales avec la réduction des émissions de GES (Agostini, Giuntoli, & Boulamanti, 2014), ou encore sociales avec la création d'emplois et de revenus pour les communautés locales. Cependant, les freins au développement de la filière restent importants. Ces freins sont notamment de nature juridique et politique avec les réglementations en vigueur et l'absence d'incitatifs gouvernementaux (Thiffault, St-Laurent Samuel, & Serra, 2015). Ils sont aussi de nature environnementale avec les enjeux sur la biodiversité et les sols associés à la récolte des résidus forestiers (Thiffault et al., 2011), ou encore organisationnelle avec la difficulté de coordonner la chaîne d'approvisionnement.

C'est dans ce contexte d'émergence de la filière des bioénergies que ce projet s'intègre. Il est affilié à un projet plus large visant à déterminer les freins et opportunités de la filière bioénergétique au Québec et à développer des outils pour en faciliter l'essor. Ainsi, des outils d'aide à la décision peuvent guider les institutions publiques et privées dans le choix du modèle

énergétique le plus adapté à leurs besoins, tout en les accompagnant dans la gestion des conséquences sociales, économiques ou culturelles de ces choix. Ce type d'outil d'aide à la décision existe déjà, mais dans d'autres secteurs (minier notamment) ou à des échelles plus larges et ne sont donc pas adaptés au contexte de développement bioénergétique québécois.



## **CHAPITRE 1**

### **ETAT DES CONNAISSANCES**

La bioénergie est une énergie renouvelable issue de la valorisation de matières organiques. A l'échelle mondiale, il y a deux types de biomasse. D'une part, il y a la biomasse traditionnelle pour l'usage domestique (cuisine, chauffage, etc) des populations les plus pauvres, et qui représente 74% de l'énergie produite à partir de matières organiques. D'autre part, il y a la biomasse dite « moderne » basée sur des technologiques à plus haute efficacité énergétique. Pour cette dernière, les principales sources sont la biomasse forestière et la biomasse agricole qui représentent respectivement 56% et 43% de l'énergie produite à partir de la biomasse moderne (Chum et al., 2011).

#### **1.0 Ressources bioénergétiques**

La bioénergie issue de la biomasse agricole peut être produite à partir de matières oléagineuses (colza, soja, palmier à huile), de matières amylacées (maïs, blé, sorgho), de matières sucrées (betterave, canne à sucre) ou encore de matières ligneuse (miscanthus, millet vivace) (Smith & Torn, 2013). Les trois premières sources de biomasse agricole sont controversées car elles entrent en concurrence avec l'alimentation. Cependant, la production de matière ligneuse pourrait être une alternative intéressante, à condition d'en cerner les limites, notamment concernant la concurrence pour les terres qu'une telle production peut créer (Chum et al., 2011; Smith & Torn, 2013).

La biomasse forestière repose principalement sur l'utilisation des résidus et matière première sans preneur dans le réseau industriel des produits du bois conventionnels (sciage, pâtes et papiers, panneaux). Il y a trois catégories de résidus (Röser, Asikainen, Stupak, & Pasanen, 2008) :

- Les résidus primaires, issus des activités d'aménagement forestier telles que les coupes ou les éclaircies. Cela inclut les branches et les houppiers, ainsi que les tiges et sections de tige de faible dimension ou de faible qualité et les essences non commerciales.

- Les résidus secondaires, issus des processus industriels de transformation du bois (copeaux, sciures, planures, liqueur noire). Une part de ces résidus peut aussi servir à la production de panneaux de bois et de pâte.
- Enfin, les résidus tertiaires sont constitués de produits du bois post-consommation qui ont déjà été utilisés sous une autre forme (résidus de construction, rénovation, démolition, etc.). Ces derniers sont habituellement enfouis, mais de plus en plus de réglementations empêchent l'enfouissement de matière fibreuse recyclable ou valorisable.

À cela s'ajoute les ressources de bois issues de la récupération des arbres morts ou malades dont l'estimation du potentiel est toutefois difficile en raison de l'imprévisibilité des aléas naturels (Barrette et al., 2015) ainsi que les bois marchands sans preneurs qui font partie des possibilités forestières annuelles de coupe (Smeets & Faaij, 2007), mais qui ne sont pas utilisés par les industries conventionnelles, et dont le potentiel est conséquent au Québec (Durocher, Thiffault, Achim, Auty, & Barrette, 2019).

## 1.1        **Produits bioénergétiques**

Il y a trois catégories de produits bioénergétiques issus de la valorisation de la biomasse forestière : les produits liquides, gazeux et solides (Chum et al., 2011).

Les produits liquides font l'objet de nombreuses innovations visant à trouver des substituts au pétrole. Parmi les solutions qui sont aujourd'hui à un stade avancé de développement, il existe le diesel renouvelable, l'éthanol cellulosique et l'huile pyrolytique (Desjardins, 2009). Le premier est obtenu par hydrogénéation d'huiles végétales issues de la biomasse forestière. L'éthanol cellulosique quant à lui, s'obtient par fermentation de la biomasse. Enfin, l'huile pyrolytique est obtenue – comme son nom l'indique – par pyrolyse c'est-à-dire la combustion à haute température et en l'absence d'oxygène. Si les deux premiers produits peuvent être utilisés dans l'essence des véhicules dans des proportions plus ou moins importantes

(Desjardins, 2009), les huiles pyrolytiques servent davantage à l'alimentation des chaudières. Le principal intérêt des huiles pyrolytiques réside dans la réduction des coûts liés à la conversion vers la bioénergie, puisqu'il est possible de conserver les chaudières au mazout sans avoir à les remplacer par d'autres équipements (Desjardins, 2009; Gouvernement du Canada, 2012).

Les produits gazeux comprennent essentiellement la production de biogaz ou de biométhane issus de résidus forestiers. Cette production se fait au travers de procédés biologiques comme la digestion anaérobie ou de procédés thermochimiques comme la gazéification (Gouvernement du Canada, 2016).

Enfin, les biocarburants solides comprennent deux types principaux. D'une part, les copeaux et les écorces peuvent être utilisés tels quels selon des procédés de valorisation maîtrisés depuis de nombreuses années. D'autre part, des étapes de conditionnement et de densification de copeaux et autres résidus permettent la production de granules de bois, qui nécessitent ainsi des installations plus conséquentes et complexes. Ces deux types de produits bioénergétiques peuvent par la suite être utilisés pour le chauffage seul, la génération d'électricité seule ou la cogénération (Chum et al., 2011).

Dans le cadre de ce mémoire, seules les formes solides de la biomasse seront traitées, dans le cadre du chauffage des bâtiments institutionnels et commerciaux.

## **1.2 Potentiel de la bioénergie et perspectives au Québec**

Le potentiel de la biomasse forestière comme source d'énergie renouvelable est important malgré une évaluation complexe, qui doit tenir compte à la fois des contraintes biophysiques techniques, environnementales et économiques (Chum et al., 2011). Cependant la diminution des usines de pâtes et papiers au Québec libère un marché important pour les résidus forestiers qui leur étaient auparavant destinés.

Néanmoins, cette source d'énergie demeure limitée face aux besoins sans cesse grandissants de la société. Au Québec, la biomasse représente 8% de la consommation énergétique totale en 2017, soit 140 pétajoules ( $10^{15}$  J ou PJ) (Whitmore & Pineau, 2020), contre 7,3% en 2011, soit 125 PJ (Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources naturelles, 2015). Cela dit, le gouvernement entend faire progresser de 50% la production de bioénergie d'ici 2030 afin de l'aider à satisfaire ses objectifs de lutte contre les changements climatiques (Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources naturelles, 2017).

En revanche, cette augmentation envisagée de la production énergétique à la biomasse doit tenir compte des bénéfices et des impacts négatifs que de nouveaux projets de bioénergie forestière peuvent avoir sur les dimensions sociales, économiques et environnementales.

### **1.3 Bénéfices et impacts de la bioénergie**

Cette section traite des bénéfices et impacts potentiels de la bioénergie, sur les dimensions sociale, économique et environnementale.

#### **1.3.0 Aspects sociaux**

L'acceptabilité sociale des projets de bioénergie forestière est peu évaluée au Québec bien qu'elle joue un rôle important dans le développement de la filière (Mai-Moulin, Fritzsche, & Junginger, 2019). En effet, la bioénergie est un secteur peu connu et le manque de connaissance et d'expérience des parties prenantes rend la communication difficile et laisse la place à de nombreux *a priori*.

Néanmoins, la hausse de la demande en bioénergie tend à développer un nouveau marché et donc à créer de nouveaux emplois (Chum et al., 2011). Par ailleurs, dans le contexte québécois, les fermetures des usines des pâtes et papiers sont nombreuses et ont entraîné la suppression

de nombreux emplois (37% de suppression d'emplois en 10 ans, soit 12 000 postes) dans des régions où les solutions de repli sont rares (Gouvernement du Canada, Guichet-Emplois, 2020). Aussi, le développement de nouvelles filières, notamment bioénergétiques, peut permettre de sauver ces emplois et garantir des revenus suffisants aux communautés. Toutefois, le nombre et la qualité des emplois créés par la filière bioénergétique sont plus faibles que pour les emplois de l'industrie des pâtes et papiers, ce qui empêche une compensation totale des emplois perdus, par le développement de la seule filière bioénergétique (Beauregard, 2015).

Par ailleurs, la bioénergie, en fournissant une source d'énergie locale, peut garantir une meilleure indépendance énergétique à l'échelle du Québec. À une plus petite échelle, c'est la sécurité des communautés qui peut être garantie en fournissant des services énergétiques à des populations isolées à partir des ressources forestières locales. Néanmoins, la bioénergie forestière peut également léser les populations locales si les ressources forestières qu'elles utilisent habituellement pour subvenir à leurs propres besoins énergétiques sont utilisés pour la production de produits bioénergétiques destinés à d'autres marchés (Chum et al., 2011; Smith & Torn, 2013).

Enfin, dans certains contextes, une mauvaise gestion de l'aménagement du territoire peut créer une compétition entre la bioénergie et la nourriture. En effet, le changement d'affectation des terres arables disponibles, en passant de la production de denrées alimentaires vers les cultures bioénergétiques, entraîne des problématiques de sécurité alimentaire (Agostini et al., 2014; Chum et al., 2011; Smith & Torn, 2013). À l'échelle locale, des solutions de partage des terres (agroforesterie) peuvent être trouvées pour optimiser les terres (Chum et al., 2011). Toutefois, ces mesures qui pourraient être applicables dans certains contextes ne sont pas nécessairement pertinentes dans le cas du Québec. En effet, la majeure partie de la biomasse disponible provient de forêts aménagées (par nature souvent impropre à la production agricole) et son approvisionnement ne requiert pas de changement d'affectation des terres.

### **1.3.1 Aspects économiques**

La bioénergie forestière permet la création de nouveaux marchés et donc de nouveaux revenus pour les exploitations forestières. En effet, les résidus primaires, qui étaient jusqu'alors laissés sur les sites forestiers, trouvent maintenant une nouvelle utilité et donc une nouvelle valeur (Chum et al., 2011). De la même façon, la bioénergie permet de donner de la valeur aux résidus secondaires laissés inutilisés par le déclin des usines de pâtes et papiers. Enfin les résidus tertiaires, qui sont habituellement enfouis, gagnent également au développement de la chaîne de valeur de la bioénergie.

Par ailleurs, la volonté du gouvernement du Québec de développer la filière bioénergétique québécoise permet l'accès à de nouvelles aides et subventions dans le cadre de mesures de soutien et de politiques d'incitation. Les bénéfices des projets doivent être estimés et démontrés pour garantir l'accord de soutien via ces mesures. Des méthodes de contrôle *a posteriori* doivent être mises en place pour évaluer l'efficacité des politiques et mesures mises en place (Chum et al., 2011).

En revanche, la production de bioénergie à partir de biomasse forestière peut entrer en concurrence avec les produits du bois conventionnels. C'est le cas des résidus secondaires qui sont habituellement utilisés pour l'industrie des pâtes et papier. Le développement d'une nouvelle filière forestière ne doit pas se faire au détriment d'une autre filière (Agostini et al., 2014).

### **1.3.2 Aspects environnementaux**

Le principal bénéfice de la bioénergie réside dans sa réduction des émissions de GES d'origine fossile. Néanmoins, cette réduction supposée n'est pas garantie et la bioénergie est considérée – souvent à tort – comme carboneutre, *i.e.* que les émissions de CO<sub>2</sub> émises par la bioénergie sont entièrement compensées par les émissions emmagasinées lors de la croissance de l'arbre

(Agostini et al., 2014). En réalité, le carbone que l’arbre aurait continué d’absorber s’il avait continué de croître est omis dans le calcul. En effet, la coupe initiale de l’arbre entraîne une diminution brutale de stock de carbone dans la forêt ; ce carbone sera par la suite émis dans l’atmosphère via les procédés de conversion bioénergétiques. Enfin, les procédés de conversion bioénergétiques sont globalement moins efficaces que leurs équivalents pour les combustibles fossiles, ce qui entraîne également une hausse des émissions de CO<sub>2</sub> pour chaque unité d’énergie produite. L’ensemble de ces causes créent une dette de carbone, *i.e.* un surcroit initial d’émissions de CO<sub>2</sub> pour un scénario de bioénergie en comparaison à un scénario fossile (Agostini et al., 2014; Lamers & Junginger, 2013). Néanmoins, cette dette se rembourse progressivement par les bénéfices des émissions évitées pour l’extraction et l’utilisation des ressources fossiles. La durée nécessaire à un système de bioénergie pour compenser la baisse temporaire de carbone due à la production de bioénergie est définie par le délai de remboursement (Agostini et al., 2014; Bentsen, 2017; Lamers & Junginger, 2013). Ce délai est largement influencé par l’efficacité de conversion du système bioénergétique, par la fréquence et l’intensité des coupes, par la source de biomasse (par exemple, résidus de coupe vs. arbres entiers) ou encore le stock de carbone initial (Agostini et al., 2014; Bentsen, 2017; Bernier et al., 2012).

Par ailleurs, la production de bioénergie peut être associée à des pratiques ou des technologies de capture et le stockage du carbone en réduisant ainsi le CO<sub>2</sub> atmosphérique grâce aux émissions négatives. L’objectif est d’augmenter le stock de carbone dans les réservoirs de carbone en améliorant la productivité des plantes et en optimisant la durée de rotation des coupes (Heck, Gerten, Lucht, & Popp, 2018; Smith & Torn, 2013).

Néanmoins, la bioénergie a des effets plus larges sur l’environnement, en impactant notamment la biodiversité, les sols, ou encore l’eau. Ainsi, la bioénergie peut mener à la généralisation de monocultures sur de grandes superficies, ce qui implique inévitablement une diminution de la biodiversité. Par ailleurs, la conversion de terres naturelles vers des cultures bioénergétiques entraîne une disparition de l’habitat de la biodiversité et de grandes

modifications de l'écosystème. Néanmoins, une bonne gestion forestière peut *a contrario* créer de nouveaux habitats en réhabilitant des zones abandonnées en forêts (Chum et al., 2011; Heck et al., 2018; Smith & Torn, 2013).

De la même façon, les coupes dans les forêts peuvent entraîner la pollution des eaux de surface par des particules en suspension. Par ailleurs, les besoins en eau des cultures bioénergétiques peuvent entraîner une augmentation du stress hydrique à l'échelle locale et une compétition entre les différents usages de l'eau. Néanmoins, les forêts permettent également de faciliter la pénétration de l'eau dans les sols, luttant ainsi contre l'érosion des sols et les inondations (Chum et al., 2011).

Enfin, l'enlèvement des résidus forestiers pour la production bioénergétique pourrait entraîner une diminution des nutriments dans le sol et donc affecter sa fertilité. Cet enlèvement influence également la structure du sol et sa capacité de rétention d'eau. Par ailleurs, les machines nécessaires à la coupe sur place, impactent également les sols en le compactant et le détériorant. Néanmoins, les effets de l'enlèvement des résidus sont variables entre les sites (Thiffault et al., 2011).

#### **1.4 Outils d'aide à la décision existants**

Divers outils permettant l'évaluation d'indicateurs de durabilité ou guidant les décideurs publics dans la prise de décision sont disponibles. En particulier, l'analyse de quatre outils a été réalisée afin d'en extraire les points forts et faibles de chacun, et ainsi permettre *in fine* la définition des caractéristiques de l'outil à développer. Bien que tous les outils ne traitent pas spécifiquement de la bioénergie forestière, l'analyse de chacun d'entre eux permet d'apporter des connaissances sur le fonctionnement des outils d'aide à la décision, sur les indicateurs de durabilité, sur le contexte bioénergétique ou sur le contexte québécois. Ces quatre outils forment donc un ensemble cohérent permettant le développement d'un outil adapté aux objectifs spécifiques.

## 1.4.1 Présentation des outils et base de données existants

### 1.4.1.1 « Biomass Supply Chain Risk Standards »

La première base de données analysée dans le cadre de ce projet est la « Biomass Supply Chain Risk Standards » (BSCR Standards) qui est une norme de risque des chaînes d’approvisionnement de la biomasse agricole et forestière en Amérique du Nord, développée en 2019 par Ecostrat notamment (Ecostrat & Natural Resources Canada, 2019).

Ecostrat est une compagnie canadienne spécialisée dans le développement, l’optimisation et la gestion des chaînes d’approvisionnement de biomasse en Amérique du Nord. Le projet « BSCR Standards » a été développé en partenariat avec l’Idaho National Laboratory (INL) et répond à la demande d’institutions financières, d’investisseurs mais aussi de producteurs de biomasse, de fournisseurs et d’universitaires.

Cette base de données vise à guider les utilisateurs dans l’évaluation et l’atténuation des risques associés aux chaînes d’approvisionnement en biomasse. L’objectif est de proposer une méthode de vérification des risques associés à un projet de développement bioénergétique et ainsi garantir des investissements plus sécurisés, plus nombreux et donc un développement plus rapide de la filière.

La base de données se présente comme une liste accessible en ligne, et qui se divise en six catégories de risques. Elle propose pour chaque risque une définition, des exigences à connaître pour évaluer le risque et des méthodes pour obtenir les données nécessaires.

Dans le cadre du développement de l’outil, cette base de données apportera des connaissances précises sur la réalité bioénergétique en Amérique du Nord et notamment sur les facteurs de risques et de succès associés à la gouvernance de la chaîne de valeur.

#### **1.4.1.2 « Tool for Sustainability Impact Assessment »**

Le second outil analysé dans ce projet est le « Tool for Sustainability Impact Assessment » (ToSIA) développé par l’European Forest Institute (EFI) en 2014 dans le cadre de deux programmes de la Commission Européenne (European Forest Institute, 2013).

L’EFI est une organisation internationale qui regroupe plus de 40 pays et travaille sur les problématiques liées aux forêts en favorisant le partage d’une information fiable et pertinente et en prônant la recherche comme base des politiques forestières.

Cet outil vise à analyser les impacts sociaux, économiques et environnementaux des changements dans la chaîne de production forestière, de la forêt à la fin de vie des produits. Il s’adresse aux décideurs publics, aux chercheurs et aux industriels forestiers pour analyser les effets de modifications délibérées ou externes sur la durabilité des projets.

L’outil se présente sous la forme d’une application. Celle-ci permet la comparaison de scénarios préétablis et propose une série d’indicateurs classés selon les trois dimensions : économique, sociale et environnementale.

Dans le cadre des travaux effectués, cet outil apportera des connaissances sur les aspects sociaux, économiques et environnementaux de la chaîne de valeur de la bioénergie forestière dans un contexte boréal. Des connaissances sur les chaînes de valeur et la méthode de quantification des impacts à partir de cette chaîne seront également extraites.

#### **1.4.1.3 Indice du risque social pour les projets miniers au Québec**

Le troisième outil analysé est l’indice du risque social pour les projets miniers au Québec, développé en 2015 par la chaire en entrepreneuriat minier de l’Université du Québec en

Abitibi-Témiscamingue (UQAT) en partenariat avec l'Autorité des marchés financiers (Bergeron et al., 2015; Michel et al., 2016).

Cet outil vise à identifier les aspects d'un projet minier pouvant générer le plus de risque social et à développer le dialogue entre les parties prenantes. Il s'adresse à la fois aux investisseurs, aux communautés, aux gouvernements et aux entreprises minières.

L'outil se présente sous la forme d'une grille articulée autour de trois pôles : communauté en présence, entreprise promouvant le projet, nature intrinsèque du projet minier et de son milieu naturel (Bergeron et al., 2015).

Cet outil apportera des connaissances sur le contexte québécois et les questions d'acceptabilité sociale pour des projets de grande envergure dans ce contexte.

#### **1.4.1.4 Grille d'analyse en développement durable**

Le dernier outil analysé est la Grille d'analyse en développement durable (GADD) développé en 2016 par la chaire en éco-conseil de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) en partenariat avec l'Organisation Internationale de la francophonie (OIF) (Villeneuve, Riffon, & Tremblay, 2016).

Cet outil vise à évaluer dans quelle mesure une politique, une stratégie, un programme ou un projet (PSPP) favorise l'amélioration des conditions humaines en traitant des grands enjeux du développement durable. L'objectif de l'outil est donc de caractériser l'avancement d'un PSPP et d'orienter les décideurs dans l'amélioration de ces derniers.

L'outil se présente sous la forme d'une grille articulée autour de six dimensions (Économique, Sociale, Environnementale, Culturelle, Éthique et Gouvernance) décomposées en thèmes et

objectifs. L'évaluation de ces objectifs permet l'obtention d'un indice caractérisant la capacité d'un PSPP à satisfaire les objectifs de développement durable (Villeneuve et al., 2016).

Cet outil permettra le développement des connaissances sur les six dimensions considérées mais également sur la méthode d'évaluation des indicateurs pour permettre l'évaluation du projet dans son ensemble et le calcul d'une performance.

#### **1.4.2 Analyse des outils existants**

Dans l'objectif d'effectuer une comparaison des outils existants, une série de critères a été sélectionnée. Ces critères permettent d'évaluer les outils dans leur adaptation au contexte de développement bioénergétique québécois et dans leur capacité à accompagner la prise de décision. Ces critères s'inspirent du travail d'Isabelle Bastien sur les outils de prise de décision en développement durable pour les municipalités et se classent dans trois catégories distinctes : l'accessibilité de l'outil, son contenu et sa capacité à accompagner la prise de décision (Bastien, 2012). Dans l'ensemble de cette partie, seuls les outils qui permettent d'accompagner et de guider la prise de décision seront traités (ToSIA, GADD et Indice du risque social pour les projets miniers). La base de données BSCR Standards développée par Ecostrat est laissée de côté ; en effet, celle-ci est difficilement comparable aux autres outils puisqu'elle ne fournit pas d'analyse des risques, mais se consacre à identifier les risques associés aux opérations de la bioénergie forestière.

##### **1.4.2.1 Accessibilité**

Cette catégorie regroupe les critères de rapidité d'exécution, de présence d'un guide d'utilisation et de niveau de connaissances nécessaire au renseignement de l'outil.

- Rapporté d'exécution :

Les trois outils analysés dans le cadre de ce projet présentent des durées nécessaires au remplissage des données qui diffèrent.

Ainsi, la GADD étant très détaillée dans son contenu, évaluant un total de 165 indicateurs répartis dans 40 thèmes et six dimensions, est relativement longue à renseigner dans son intégralité. Néanmoins, une grille comportant 35 questions est également proposée pour réaliser une analyse plus rapide de la durabilité du projet.

En revanche, l'outil de calcul de l'indice de risque social des projets miniers au Québec propose une grille d'évaluation très synthétique qui garantit un renseignement rapide, avec 40 questions dont les réponses sont le plus souvent à choisir parmi une liste proposée.

En ce qui concerne ToSIA, deux possibilités font varier grandement la rapidité d'exécution de l'outil. En effet, il est possible d'utiliser un modèle de chaîne d'approvisionnement par défaut proposé par l'outil qui permet d'obtenir des résultats rapidement. En revanche, s'il est nécessaire de créer une nouvelle chaîne d'approvisionnement, il faut renseigner un grand nombre de données précises, ce qui allonge considérablement la durée d'exécution de l'outil.

- Présence d'un guide d'utilisation :

Parmi les trois outils analysés dans le cadre de ce projet, seul la GADD propose un réel mode d'emploi à destination des décideurs pour les accompagner dans le renseignement de l'outil. Ce dernier permet d'accompagner le décideur tout au long du processus décisionnel. Il précise notamment quand et comment utiliser la GADD, et propose des pistes pour l'interprétation des résultats. Par ailleurs, la grille est largement commentée et propose une description pour chaque indicateur indiquant notamment comment améliorer son évaluation.

En ce qui concerne l'outil de calcul de l'indice de risque social des projets miniers, il n'y a pas de guide d'utilisation, mais la prise en main de l'outil est aisée notamment grâce aux choix proposés par liste déroulante pour chacun des indicateurs évalués. Par ailleurs, pour certaines données factuelles, un détail de l'accès à l'information est précisé afin d'accompagner le décideur dans le renseignement de l'outil.

Enfin, en ce qui concerne l'outil ToSIA, il n'y a pas de guide d'utilisation, ni pour le renseignement des données nécessaires à l'élaboration de la chaîne d'approvisionnement, ni pour l'interprétation des données issues de l'analyse. Néanmoins, il existe une communauté de pratique qui offre du soutien aux utilisateurs de ToSIA.

#### 1.4.2.2 Contenu

Ce thème regroupe les critères d'intégration des dimensions du développement durable, d'adaptation de l'outil au contexte bioénergétique et d'adaptation de l'outil au contexte québécois.

- Intégration des dimensions du développement durable :

Parmi les trois outils analysés dans le cadre de ce mémoire, deux d'entre eux s'appuient sur les dimensions du développement durable telles que définies lors du Sommet de la Terre de 1992<sup>1</sup>, à savoir la GADD et ToSIA.

Dans le cas de ToSIA, les trois dimensions sont explicitement développées et les indicateurs évalués sont rassemblés sous l'une de ces trois catégories.

Dans le cas de la GADD, les trois dimensions sont complétées par trois autres dimensions : une dimension culturelle, une dimension éthique et une dimension de gouvernance. L'intégration de ces dimensions dans l'évaluation de la durabilité d'un projet répond à l'évolution de la définition de développement durable au cours des dernières années et qui peut intégrer en plus des trois dimensions originelles, une ou plusieurs de ces nouvelles dimensions.

---

<sup>1</sup> Le Sommet de la Terre de 1992 utilise pour la première fois la notion de développement durable s'appuyant sur trois piliers fondateurs : le développement économique, le développement social et la protection de l'environnement. Le texte s'appuie sur le rapport Brundtland (« Notre avenir à tous ») rédigé en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies. Ce rapport utilise et définit pour la première fois la notion de développement durable : « Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » (Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1987).

L'Organisation des Nations Unies (ONU) a d'ailleurs défini 17 objectifs de développement durable (ODD) qui incluent des composantes culturelles, éthiques et de gouvernance, montrant l'importance du renouvellement de la définition du développement durable (Organisation des Nations Unies, 2015b). En proposant l'ensemble des dimensions, la GADD s'inscrit dans cette évolution de la définition du développement durable et permet l'obtention d'un outil très complet.

Finalement, dans le cas de l'outil de calcul de l'indice de risque social des projets miniers au Québec, les dimensions sociale, économique et environnementale ne sont pas explicitement désignées. Néanmoins, les trois catégories qui structurent l'outil sont corrélées aux trois piliers du développement durable : la partie « Entreprise » fait lien au pilier économique, la partie « Projet et milieu naturel » au pilier environnemental et enfin la partie « Communauté » au pilier social.

Ainsi, tous les outils étudiés intègrent les dimensions du développement durable de façon plus ou moins explicite et détaillée. Il s'agira, dans le cadre du projet, de proposer un outil d'aide à la décision qui intègre également ces dimensions explicitement. Le travail effectué dans la GADD pourra servir de modèle.

- Adaptation de l'outil au contexte bioénergétique :

Sur les trois outils analysés, seul ToSIA est spécifiquement destiné à un usage dans la filière bioénergétique. En effet, cet outil s'intéresse à l'analyse de durabilité dans le secteur forestier en détaillant l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Ainsi, il peut être utilisé dans le cadre de projets de bioénergie forestière.

En revanche, l'outil de calcul de l'indice de risque social des projets miniers s'intéresse – comme son nom l'indique – aux projets miniers et par sa précision, ne peut que difficilement et partiellement s'adapter à une analyse de durabilité pour un projet de bioénergie.

Par ailleurs, la GADD ne vise pas spécifiquement une filière. Il s'intéresse à l'analyse de durabilité de plans, stratégies, programmes ou projets (PSPP) d'une manière générale et peut donc être adapté à une utilisation dans le domaine de la bioénergie.

Toutefois, bien que certains outils ne soient pas directement adaptés à la bioénergie, les indicateurs qui sont utilisés peuvent être modifiés pour correspondre au besoin particulier de la filière.

- Adaptation de l'outil au contexte québécois :

Sur les trois outils analysés, seul l'outil de calcul de l'indice de risque social des projets miniers est adapté au contexte québécois. En effet, ce dernier intègre des problématiques spécifiques à la province du Québec comme les droits autochtones sur les territoires ou le ratio de chalets par rapport aux résidences dans les différentes municipalités régionales de comté (MRC).

En revanche, l'outil ToSIA est destiné à un usage en Europe puisque développé dans le cadre de programmes européens. En effet, les études de cas réalisées avec cet outil prennent toutes pour lieu d'implantation les forêts du nord de l'Europe et notamment la Scandinavie.

Enfin, bien que développée à l'UQAC, la GADD a une vision plus globale des PSPP et ne s'attarde donc pas spécifiquement sur les problématiques inhérentes au Québec. Ainsi, l'outil peut être utilisé partout dans le monde et principalement pour des projets à l'échelle internationale.

Toutefois, bien que certains outils ne soient pas directement adaptés au contexte québécois, les indicateurs qui sont utilisés peuvent être modifiés pour correspondre au besoin particulier de la province.

#### 1.4.2.3 Prise de décision

Ce thème regroupe les critères de comparaison de scénarios, consultation des parties prenantes, intégration d'un système de pondération et capacité à passer du diagnostic à l'acte.

- Comparaison de scénarios :

Parmi les trois outils analysés, seul ToSIA permet de faire des comparaisons de scénarios au sein même de l'outil. Les scénarios sont définis initialement par l'utilisateur qui détermine la chaîne de production correspondant à son scénario et renseigne les données nécessaires. Par ailleurs, quelques scénarios sont proposés par défaut, tous étant associés à des cas d'études en Europe du Nord.

Les deux autres outils, même s'ils ne permettent pas directement la comparaison au sein de l'outil, donnent des valeurs qualitatives qui permettent d'être comparées aux résultats d'autres analyses. Ainsi, dans la GADD, il est possible d'obtenir une performance pour chacune des dimensions et chacun des thèmes des dimensions dans le cadre d'un scénario donné. Ces performances peuvent ensuite être comparées avec les performances d'un autre scénario issus d'une autre analyse.

Dans le cas de l'outil de calcul de l'indice de risque social des projets miniers, il est possible d'obtenir trois indices (une cote, une perspective et une information) pour un scénario donné qui peuvent par la suite être comparés avec les indices d'une autre analyse. Néanmoins, la comparaison entre les scénarios est uniquement qualitative dans ce cas ; en effet s'il est possible de déterminer si un projet est meilleur que l'autre, il est impossible de quantifier l'écart de performance entre les deux projets.

- Consultation des parties prenantes :

Aucun des trois outils analysés ne permet la comparaison des points de vue de différentes parties prenantes. Si l'outil de calcul du risque social des projets miniers évoque la multiplicité

des approches et des disciplines associées à un projet minier, ils ne proposent pas pour autant de méthode permettant l'intégration des parties prenantes au processus décisionnel. Néanmoins, la partie questionnaire de l'outil permet de renseigner des données de l'ordre de la perception grâce à des réponses qui autorisent la nuance. Cette partie peut donc permettre la participation de parties prenantes à l'évaluation du projet. Par ailleurs, la pondération des différents indicateurs se fait sur la base d'une consultation auprès des parties prenantes (se conférer au point suivant).

Par ailleurs, l'outil ToSIA ne fait aucune mention des parties prenantes et de leur intégration ou de leur participation aux étapes de prise de décision concernant les projets forestiers qu'ils traitent. L'intégralité des données qui sont renseignées sont des données factuelles et il est donc impossible d'y intégrer une part de perception variable selon la partie prenante qui renseigne l'outil.

Enfin, grâce à des indicateurs dont l'évaluation autorise la nuance (valeur de 0 à 100%), la GADD peut permettre l'intégration de parties prenantes à l'analyse de durabilité d'un projet. Néanmoins, ces analyses doivent se faire indépendamment, et la comparaison manuellement.

- Intégration d'un système de pondération :

Parmi les trois outils analysés, seul l'outil ToSIA ne propose pas de système de pondération. En effet, puisque ToSIA ne propose pas une évaluation globale du projet, qui se traduirait par un indice ou une valeur unique résumant la durabilité du projet étudié, il ne peut y avoir de pondération entre les différents indicateurs. Ainsi, il est possible d'obtenir seulement l'évaluation des indicateurs en fonction des données renseignées sur la chaîne de production forestière du scénario considéré.

En revanche, l'outil de calcul de l'indice de risque social des projets miniers au Québec propose une pondération. Celle-ci repose sur une consultation de plusieurs parties prenantes. Chacune d'entre elles attribue une importance de 1 (sans effet) à 4 (très important) aux différents

indicateurs. Le poids de l'indicateur dans son pôle est ensuite obtenu par la moyenne pondérée des importances attribuées par les parties prenantes. La pondération finale de l'indicateur est enfin obtenue en divisant le poids de l'indicateur dans son pôle par le poids du pôle.

De même la GADD propose une pondération qui consiste simplement à attribuer une note entre 1 (faible importance) à 3 (très important) à chaque indicateur. La performance de l'indicateur sera ensuite pondérée par cette valeur en calculant une moyenne pondérée.

Les outils analysés dans le cadre de ce mémoire s'appuient sur des méthodes de pondération intuitives et relativement simples. Néanmoins, les méthodes de pondération en analyse multicritère sont d'une grande diversité et s'accompagnent chacune de leurs avantages et inconvénients. Développées depuis les années 1960, ces méthodes n'ont cessé d'évoluer et de se multiplier. Quelques-unes des méthodes de pondération qui peuvent être utilisées pour prioriser les indicateurs de durabilité des projets de bioénergie forestière sont décrites ci-dessous :

- La méthode de notation directe consiste simplement à demander aux parties prenantes d'attribuer une valeur numérique aux différents indicateurs (Odu, 2019). Cette méthode est évidemment la plus simple ; elle n'est pas très chronophage ( $n$  évaluations nécessaires pour  $n$  indicateurs) et ne nécessite pas de calculs trop importants. Néanmoins, elle peut mener à un risque de résultats biaisés important car la méthode s'appuie sur une base mathématique faible et les parties prenantes peuvent ne pas exprimer leurs préférences librement (Németh et al., 2018).
- La technique SMART (Simple multiattribute rating technique) consiste à classer dans un premier temps les indicateurs par ordre de priorité. Puis en commençant par l'indicateur le moins important, une évaluation de l'importance relative de l'indicateur suivant est attribuée. Pour finir, les pondérations sont normalisées (Németh et al., 2018; Odu, 2019). Cette méthode nécessite  $(n - 1)$  étapes pour la classification des indicateurs auxquelles s'ajoutent  $(n - 1)$  étapes pour l'attribution de la pondération aux  $n$  indicateurs soit un total de  $2 \times (n - 1)$  questions pour les

parties prenantes. Cette méthode est donc relativement rapide et simple. Cependant, les augmentations successives des pondérations attribuées aux indicateurs peuvent amener à un écart très important entre les pondérations du premier indicateur et du dernier. Par ailleurs, des biais peuvent apparaître en raison de la difficulté à quantifier l'importance relative entre deux indicateurs successifs (Németh et al., 2018).

- La méthode AHP (Analytic Hierarchical Process) consiste à classifier les indicateurs selon plusieurs niveaux et effectuer des comparaisons par paires des indicateurs ce qui permet d'établir une matrice de préférence. La méthode repose ensuite sur la recherche mathématique des vecteurs propres de cette matrice pour déterminer les pondérations de chaque indicateur. La méthode propose également le calcul d'un ratio de cohérence qui vérifie la cohérence des comparaisons par paires effectuées (Németh et al., 2018). Cette méthode est particulièrement adaptée aux analyses comportant un grand nombre d'indicateurs car elle permet de limiter le nombre de comparaisons en raison de la structure hiérarchique. Il y a un maximum de  $\frac{n(n-1)}{2}$  comparaisons nécessaires. Néanmoins, les échelles définies par les chercheurs pour attribuer une valeur à un jugement quantitatif peuvent être biaisées, et les comparaisons de priorisation entre plusieurs parties prenantes ne sont possibles que si celles-ci ont utilisé la même hiérarchie (Németh et al., 2018).
  - La méthode DCE (Discrete choice experiments) propose aux décideurs de porter une préférence entre deux indicateurs avec la possibilité de ne choisir aucun des deux indicateurs. Les préférences implicites sont ensuite obtenues par des méthodes statistiques (Németh et al., 2018). La principale difficulté de cette méthode réside dans la nécessité d'un très grand nombre de participants à la pondération (plusieurs centaines) pour permettre l'élaboration d'un modèle statistique et limiter le nombre de questions par personne (Németh et al., 2018).
- 
- Capacité à passer du diagnostic à l'acte :

Ce critère permet d'évaluer l'accompagnement des décideurs par l'outil pour l'interprétation des résultats et la proposition de mesures pour l'amélioration des projets.

Parmi les trois outils analysés, l'outil de calcul de l'indice de risque des projets miniers ne propose pas d'interprétation des résultats ni d'accompagnement pour l'amélioration du projet. En revanche, la GADD propose d'une part un onglet d'interprétation des résultats obtenus et d'autre part la définition des enjeux prioritaires pour permettre l'amélioration de la performance du projet. Ainsi, les décideurs connaissent les axes d'amélioration prioritaires pour lesquels proposer des évolutions garantissant une meilleure évaluation globale du projet. Enfin, l'analyse des résultats avec ToSIA repose sur une analyse des coûts et des bénéfices du projet évalué.

Le Tableau 1 ci-dessous récapitule la comparaison des outils choisis dans le cadre de cette revue de littérature des outils existants. Cette analyse montre qu'aucun des outils étudiés ne satisfait à l'intégralité des critères, ce qui justifie le besoin d'un outil spécifique au contexte bioénergétique québécois. Cet outil doit en particulier répondre aux critères d'accessibilité et d'accompagnement des décideurs dans la prise de décision, tout en intégrant les parties prenantes au processus décisionnel.

Tableau 1 Récapitulatif de la comparaison des outils d'aide à la décision choisis en se basant sur les critères d'Isabelle Bastien (2012).

		TOSIA	MINING RISK	GADD
Accessibilité	Rapidité d'exécution	+	++	+
	Présence d'un guide d'utilisation	+	+	+++
Contenu	Intégration des dimensions du développement durable	++	+	+++
	Adaptation au contexte bioénergétique	+++	+	++
	Adaptation au contexte Québécois	+	+++	++
Prise de décision	Comparaison de scenarios	+++	+	+
	Consultation des parties prenantes	+	+	+
	Intégration d'un système de pondération	+	+	++
	Capacité à passer du diagnostic à l'acte	++	+	+++

## 1.5 Problématique

Les bénéfices de la bioénergie forestière peuvent être conséquents et avérés, mais les conditions de mise en œuvre d'un projet de bioénergie forestière peuvent faire varier ces bénéfices escomptés dans le cadre du projet. La communauté métropolitaine de Québec (CMQ) envisage de développer des projets de chauffage à la bioénergie forestière pour les bâtiments institutionnels et commerciaux sur son territoire. Néanmoins, consciente de l'importance d'une analyse complète, précise et multicritère des projets envisagés, elle demande la mise en place d'un outil d'aide à la décision durable qui s'appuie sur une analyse multicritère des différents aspects des projets, tout en permettant la comparaison de plusieurs scénarios d'un même projet et l'intégration des parties prenantes au processus décisionnel, afin d'estimer les bénéfices du projet, mais aussi anticiper et mitiger les éventuels effets néfastes de celui-ci.

## 1.6 Objectifs général et spécifiques

L'objectif de ce projet est de développer un outil d'aide à la décision pour les projets de chauffage des bâtiments commerciaux et institutionnels à la biomasse forestière au Québec. L'outil développé dans le cadre de ce projet devra :

- Permettre l'évaluation et la comparaison de scénarios pour un projet de chauffage à la biomasse forestière:
  - en aidant les décideurs dans le choix d'un scénario adapté aux exigences particulière d'un projet;
  - en accompagnant les décideurs dans l'amélioration d'un projet pour en garantir l'optimisation des bénéfices;
  - en intégrant les parties prenantes du projet dans les processus de prise de décision.
- Permettre la prise de décision informée d'un projet de chauffage à la bioénergie forestière:

- en évaluant les impacts sociaux, économiques et environnementaux des scénarios;
- en proposant une analyse comparative des scénarios de chauffage à la bioénergie forestière.
- Permettre le développement participatif de l'outil d'aide à la décision:
  - en proposant une base de données accessible pour de futurs études et travaux de recherche;
  - en permettant le renseignement participatif de l'outil pour développer de nouvelles connaissances.



## **CHAPITRE 2**

### **DEVELOPMENT OF A MULTI-CRITERIA ANALYSIS DECISION-SUPPORT TOOL FOR THE SUSTAINABILITY OF FOREST BIOMASS HEATING PROJECTS IN QUEBEC**

Raphaël Dias Brandao <sup>a</sup>, Annie Levasseur <sup>a</sup>, Evelyne Thiffault <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,  
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

<sup>b</sup> Département des sciences du bois et de la forêt, faculté de foresterie, de géographie et de  
géomatique, Université Laval, Canada G1V 0A6

Article soumis pour publication dans « Ecological Indicators », 22 juin 2021

#### **2.0        Abstract**

Residual forest biomass for heating is an alternative to fossil fuels that is in line with global greenhouse gas emission reduction targets. Even if the opportunities and the benefits of such projects may be important, one should not neglect the barriers and potential impacts of these projects to assess their sustainability. The decision support tool developed and presented in this paper will help guide and support public decision makers in selecting the best project and improving its sustainability. A reliable and relevant weighting method is determined, based on the use of the Analytic Hierarchical Process multi-criteria decision analysis method, allowing the integration of stakeholders and the consideration of their views and opinions. This choice, combined with the privileged use of quantifiable qualitative data, allows the use of the tool in a preliminary phase of the project development, and enables the evaluation of the project and its sustainability from a social acceptability perspective. The tool was applied to two fictitious scenarios to demonstrate its ability to guide decision making and to highlight the differentiation of weights and scenarios through both weighting and evaluation methods.

## 2.1 Introduction

Bioenergy produced from forest biomass feedstock has a strong potential to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and contribute to the transition towards more sustainable heating technologies. Globally, energy production from forest biomass could rise from 132 TWh ( $10^{12}$  Wh) in 2001 to 1168 TWh by 2030 (International Energy Agency, 2019). Following the example of other jurisdictions around the world, the province of Quebec, Canada, aims to increase the production of renewable energy by 25% by 2030 and has made plans to convert fossil-based heating systems of institutional and commercial buildings to forest biomass heating (Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources naturelles, 2017). Currently, the Quebec energy system relies mainly on hydro resources that provide cheap electricity to the province, and on cheap North American fossil resources from Western Canada and the United States (Whitmore & Pineau, 2020). However, the boreal forest, that covers a large part of the province, can provide biomass in large quantities which, associated with the well-developed forest industry of the province, becomes an alternative for the conversion of heating systems to bioenergy.

The benefits of these conversions can be multiple: i) economic, via the creation of new value chains (Asikainen et al., 2016), ii) environmental, via the reduction of GHG emissions or iii) social, with the creation of jobs for local communities. Nevertheless, there are still many risks and obstacles preventing the development of the sector. These include organizational risks associated with the coordination of the forest bioenergy value chain, which includes many stakeholders and needs to be harmonized with the supply chains for conventional wood products. Environmental risks also need to be considered, including the impact of residual forest biomass removal on soils and biodiversity. Some stakeholders state awareness of bioenergy development and generally support it when sustainability requirements are met, while others, including the general public, are less aware which tends to reduce the social acceptability (Mai-Moulin et al., 2019).

To help support the deployment of bioenergy policies and inform stakeholders about benefits and impacts of energy systems conversion, decision support tools for assessing the sustainability of forest bioenergy have been developed in recent years. A literature review by Scott, Ho, and Dey (2012) shows that existing tools focus mainly on the choice of the most suitable technological solution (27% of the tools studied), while only 14% of them address the sustainability of projects. Furthermore, the tools studied were mainly developed for Europe (63%), while only 23% were from North America (Scott, Ho, & Dey, 2012). For example, the Tool for sustainability impact assessment (ToSIA) is a decision support tool developed by the European Forest Institute (European Forest Institute, 2013) that brings together economic, social and environmental indicators. It has been developed mainly for the context of the European forests, although it can be adapted to other regions. However, in the case of regions for which the bioenergy sector is still in its infancy, hard data are often difficult to generate in the absence of comparative projects, making quantitative analyses with tools such as ToSIA difficult to perform. Moreover, a literature review by Zahraee, Shiawakoti, et Stasinopoulos (2020) shows there is a lack of simultaneous analysis of social, economic and environmental dimensions in multi-objectives approaches and that most of the tools are inadequate for strategic level, which lead to a need for more qualitative analysis of sustainability that can be applied at the first stages of project design. The tool would mainly focus on the social acceptability of projects in the context of sustainable development. Indeed, promoting the integration of stakeholders at the outset of energy projects, and facilitating their cooperation and buy-in, are essential steps especially in the context of emerging sectors.

The tool developed meets the need for a decision support tool that integrates stakeholders into the decision-making process to ensure the social acceptability of projects, while guaranteeing a complete sustainability analysis that includes all the dimensions of sustainable development and even though the tool is intended to be used in the preliminary development phase of forest biomass heating projects, which makes quantitative data scarce.

The tool is based on the analytic hierarchy process (AHP) for weighting indicators. Four methods for determining weights were compared: 1) the direct rating method which, despite its simplicity and quick use, presents a high risk of bias (Németh et al., 2018), 2) the simple multiattribute rating technique (SMART), which is not time-consuming but can be difficult to use when the number of indicators is high (Németh et al., 2018), 3) the discrete choice experiment (DCE) method, which is a statistical method that requires a large number of participants to evaluate the weights (Németh et al., 2018), and finally 4) the analytic hierarchy process (AHP) method, which relies on the simple technique of pairwise comparisons while limiting their number and therefore, the time required for information. The AHP method also ensures the reliability of the data entered (Németh et al., 2018). This method, which is widely used in risk analysis, has been adapted to the context and framework of the tool to integrate stakeholders into the decision-making process and to allow for a high degree of differentiation between the different weightings provided.

Finally, to ensure that the tool works well and to evaluate its ability to meet the research objectives, it has been applied to a fictitious case study. The objective is to demonstrate the tool's ability to help decision-makers by allowing them to effectively compare scenarios, while considering the divergent points of view of stakeholders.

## 2.2 Method

The methodology implemented for the development of this tool was based on four distinct but interconnected stages as shown in Figure 1. These stages are: i) the identification of indicators adapted to the Quebec forest bioenergy context and to the expectations of stakeholders, ii) the determination of an appropriate weighting method, iii) the development of an indicator evaluation method and iv) the verification of the tool and its ability to meet the objectives.

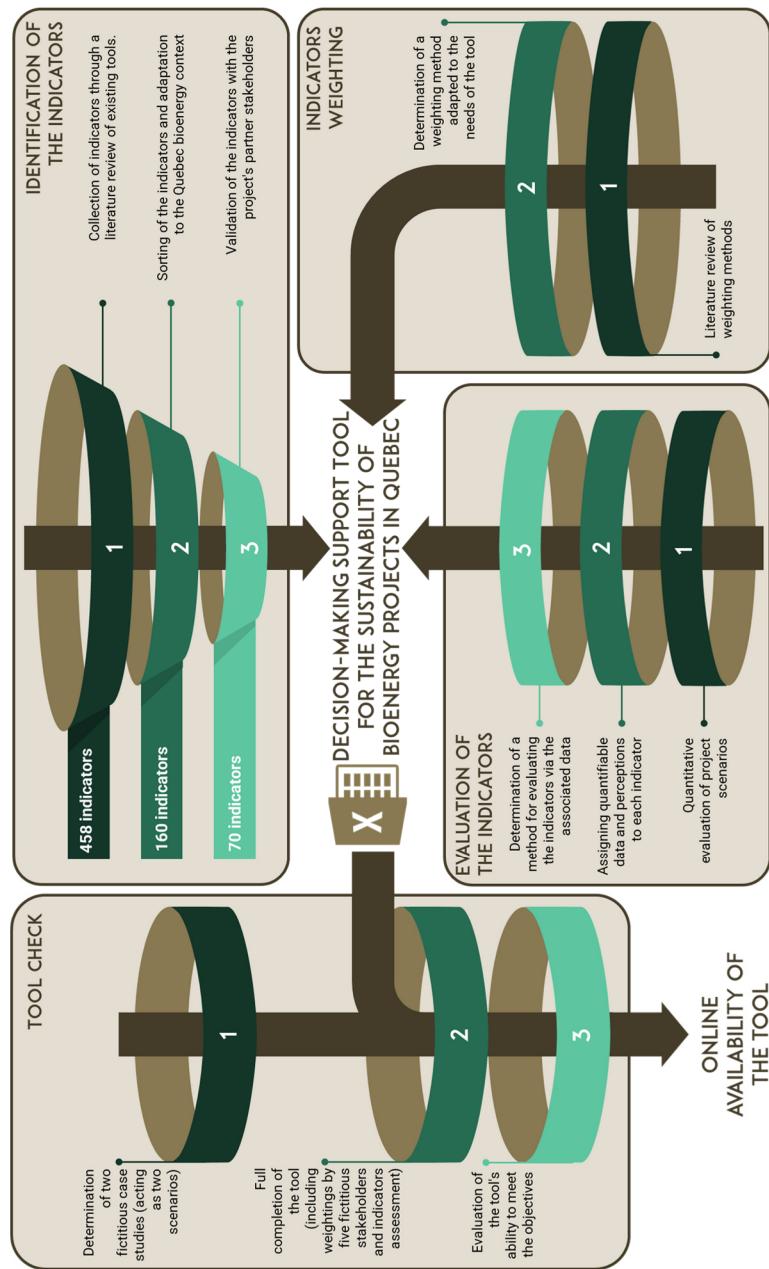


Figure 1 Research methodology implemented to meet the research objectives and enable the development of the tool

### 2.2.1 Selection of indicators

The selection of indicators was based on the review of existing decision support tools that were relevant for the sustainability assessment of natural resource projects. Since no existing tool analysed the sustainability of bioenergy projects in the Quebec context, the tools used in the literature review were chosen for their ability to provide reliable information on specific aspects needed in the tool. These tools included : i) a tool to address the sustainability of bioenergy projects in a boreal context through the Tool for Sustainability Impact Assessment (ToSIA) (European Forest Institute, 2013), ii) a tool focusing on bioenergy risks in North America with the Biomass supply chain risks standards (BSCR Standards). This tool is a database of risks associated with forest biomass value chains created by Ecostrat (Ecostrat & Natural Resources Canada, 2019); iii) a tool addressing social acceptance in the specific context of Quebec with the tool calculating the social risk index for mining projects, This tool, developed by the Chair in Mining Entrepreneurship at the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue notably explores relationships of projects with the needs and aspirations of communities (Bergeron et al., 2015); and iv) a more complete tool that offers an analysis beyond the 3 classic dimensions of sustainable development (environmental, social and economic) with the sustainable development analysis grid (GADD). This tool created by the chair in eco-counseling at the Université du Québec à Chicoutimi (Villeneuve et al., 2016) is the most accomplished and detailed found since it considers six main dimensions to evaluate the sustainability of a project, and thus allows an analysis of sustainability closer to the most recent definitions of sustainable development.

The list obtained contained more than 450 indicators. While economic, environmental and social indicators were numerous, some indicators were also related to cultural, ethical and governance dimensions of sustainability.

Indicators were then sorted and selected, based on the following criteria:

- 1) the relevance of the indicator for the user, *i.e.* the extent to which the indicator allows the evaluation of a forest bioenergy project in conditions relevant for Quebec (Dale, Efroymson, Kline, & Davitt, 2015; Niemeijer & de Groot, 2008; Thivierge, 2011),
- 2) the ability to differentiate between scenarios of a bioenergy project to support decision-making (Niemeijer & de Groot, 2008). Indeed, the tool must help decision-makers choose the best scenario, so an indicator which cannot differentiate between scenarios is considered superfluous and complicates the tool while lengthening the time required to complete it.
- 3) the ability to provide a comprehensive and detailed view of a project sustainability to ensure that all aspects of a forest bioenergy project are assessed within the framework of the tool (Dale et al., 2015; Niemeijer & de Groot, 2008), and finally
- 4) the availability of the information needed to qualify the indicator (Niemeijer & de Groot, 2008; Thivierge, 2011; Timonen, Reinikainen, Kurppa, & Riipi, 2021).

After sorting, indicators were adapted to forest bioenergy in the context of boreal regions such as Quebec. To do this, indicators were modified and renamed to correspond to this specific context, but also to improve the user understanding as it has been identified as a criterion for maintaining the indicator (Niemeijer & de Groot, 2008; Thivierge, 2011). In addition, it was important to adapt indicators to the local or regional level at which the tool will be used. Moreover, it was essential to consider local indicators in addition to the global ones (Timonen et al., 2021). For example, impacts on biodiversity or soils are assessed at a local scale, while impact on GHG emissions is assessed at a larger scale (depending on the supply chain) (Meyer & Priess, 2014).

These sorting and adaptation steps resulted in a total list of 160 indicators. This list was then submitted to a focus group of partners. The selected partners were representatives of organisations in Quebec that are involved in the development of forest bioenergy projects including public policy makers and non-governmental organisations. They were specifically

selected for their knowledge of the sector and for their awareness of the needs of local and regional decision-makers involved in energy projects. During meetings of the focus group, feedback was collected on the content of the tool and the list of indicators, but also on the operation of the tool and its adequacy with the expectations and needs of the partners. As a result, some indicators were merged or adapted, while others were removed because they did not fit the need.

At the end of this process, 70 indicators grouped into 30 themes and six dimensions were integrated in the tool (as shown in Table 2). The choice of this breakdown into six dimensions corresponds to the need to satisfy the pillars of sustainable development, *i.e.* classically, the social, economic and environmental dimensions, to which ethical, cultural and governance dimensions were added. This analysis of 6 dimensions is in line with the 17 sustainable development goals defined by the UN and follows the evolution of the definition of sustainable development.

Those indicators are not directly evaluated in the tool and each of them regroups several data. The determination and the attribution of data to each indicator is explained in section 2.3.

Table 2 The 70 indicators selected for the decision-support tool are divided into 30 themes and six dimensions

	C.1.1	Cultural heritage
	C.1.2	Use and significance of the project site
	C.1.3	Knowledge of the past and history
	C.2.1	Freedom and pluralism of beliefs and identities
	C.2.2	Development of cultural expression
	C.2.3	Access to culture for all
	C.3.1	Interculturality
	C.3.2	Recognition of cultural minorities
	C.3.3	Linguistic diversity
Cultural	Transmission of cultural heritage	C.1.1 Cultural heritage C.1.2 Use and significance of the project site C.1.3 Knowledge of the past and history
	Cultural and Artistic Practices	C.2.1 Freedom and pluralism of beliefs and identities C.2.2 Development of cultural expression C.2.3 Access to culture for all
Economic	Cultural diversity	C.3.1 Interculturality C.3.2 Recognition of cultural minorities C.3.3 Linguistic diversity
	Production and consumption	Ec.1.1 Responsible production Ec.1.2 Responsible consumption
	Economic viability	Ec.2.1 Economic sustainability of the project Ec.2.2 Financial risks

	Economic ethics	Ec.3.1	Responsible financing and investment
		Ec.3.2	Social and solidarity economy
	Economic Development	Ec.4.1	Regional development
	Transport	Ec.5.1	Transportation costs
Environmental	Ecosystems and Biodiversity	Env.1.1	Ecosystems
		Env.1.2	Protection of biodiversity
	Soil conservation	Env.2.1	Chemical and biological properties of soils
		Env.2.2	Physical properties of soils
	Resources	Env.3.1	Wise use of resources
		Env.3.2	Management of damaged or dead wood
	Emissions and outputs	Env.4.1	GHG Emissions
		Env.4.2	Toxicity
		Env.4.3	Waste Management
	Water	Env.5.1	Water pollution
		Env.5.2	Water use
Ethics	Forest land use planning	Env.6.1	Optimization of the territory and conflicts of use
		Env.6.2	Landscape diversity
	Natural hazards	Env.7.1	Meteorological conditions
		Env.7.2	Forest Fires
		Env.7.3	Insects and diseases
	Responsibility	Et.1.1	Precautionary Principle
		Et.1.2	Credibility of promoters
	Sharing	Et.2.1	Optimization of benefits
		Et.2.2	Sharing of common goods
	Ethical approach	Et.3.1	Ethical purpose of the project
Governance		Et.3.2	Shared values
	Transparency	Et.4.1	Transparency and integrity
		Et.5.1	Damages and compensations
	Benevolence	Et.5.2	Solidarity
		Et.5.3	Openness and dialogue
	Institutions	G.1.1	Institutional Efficiency and Accountability
		G.2.1	Relationship with suppliers
	Supplier contracts	G.2.2	Legal aspects
		G.2.3	Resource quality requirements
		G.2.4	Resource quantity requirements
		G.2.5	Adaptation to the local market
		G.2.6	Supply Chain Resilience
Social	Management	G.3.1	Instruments and Processes
		G.3.2	Risk Management
		G.3.3	Monitoring and control
		G.3.4	Information and communication
		G.3.5	Decision Making
	Stakeholders	G.4.1	Participation
		G.4.2	Support and acceptability
	Local community	S.1.1	Community Support
		S.1.2	Social acceptability
	Sharing of natural resources	S.2.1	Integrated water management

	S.2.2	Conflicts of land use
Work	S.3.1	Job creation
	S.3.2	Working conditions
	S.4.1	Health
Quality of life	S.4.2	Well-being
	S.4.3	Living environment
	S.5.1	Gender Equality
Equality	S.5.2	Respect for minorities
	S.5.3	Generational discrimination
Education for sustainable development and citizenship	S.6.1	Education for sustainable development and citizenship

## 2.2.2 Weighting method

The weighting of indicators consists in assigning a numerical coefficient to the indicators to show their importance compared with others (Cambridge dictionary, 2020). The integration of a weighting method in a decision support tool is not essential, and many tools do not integrate this functionality or at least do not have reliable and efficient weighting methods. Nevertheless, the absence of a weighting method means that the indicators are given an arbitrary weighting and are then considered to be equivalent. This possibility is left as an option for the users of the tool and an adapted method of weighting the indicators is proposed. This method also allows stakeholders to get involved in the decision-making process by prioritizing indicators, and therefore the project orientations, according to their convictions, opinions, and points of view.

The method chosen for the determination of weights was inspired by the Analytic Hierarchical Process (AHP). Developed in the 1980s by Thomas Saaty, this method has since been widely used in decision making and weighting problems (Saaty, 1980). The method is based on pairwise comparisons of indicators organized in different hierarchical levels. The choice of this method is justified by several factors. First, the large number of indicators did not allow for prioritization methods by direct comparison; in fact, comparing the 70 indicators would have resulted in a total of  $70 \times (70 - 1)/2 = 2415$  comparisons. As the tool, and particularly the weighting part, is intended to be used by a non-initiated public, the aim is to limit the time

needed to fill in the weights. By using hierarchical levels, the AHP method allows a total of 144 comparisons, which is more reasonable. Secondly, unlike statistical methods, the AHP method makes it possible to obtain a valid weighting from just one evaluator, which in the context of the project is a crucial element since it limits the use of a large number of stakeholders. Finally, the AHP method provides a standard scale of comparison that facilitates and standardizes evaluations, as well as an assessment of the consistency of the comparisons made.

Indicators were organized into six dimensions (level 1 of the hierarchy), broken down into 30 themes (level 2), which in turn were broken down into 70 indicators (level 3). For each of the levels, all possible pair-wise comparisons within that level are evaluated. A total of  $n(n-1)/2$  comparisons are required at each hierarchical level to calculate the weights assigned to the n dimensions, themes or indicators. Figure 2 shows an example of hierarchical tree used in the AHP method and the number of pair comparisons needed in each level.

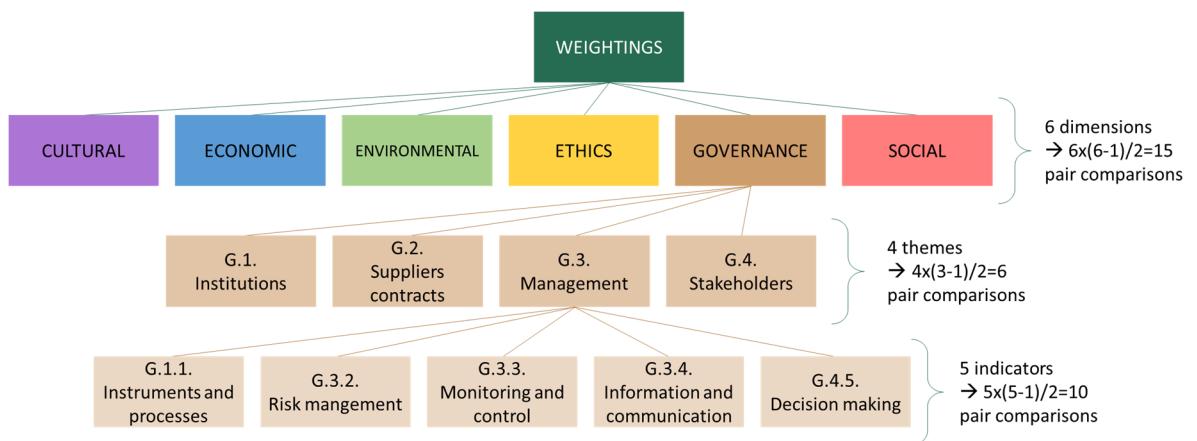


Figure 2 Example of hierarchical tree for indicators in theme G.3. Management, of the governance dimension.

A so-called Saaty scale ranging from 1 (both indicators A and B are equivalent) to 9 (indicator A is extremely more important than indicator B) is defined and allows comparison of indicators

according to the preponderance of one indicator over the other (Saaty, 1990). Figure 3 shows the weighting tab of the tool.

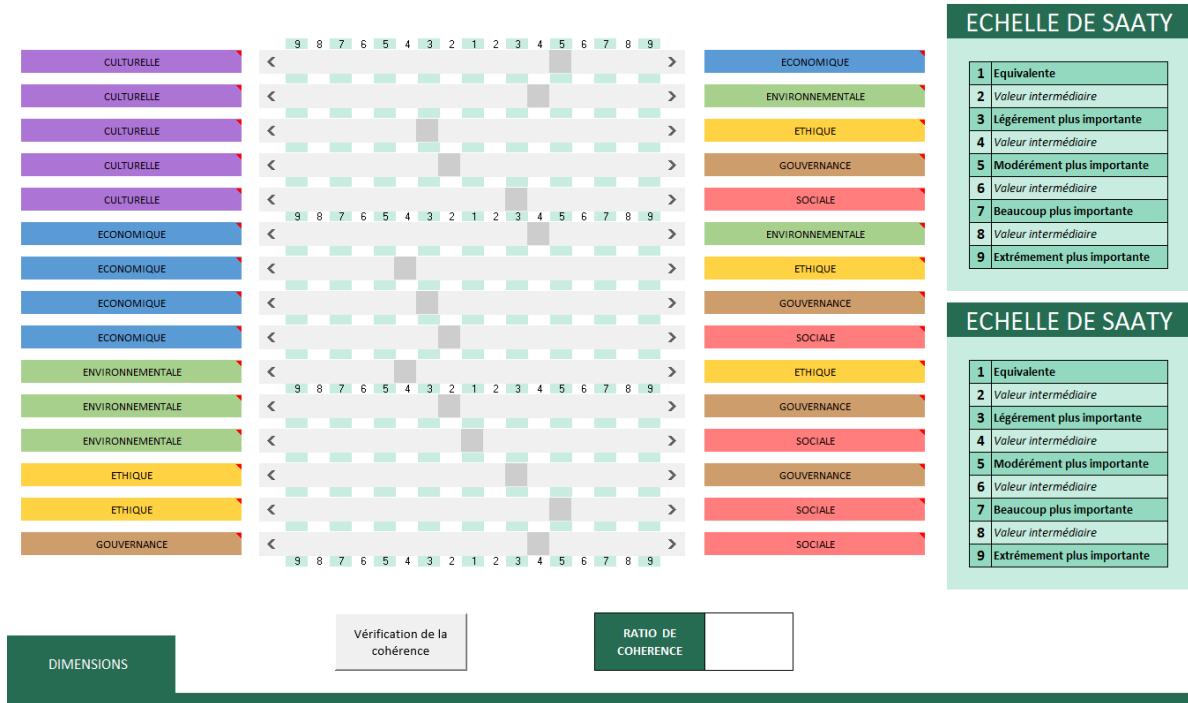


Figure 3 Screenshot of the tool showing the pairwise comparison of the different dimensions considered in the tool to allow the determination of weights for each of them using the AHP method

The set of comparisons for a given theme creates a preference matrix whose eigenvalues allow the calculation of the weights of each indicator in the theme (Saaty, 1990). The formula for calculating the weights obtained from the preference matrix is given by the following equation:

$$W_x = \frac{1}{N} \sum_{y=1}^N \frac{p_{x,y}}{\sum_{1 \leq z \leq N} p_{z,y}} \quad (2.1)$$

Where  $[W_x]_{x \in [1,N]}$  is the column vector of weights,  $[p_{x,y}]_{x,y \in [1,N]}$  is the preference matrix and N is the number of dimensions, themes or indicators depending on the hierarchical level.

By combining the calculation of the weights of the themes in each dimension and the calculation of the weights of the dimensions, the global weighting of each indicator can be obtained by the following formula:

$$w_k = \alpha_{ijk} \times w_i \times w_{ij} \times w_{ijk} \quad (2.2)$$

Where  $w_k$  is the final weight of indicator  $k$ ,  $w_i$  is the weight of dimension  $i$ ,  $w_{ij}$  is the weight of theme  $j$  in dimension  $i$  and  $w_{ijk}$  is the weight of indicator  $k$  in theme  $j$  of dimension  $i$ . Finally,  $\alpha_{ijk}$  is a corrective factor that balances the weights. Indeed, the number of indicators in a theme or the number of themes in a dimension being variable, it is important to correct this error by integrating this  $\alpha_{ijk}$  factor defined by:

$$\alpha_{ijk} = \frac{N_i \times N_{ij} \times N_{ijk}}{N_{total}} \quad (2.3)$$

Where  $N_i$  is the number of dimensions (6),  $N_{ij}$  is the number of themes  $j$  in dimension  $i$ ,  $N_{ijk}$  is the number of indicators  $k$  in the theme  $j$  of dimension  $i$  and  $N_{total}$  is the total number of indicators (70).

The interest of the AHP method lies mainly in the calculation of the consistency ratio, which ensures that comparisons made by stakeholders are consistent. This ratio is calculated by dividing the consistency index CI, which is derived from the calculation of eigenvalues, by a random consistency index RI that depends on the number of indicators compared (between 3 and 11):

$$CR = \frac{1}{RI} \times \frac{1}{N-1} \times \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{W_i} \sum_{k=1}^N W_k p_{i,k} - N \right] \quad (2.4)$$

Where  $[W_i]_{i \in [1, N]}$  is the column vector of weights,  $[p_{x,y}]_{x,y \in [1, N]}$  is the preference matrix and  $N$  is the number of dimensions, themes or indicators depending on the hierarchical level.

If this ratio is less than 10%, then the comparisons made can be considered consistent. In the case where only two indicators are compared, a consistency ratio cannot be calculated, but the method remains valid since there can be no inconsistency in the comparison of only two indicators (Saaty, 1990).

### **2.2.3 Development of an evaluation method based on the indicators**

The evaluation of indicators is based on two main and complementary aspects. On the one hand, a quantitative and comparative evaluation of the three potential scenarios based on a user-defined value chain, and on the other hand, a qualitative analysis based on a series of quantifiable perceptual data. Each indicator is then assigned a combination of data from both analyses that allows the indicator to be rated and a performance to be assigned to each scenario.

#### **2.2.3.1 Quantitative analysis**

The quantitative analysis is an essential step in supporting the decision-making process for the most suitable scenario. Nevertheless, as the tool is intended to be used in a preliminary phase of project planning, precise quantitative data are rare and usually poorly defined. For this reason, the choice of relevant quantitative data was based on their ability to differentiate between scenarios while requiring only a limited amount of generic input data. One economic criterion and four environmental criteria were chosen:

- Production costs
- Use of fossil resources
- GHG emissions
- Emissions of other gases

- Emissions of particles

To perform this technical analysis, the tool relies on the definition of value chains according to the model developed in ToSIA (Lindner et al., 2010), and adapted to the case of forest bioenergy in Quebec.

Six value chains have been identified, depending on the type of felling (whole trees or cut down trees) and the type of bioenergy product obtained (standard pellets, torrefied pellets or forest chips). These value chains are defined by a series of processes decomposed into four modules (Werhahn-Mees, Palosuo, Garcia-Gonzalo, Röser, & Lindner, 2011) :

- Forest resources management
- Forest to industry interactions
- Processing and manufacturing
- Industry to consumer interactions

Nevertheless, given that the objective of the tool is to allow the comparison of scenarios in order to differentiate them as much as possible, the tool ignored the first module because all the proposed scenarios were based on the same processes for this module. The user can then adapt the value chain by choosing the steps of the wood transformation process, to ensure a greater conformity to the reality of the scenario. Figure 4 shows an example of a value chain proposed by the tool.

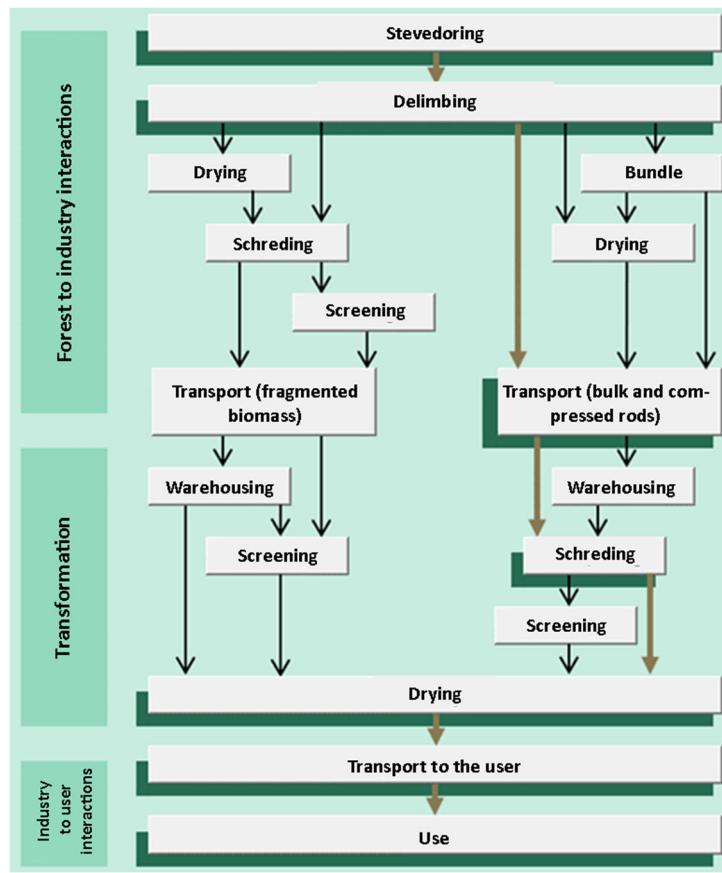


Figure 4 Example of a value chain for the forest chips product type and full-tree felling. The thick brown arrows represent the studied value chain. The thin black arrows represent the possible alternatives.

Input data was associated to each of the processes defined in the value chain and chosen by the user for a given scenario. This allows the calculation of the quantitative criteria defined above. Default values for the different input data were proposed to allow the evaluation of the five criteria in case the specific information is not available at the premature stage of scenario analysis during which the tool is intended to be used. These default values were obtained through a literature review of the costs associated with the various processes and the environmental impacts of these same processes (Locoh & al., 2021).

In addition, other quantitative data can be evaluated in the tool if the necessary information is available. These data do not rely on the use of the value chain to be evaluated.

### **2.2.3.2 Qualitative analysis**

The aim of the qualitative analysis is to evaluate and compare the different scenarios of a project at the preliminary stage where the tool is going to be used. The objective of this analysis is to ensure that all aspects of sustainability were considered in the scenarios by questioning the measures put in place or planned in each of them, but also by assessing the user perception of the current state of an indicator.

Qualitative data that assess the current state of an indicator are evaluated using a scale of 1 to 5. For qualitative data that assess actions implemented or planned, the assessment is done using a two-step scale. First, the importance of the action in the context of the project scenario and objectives is rated on a scale of 1 to 3, and then the effect of the actions taken or planned is rated on a scale of 1 to 5.

The assessment of qualitative data, unlike the assessment of weights, can only be done by one person (usually the project manager, commissioned by the decision-maker) since the length of time and level of knowledge required makes it difficult for all stakeholders to evaluate. Nevertheless, it is recommended for perceptions to be filled in following meetings with project stakeholders to consider their point of view on each of the indicators evaluated.

### **2.2.3.3 Conversion of evaluations to scenario performance**

The different types of data presented are assigned to the different indicators. Each indicator is therefore assessed by a combination of three types of data, including quantitative data, quantifiable perceptions assessing the current state, and evaluations of measures implemented

or planned as part of the biomass heating project. The objective is to compile the evaluations of these data to obtain an overall performance for all scenarios to support decision-makers.

The first step in the overall conversion is to convert all the data evaluations to a common scale rating. Each indicator is assigned a rating between -2 and +2. For the quantitative data, the scenario with the best result is assigned a +2 rating while the scenario with the worst result is assigned a -2 rating. The intermediate scenario is assigned a 0 rating. For qualitative criteria that assess the current state of the indicators, a linear conversion from a scale of 1 to 5 to a scale of -2 to +2 was used. For qualitative criteria that assess the measures in place or planned, the conversion Table 3 adapted from the work done in the GADD was used (Villeneuve et al., 2016). This table allows to convert the double evaluation (level of need for the measure and effect of the measure) into a single rating.

Table 3 Conversion table for qualitative data assessing actions taken or planned

		Effect of the measure						
Level of need of the measure		1	2	3	4	5		
	1	■	■	■	◆	◆	▲	Urgent and effective measures (to be maintained) +2
	2	♥	●	●	▲	▲	▲	Effective but not urgent action (not a priority issue) +1
	3	♥	♥	●	▲	▲	▲	Measures not very effective but not very urgent (distant issue) 0
					●			Moderately effective and moderately urgent measures (to act) -1
					♥			Measures not very effective but urgent (to react) -2

A score for each indicator could then be obtained by averaging the data ratings associated with that indicator. To facilitate the understanding of this score, it has been defined on a scale from 1 to 5 after linearly converting the score between -2 and 2 obtained by averaging the data ratings.

Once the scores for each indicator are defined, the performance of the themes and dimensions as well as the overall performance for each of the scenarios could be defined by averaging the scores for each indicator multiplied by the weight assigned in the weighting step. This

performance is therefore dependent on the stakeholder who filled in the weightings and there are as many performances as there are stakeholders.

#### **2.2.4 Case study**

To analyze the tool and evaluate its added value in the decision-making process, a focus has been given on a fictitious Quebec municipality that wishes to develop the bioenergy sector from residual forest biomass. The municipality is faced with the difficulty of differentiating between several projects and would therefore like to be assisted by a decision support tool to make the best choice. Although fictitious, this situation is representative of the current situation in Quebec, and the scenarios proposed hereafter echo projects implemented in the past or in progress (Transition énergétique Québec, 2021). The objective of this case study is not to make a real comparison of scenarios, which would be meaningless, as the evaluations and weights are filled in by the authors. However, the purpose of this case study is to show the contribution of the tool to decision support, by presenting the results offered by the tool and the analysis that can be drawn from them in the context of the tool's use.

##### **2.2.4.1 First scenario: Implementation of a 3 MW heating plant**

The first scenario consists in the implementation of a 3 MW forest biomass heating plant in a Quebec municipality to heat a network of municipal institutional buildings.

The main objective of this scenario is to make long-term savings on the purchase of the energy resource by establishing a local supply chain that relies on the municipality's own forest resources, supplemented by the forest resources of private landowners under contract. Nevertheless, the reduction of GHG emissions is also part of the project since the municipality must participate in the collective effort to reduce GHG emissions and reach Quebec's objectives. Finally, the city hopes to create new jobs along the supply chain.

However, efforts will have to be made to assess the potential environmental impacts, particularly on soil, water and biodiversity. In addition, given the relative importance of the scenario to the municipality, particular attention will have to be paid to the governance of the project throughout its lifetime, especially in terms of management and stakeholders participation.

#### **2.2.4.2 Second scenario : Installation of a 50 kW boiler**

The second scenario focuses on the implementation of a 50 kW boiler in a church in the city. The main objective of this scenario is to revitalize a heritage building in the city in order to preserve it from being sold, which could have led to a reclassification of the site and its transformation or even destruction. Although smaller in scale, this project must nevertheless ensure a certain economic viability as well as a reliable supply that will rely exclusively on the municipality's forest resources. Particular attention will be paid to community support for the project.

#### **2.2.4.3 Engaged stakeholders**

It is assumed that the tool is completed by a designated evaluator from the municipality that initiated the project. However, the weights are determined by five different stakeholders from different sectors and backgrounds, representing the diversity within the municipal and regional community.

These fictitious stakeholders include:

- A municipal representative who is responsible for carrying the municipality ambitions and promoting its objectives. The municipal representative is also the project evaluator.
- Two community representatives responsible for representing the views of residents.
- A representative of the forest supply chain companies, including harvesting, processing and transportation of biomass.

- A representative of local forest owners.

The tool was completed for these two projects and the results are presented and discussed in the following sections.

## **2.3 Results and discussion**

The results of the analysis of the three scenarios of a forest bioenergy project are presented in two tabs of the tool. The first tab, entitled "Results", presents the prioritization of the different stakeholders, the performance of the different dimensions for a given scenario and the comparison of the assessment of each scenario for all indicators. The second tab, "Analysis", allows for three comparative analyses: the first focuses on the main differences between the weights assigned by stakeholders. A second analysis compares the scores assigned to each scenario. Finally, a third analysis highlights the strengths and weaknesses of each scenario.

Each of the results presented in this section is then discussed to show the contribution of the tool to decision support in the particular context of its use, *i.e.* in a preliminary phase of development of forest biomass heating projects, in order to ensure the sustainability of the project and its acceptability to the different stakeholders.

### **2.3.1 Prioritization of indicators by stakeholders**

The first result proposed by the tool is the display and comparison of the weights assigned to the indicators and the resulting prioritization of indicators (Supplementary online material A).

This comparison allows the differences and points of divergence between the stakeholders to emerge.

For the case study and for comparison purposes, the prioritizations are displayed in Figure 5, in the form of a graph showing the relative importance of the stakeholders' prioritizations of the indicators, according to the dimension considered.

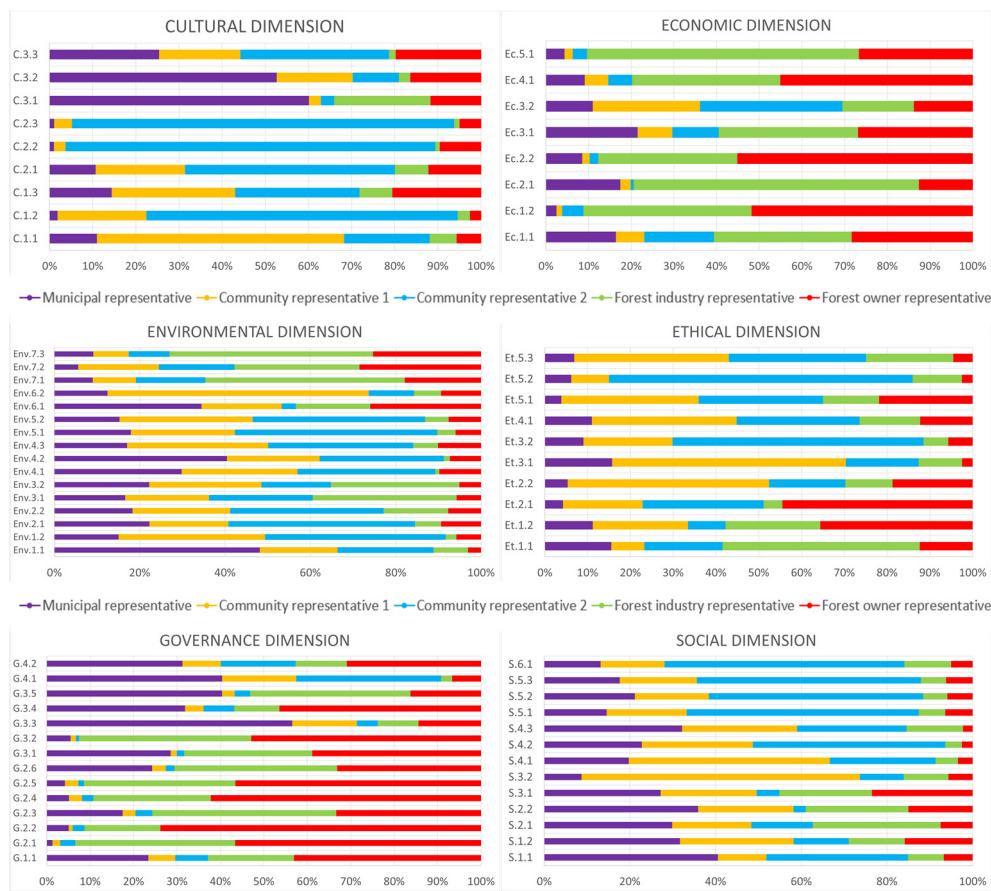


Figure 5 Relative importance of stakeholder prioritization by indicator.

The weights assigned to the indicators vary greatly depending on the stakeholder who provides the information. It can be noticed that the economic and governance dimensions are largely overweighted by the industrial and forest owner representatives. Conversely, the cultural

dimension is left aside by these representatives, notably to the benefit of community representatives. Furthermore, the municipal representative generally assigned intermediate weightings.

There are several explanations for these marked differences in evaluation between the stakeholders and indicators concerned. On the one hand, the level of understanding of the issues associated with each of the indicators can vary greatly depending on the stakeholder who provides the weightings. Thus, stakeholders will give more importance to the indicators to which they feel closest and for which they understand the sustainability issues best.

Moreover, these strong divergences are also accentuated by the choice of the AHP method, which tends to strongly differentiate the indicators according to the pairwise comparisons made and thus to bring out marked divergences between stakeholders.

These results should guide policymakers in organizing working sessions with project stakeholders involved in the assessment process, but also more broadly with all relevant stakeholders. These sessions would have a dual purpose: on the one hand, to provide reliable information on the issues associated with the various indicators. On the other hand, to open the debate around the main points of divergence between the stakeholders, to identify the causes, and to try to find compromises.

To help the decision-maker in finding the main differences between stakeholders, the tool developed allows highlighting the main points of divergence in the "Analysis" tab. The method is based on the calculation of the relative difference between a stakeholder's prioritization and a chosen reference. The reference prioritization can be chosen from the stakeholder prioritizations, or it can be the average of the participating stakeholder weightings.

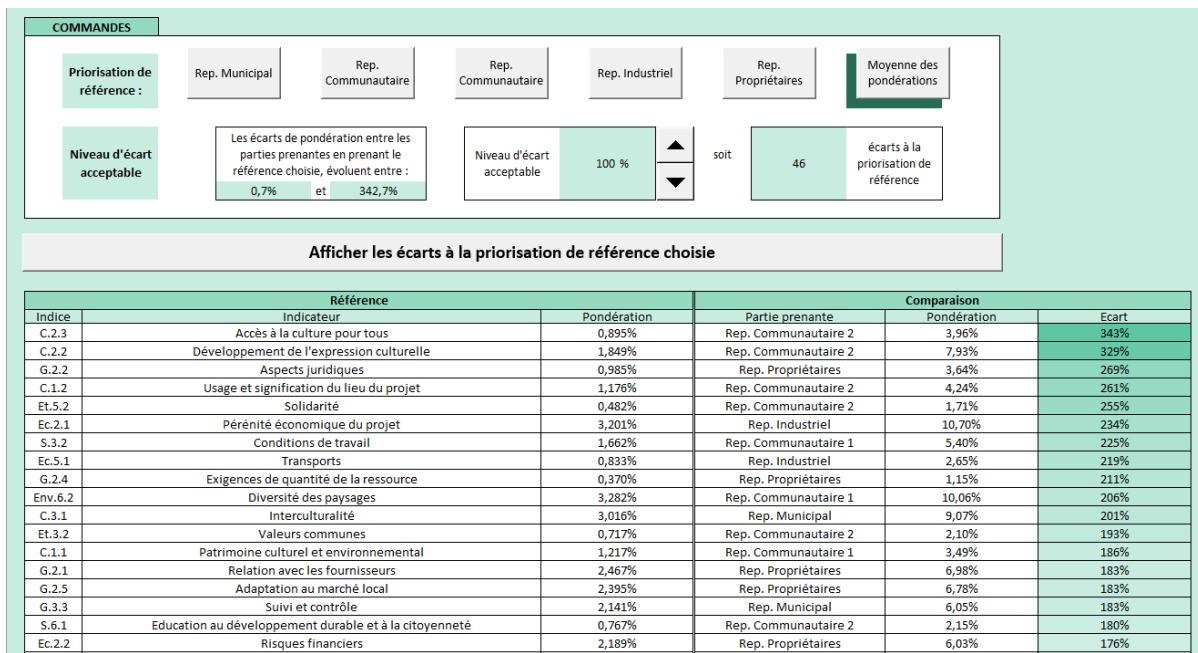


Figure 6 Screenshot of the tab of the tool that displays the main points of divergence between the weightings given by the stakeholders.

For the case study and choosing the average weighting as the reference, the differences range from 0,7% to 343%. It is possible to display all relative differences above a maximum value allowable relative difference in order to identify the main points of divergence between stakeholders regarding the weightings and prioritization of the indicators, and therefore regarding the desired lines of work and orientations for the project.

For the case study, 46 indicators had a relative difference greater than 100% (Figure 6 and Supplementary online material B). Table 4 summarizes them according to the stakeholder responsible for the difference and the dimension of the indicator concerned.

Table 4 Number of relative differences above 100% by dimension and stakeholder.

Dimension	Cultural	Economic	Environmental	Ethics	Governance	Social	
	7	5	9	6	11	8	<b>46</b>

Stakeholders	Community Rep. 1	Community Rep. 2	Industry Rep.	Municipal Rep.	Forest owners Rep.	
	6	15	6	8	11	<b>46</b>

First, all dimensions and all stakeholders are affected by the divergence of views. Moreover, there is generally only one stakeholder per indicator that is far from the average weighting.

These results justify the choice of the AHP method for calculating stakeholder weights. Indeed, a strong differentiation between stakeholders can be observed as well as a characteristic weighting profile for each stakeholder. The method thus makes it possible to actively involve the project's stakeholders in the decision-making process, then to identify the sensitive indicators and to open the discussion around these particular points to allow a continuous improvement of the projects and to guarantee a better global acceptability.

### 2.3.2 Displaying the performance of themes and dimensions

The second part of the "Results" tab focuses on displaying the results and performances of themes and dimensions. The tool uses radar charts for this purpose, which allows an easy and quick comparison of the three scenarios. The user can choose to display a particular dimension and thus compare the performance of the three potential scenarios for the different themes of this dimension, or to display the overall performance and thus compare the performance of the different dimensions for the three potential scenarios. The user can also choose the weighting used for the performance assessment. Thus, it is possible to compare the performance of the scenarios according to the prioritization made by each of the stakeholders.

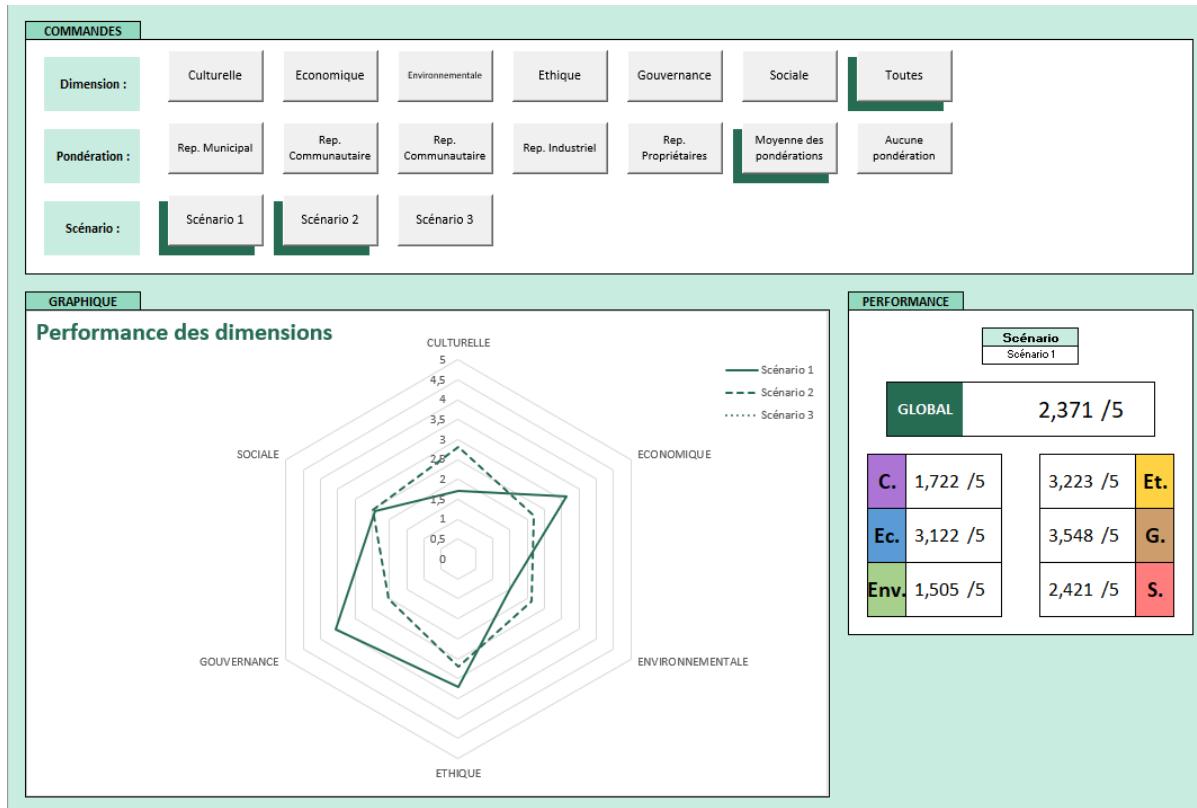


Figure 7 Screenshot of the tab of the tool that displays the performances of the dimensions for each scenario according to the prioritization chosen.

Figure 8 shows that, regardless of the weighting chosen, the scenarios are highly differentiated. Scenario 1, which consists in the implementation of a heating plant for several municipal institutional buildings, is evaluated more favourably on economic, governance and ethical aspects. On the other hand, scenario 2 for the implementation of a bioenergy boiler in a church better satisfies the cultural and environmental dimensions. The social dimension can, depending on the weighting chosen, be evaluated more favorably in one or the other scenario.

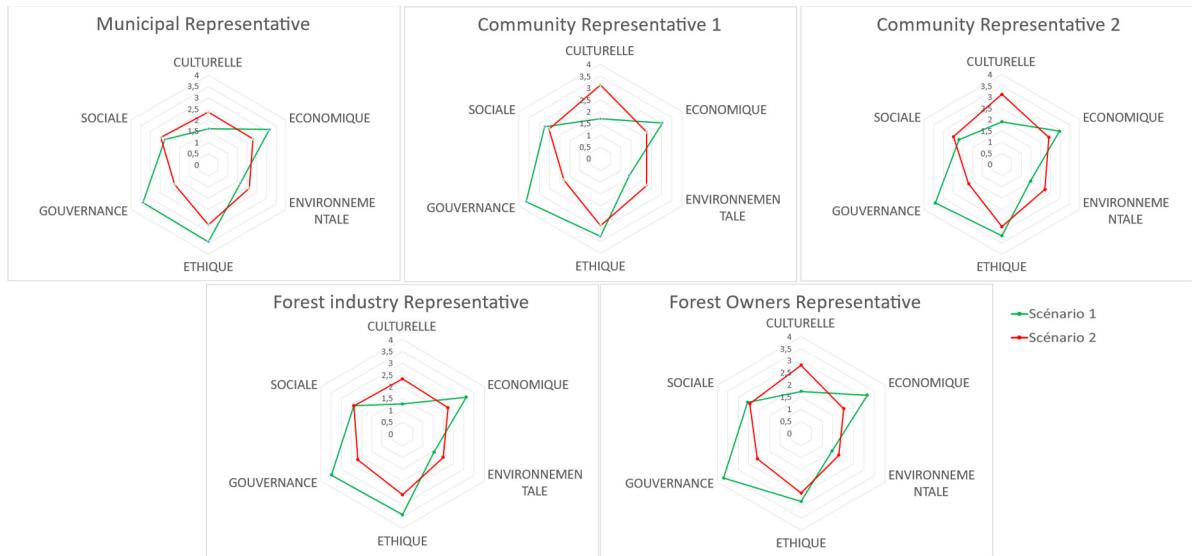


Figure 8 Comparison of the performance of scenarios 1 and 2 for the different dimensions according to the chosen weighting.

The method of evaluation of the indicators as well as the method of calculation of the performances, make it possible to ensure the differentiation of the scenarios and thus to accompany the decision makers in the decision-making.

Into the details of each dimension (Supplementary online material A), the performance of the themes for scenarios 1 and 2 are compared. The differentiation is clear for the cultural, economic, ethical and governance dimensions, with scenario 1 performing better on the last three, and scenario 2 performing better on the cultural dimension only. On the other hand, for the social dimension, the two scenarios are very close, and the best performing scenario depends on the theme considered. Similarly, for the environmental dimension, the performances of the two scenarios are intertwined and depend on the themes considered; nevertheless, it can be considered that scenario 2 performs better overall (as shown by the performance of the global dimension presented earlier in Figure 8).

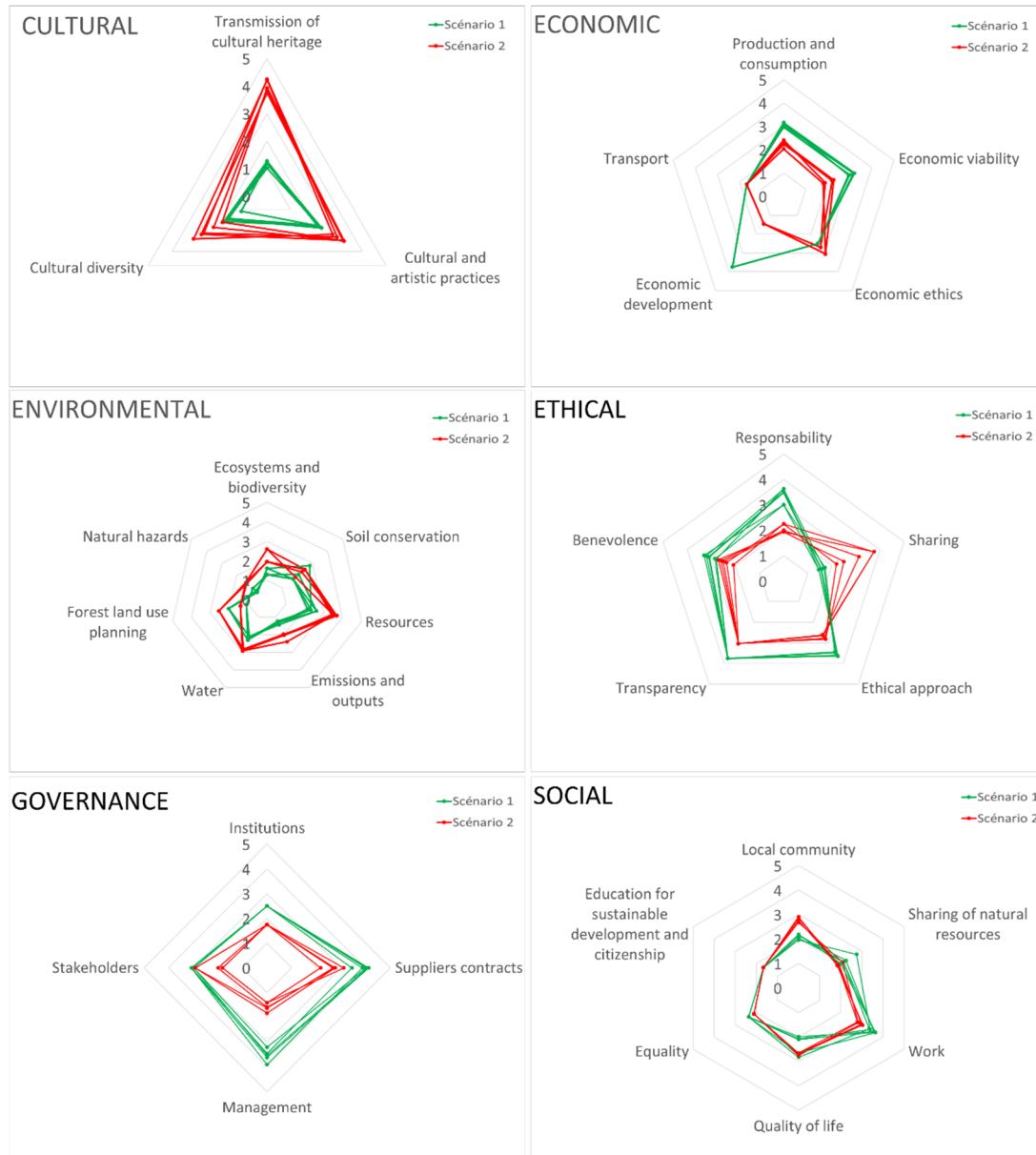


Figure 9 Comparison of the performance of scenarios 1 and 2 for the different themes according to the dimension considered. These results show that the tool allows a global, quick and efficient evaluation of the scenarios.

These results show that the choice of weighting has very little influence on the choice of the most suitable scenario. This aspect makes it easier for the decision maker to choose one

scenario over another. However, the stakeholders are listened to in the decision-making process and it is up to the decision-maker to take into account the fears and ambitions that will have resulted from the information provided by the stakeholders.

The tool therefore makes it possible to assess the performance of the scenarios by considering the six dimensions and the five stakeholders. This report can help stakeholders in their decision-making process, since it allows them to evaluate a given scenario from the angle they wish, but it cannot justify the choice of one scenario over another, since each scenario has its advantages and disadvantages.

### **2.3.3 Strengths, weaknesses and mitigation measures**

The tool proposes to list the strengths and weaknesses of each scenario. To this end, the user will have to define a minimum performance from which the indicators can be considered as strong points, as well as a maximum performance below which the indicators will be considered as weak points.

In this way, the number of strengths and weaknesses in each of the three scenarios can be displayed. In addition, the tool proposes to display these strengths and weaknesses for each of the scenarios so that the decision-maker can take note of them and use these indicators to improve the performance of the project scenarios. This analysis is independent of the choice of a weighting since the average of the scores given by the stakeholders is considered to determine whether an indicator is a strong or weak point.

The choice of thresholds is arbitrary and left to the discretion of the user. Nevertheless, a display of the number of weak and strong points associated with the choice of thresholds is given in order to guide the decision maker to avoid considering too many indicators (Supplementary online material B).

The display of weaknesses is accompanied by the proposal of some mitigation measures to improve the performance of these indicators as part of a continuous improvement process for the project and its scenarios. Thus, the tool accompanies decision-makers beyond the assessment stage by helping them improving the projects to best meet the objectives and to increase social acceptability.

Moreover, this database of mitigation measures is an important source of additional knowledge. Indeed, it is possible for the user to add new mitigation measures to the tool as part of a participatory approach to improve forest bioenergy heating projects. Some mitigation measures from the literature are initially included in the tool, but the database is being developed and enriched with proposals from successive users.

The tool also proposes the creation of an automatic report that can be loaded on a platform to offer a database that can be used for research projects interested in residual forest biomass heating projects in Quebec. This report contains all the data entered into the tool, including the technical characteristics of the projects, pairwise comparisons of the indicators by all stakeholders and the resulting weightings, the evaluation of the indicators as well as the display of the performance, strengths and weaknesses of the scenarios considered. This report can also be used by the user to present the results of the analysis.

## **2.4 Framework for the use of the tool and method**

The tool developed focuses specifically on the context of heating institutional and commercial buildings in the Canadian province of Quebec. The indicators that are analyzed are therefore adapted to this context. Nevertheless, although specific, this context is not unique in all its aspects, and it is possible to envision a wider use of the tool and the method used.

First, this tool can be used in all regions of the world where the boreal forest dominates, including, but not limited to, northern Europe and North America. This extension is possible with the adaptation of some specific indicators. However, the limited number of quantitative data required to complete the tool limits the number of modifications and adaptations to the local context. Moreover, it is possible to omit the evaluation of some irrelevant data without distorting the result of the analysis.

The tool is primarily intended for municipalities, regardless of their geographic locations, since the indicators used consider the municipalities' fields of action and levers. Although not all municipalities have the same competencies, the possible adaptations of the tool allow for widespread municipal use.

Furthermore, the method used in this tool is adaptable to many other contexts. It is characterized by the participation of stakeholders in the weighting and classification of indicators via the AHP, but also by the ability to propose a comparative analysis of forest biomass heating scenarios in the early planning stages of the project.

Further research should also explore the importance of taking into consideration other biomass sources such as tertiary residues from construction, renovation and demolition activities. The potential of these residues is largely under-exploited and could become an opportunity in the bioenergy supply chain.

## **2.5 Conclusion**

The decision support tool for the sustainability of forest bioenergy projects in Quebec proposes a method of evaluation and comparison of scenarios based on differentiated weighting and evaluation methods that allow stakeholders to be involved in the decision-making process. The tool also provides details on the scenarios and in particular, on the most effective and most

critical aspects of the scenarios in order to open up discussion between stakeholders on these more sensitive subjects and guarantee better social acceptability. Finally, the tool supports decision-makers in the project improvement process that follows, by proposing mitigation measures to increase the performance of the chosen project.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### Réponse aux objectifs

L'objectif de ce projet de recherche consistait à créer un outil de soutien à la décision permettant d'évaluer les retombées économiques, sociales et environnementales du chauffage de bâtiments institutionnels et commerciaux à la bioénergie forestière. L'outil réalisé permet, outre une analyse de ces trois dimensions primordiales et interreliées, l'analyse des retombées de trois autres dimensions : culturelle, éthique et gouvernance, pour mieux satisfaire la définition de durabilité qui est en constante évolution.

C'est d'ailleurs pour mieux répondre aux problématiques de gouvernance que l'outil inclut une méthode de pondération nécessitant la participation de plusieurs parties prenantes afin de les faire participer à l'élaboration et à l'amélioration des projets de chauffage à la bioénergie forestière. L'intégration des parties prenantes au processus de prise de décision est d'ailleurs un des critères de réussite des outils de soutien à la décision. Ces critères de réussite se décomposent en trois axes évaluant l'accessibilité de l'outil, son contenu et sa capacité à aider la prise de décision éclairée.

Le critère d'accessibilité est bien vérifié par l'outil développé puisque ce dernier s'appuie sur un logiciel dont l'accès est généralisé (Excel©), ne nécessite pas de compétences particulières pour son renseignement notamment grâce au guide d'utilisation qui l'accompagne, et permet l'obtention de résultats rapidement grâce à un temps d'exécution court. Le critère de pertinence du contenu est soutenu par la présence des dimensions du développement durable, de l'adaptation des indicateurs au contexte à la fois québécois et de la bioénergie forestière, et de la précision de l'outil. Enfin, le critère de soutien à la prise de décision est validé grâce à la comparaison des scénarios, l'intégration des parties prenantes et l'accompagnement dans l'amélioration des projets.

La participation des partenaires du projet à l'évaluation de l'outil a été un point essentiel de la réussite de l'outil. Les retours formulés lors des rencontres ont garanti l'adéquation de l'outil avec les attentes et les besoins des futurs utilisateurs de l'outil. La présentation finale de l'outil a conclu que l'outil sera utilisé dans les phases amont des projets de conversion des bâtiments institutionnels et commerciaux vers le chauffage à la biomasse forestière et permettra d'évaluer les impacts et bénéfices potentiels de cette transition dans le contexte municipal, tout en proposant un accompagnement des décideurs pour améliorer le projet.

L'outil développé bien qu'encore perfectible, répond cependant aux objectifs fixés. Il permettra le développement de la filière bioénergétique au Québec et accompagnera les municipalités québécoises dans l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de GES fixés par les gouvernements provinciaux et fédéraux.

### **Limites de l'outil**

Comme évoqué plus haut, l'outil reste perfectible et présente quelques limites. D'abord, il est peu flexible et il est difficile de modifier le nombre d'indicateurs dans chacun des thèmes et des dimensions. Cela est dû à la méthode de détermination des pondérations qui s'appuie sur des comparaisons par paires. Ainsi, l'ajout d'un indicateur dans un thème comportant déjà quatre indicateurs entraînera un besoin de quatre comparaisons supplémentaires. La structure donnée à l'onglet d'évaluation des pondérations vise à faciliter les comparaisons et la compréhension du fonctionnement pour les parties prenantes, et ne permet donc pas d'ajouter des comparaisons aisément.

De plus, les performances des scénarios qui sont obtenues lors d'une analyse sont des performances relatives et dépendent des autres scénarios étudiés. Ainsi, un scénario qui serait peu performant dans une analyse pourrait être davantage performant lors de la comparaison avec d'autres scénarios.

Enfin, l'outil s'applique à une analyse très en amont du projet afin d'en évaluer l'acceptabilité sociale et ne s'intéresse donc que de façon superficielle aux effets économiques, sociaux ou environnementaux quantifiables.

### **Adaptabilité de l'outil à d'autres contextes**

L'outil a été réalisé pour répondre à un besoin spécifique pour les municipalités québécoises. Les indicateurs considérés sont donc adaptés à ce contexte et peuvent s'avérer inadéquats dans un contexte différent. Néanmoins, une utilisation élargie de l'outil est envisageable en prenant quelques précautions.

D'abord, le contexte forestier québécois impose la considération d'une forêt boréale, ce qui permet l'utilisation de l'outil dans les autres provinces et territoires canadiens, mais également dans certains états américains, voire en Europe du Nord pour lesquels le potentiel de biomasse forestière résiduelle est suffisant pour envisager de nouvelles chaînes de valeur.

Des adaptations sont également envisageables pour intégrer d'autres sources de biomasse comme les résidus tertiaires issus des activités de construction, rénovation et démolition, ou pour permettre l'utilisation de l'outil par d'autres institutions gouvernementales voire des entreprises privées. Ces adaptations sont plus conséquentes et demandent un travail important de recherche pour s'assurer de la pertinence des résultats obtenus.

Ensuite, la méthode utilisée pour la conception de cet outil s'appuie, d'une part, sur la participation des parties prenantes pour la priorisation des indicateurs via la méthode AHP, et d'autre part, sur l'évaluation d'une multitude d'indicateurs perceptuels, permettant le renseignement de l'outil dans une phase préliminaire d'étude d'un projet de chauffage à la biomasse forestière. Cette méthode peut donc être réutilisée dans un contexte différent et permettre le développement d'une multitude d'outils parfaitement adaptés aux contextes géographiques, sociaux et culturels locaux.

## **Améliorations potentielles de l'outil**

Enfin des améliorations à long terme sont encore envisageables pour faire de l'outil développé un accessoire indispensable des décideurs publics pour les projets de chauffage à la bioénergie forestière.

D'abord, il serait pertinent de proposer une méthode pour intégrer les parties prenantes à l'évaluation des indicateurs du projet. En l'état actuel, seul le responsable désigné par le décideur évalue les scénarios car une évaluation complète des scénarios par les parties prenantes est un processus relativement long et non adapté. Néanmoins les évaluations peuvent être sujettes à des divergences importantes dont il peut être intéressant de tenir compte. L'utilisation de questionnaires pourrait être envisagée pour faciliter la participation des parties prenantes à cette étape du processus de renseignement de l'outil.

Ensuite, une analyse de l'effet des mesures de mitigation sur la performance des scénarios pourrait être envisagée afin de mieux guider et accompagner le décideur dans l'amélioration des scénarios. Cette analyse pourrait s'appuyer sur un pourcentage d'effet d'amélioration de la mesure de mitigation qui viendrait bonifier la note de l'indicateur concerné. Le décideur pourrait alors choisir les mesures de mitigation qui améliorent le plus sur la performance globale du scénario concerné.

Enfin, afin de poursuivre le développement et l'amélioration de l'outil, il peut être envisagé d'implémenter une analyse quantitative plus précise des effets sociaux, économiques et environnementaux. Une telle analyse devrait être réalisé lorsque les scénarios sont plus avancés et que l'on dispose de données suffisamment fiables pour les évaluer. Elle pourrait notamment s'appuyer sur une analyse du cycle de vie pour les impacts environnementaux et plus particulièrement la quantification réelle des émissions de GES.



## BIBLIOGRAPHIE

- Agostini, A., Giuntoli, J., & Boulamanti, A. (2014). *Carbon accounting of forest bioenergy - Conclusions and recommendations from a critical literature review*. Luxembourg: Joint Research Center of the European Commission. doi: 10.2788/29442
- Asikainen, A., Ikonen, T., & Routa, J. (2016). Challenges and opportunities of logistics and economics of forest biomass. Dans E. Thiffault, G. Berndes, M. Junginger, J. Saddler & T. Smith (Éds.), *Mobilisation of Forest Bioenergy in the Boreal and Temperate Biomes: Challenges, opportunities and case studies*. (pp. 68-83). Academic Press, Elsevier.
- Barrette, J., Thiffault, E., Saint-Pierre, F., Wetzel, S., Duchesne, I., & Krigsttin, S. (2015). Dynamics of dead tree degradation and shelf-life following natural disturbances: can salvaged trees from boreal forests 'fuel' the forestry and bioenergy sectors? *Forestry*, 88(3), 275-290.
- Bastien, I. (2012). *Outil de prise de décision en développement durable pour les municipalités du Québec* (Université de Sherbrooke, Montréal).
- Beauregard, R. (2015). *Le volet économique de la stratégie d'aménagement durable des forêts*. Québec.
- Bentsen, N. S. (2017). Carbon debt and payback time – Lost in the forest? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1211-1217. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.004
- Bergeron, K. M., Jébrak, M., Yates, S., Séguin, C., Lehmann, V., Le Meur, P.-Y., . . . Gendron, C. (2015). Mesurer l'acceptabilité sociale d'un projet minier : essai de modélisation du risque social en contexte québécois. *VertigO*, 15.
- Bernier, P., Paré, D., Thiffault, E., Beauregard, R., Bouthillier, L., Levasseur, A., & St-Laurent-Samuel, A. (2012). *Avis scientifique - L'utilisation de la biomasse forestière pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du Québec*. Québec: Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources Naturelles.
- Cambridge dictionnary. (2020). Weighting. Repéré à <https://dictionary.cambridge.org/>
- Chum, H., Faaij, A., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., . . . Pingoud, K. (2011). Bioenergy. Dans *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P.

*Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*

Commission mondiale sur l'environnement et le développement. (1987). *Notre Avenir à tous.*

Dale, V. H., Efroymson, R. A., Kline, K. L., & Davitt, M. S. (2015). A framework for selecting indicators of bienergy sustainability. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining.*

Desjardins, N. (2009). La biomasse forestière : pour des biocarburants liquides de deuxième génération.

Durocher, C., Thiffault, E., Achim, A., Auty, D., & Barrette, J. (2019). Untapped volume of surplus forest growth as feedstock for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 120, 376-386. doi: 10.1016/j.biombioe.2018.11.024. Repéré à <https://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.024>

Ecostrat, & Natural Resources Canada. (2019). *Canadian standards for biomass supply chain risk.*

European Forest Institute. (2013). ToSIA - leading the way to sustainability. Repéré à <http://tosia.efi.int/>

GIEC. (2013). *Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du groupe de travail I au rapport d'évaluation du GIEC.*

GIEC. (2018). *Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5°C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield].* Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse.

Gouvernement du Canada. (2012). Huiles pyrolytiques. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/energies-renouvelables/systemes-de-bioenergie/biocombustibles/huiles-pyrolytiques/7398>

Gouvernement du Canada. (2016). Biogaz. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/energies-renouvelables/systemes-de-bioenergie/biogaz/7402>

Gouvernement du Canada. (2017). *Première contribution déterminée au niveau national du Canada pour 2017 à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.*

Gouvernement du Canada, Guichet-Emplois. (2020). *Portrait sectoriel du Québec 2018-2020 : Fabrication du papier.* Repéré à [https://www.on.guichetemplois.gc.ca/content\\_pieces-eng.do?cid=11268](https://www.on.guichetemplois.gc.ca/content_pieces-eng.do?cid=11268).

Gouvernement du Québec. (2012). *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques.*

Gouvernement du Québec. (2020). *Plan pour une économie verte 2030.* Québec.

Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources naturelles. (2015). *Politique énergétique 2016-2025.*

Gouvernement du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources naturelles. (2017). *Plan action de la politique énergétique 2030.*

Heck, V., Gerten, D., Lucht, W., & Popp, A. (2018). Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature Climate Change*, 8(2), 151-155. doi: 10.1038/s41558-017-0064-y

International Energy Agency. (2019). *Renewables 2019 – Analysis and forecast to 2024.*

Lamers, P., & Junginger, M. (2013). The ‘debt’ is in the detail: A synthesis of recent temporal forest carbon analyses on woody biomass for energy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(4), 373-385. doi: 10.1002/bbb.1407

Lindner, M., Suominen, T., Palosuo, T., Garcia-Gonzalo, J., Verweij, P., Zudin, S., & Päivinen, R. (2010). ToSIA—A tool for sustainability impact assessment of forest-wood-chains. *Ecological Modelling*, 221(18), 2197-2205. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2009.08.006

Locoh, A., & al. (2021). *Unpublished data*

Mai-Moulin, T., Fritzsche, U. R., & Junginger, M. (2019). Charting global position and vision of stakeholders towards sustainable bioenergy. *Energy, Sustainability and Society*, 9(1). doi: 10.1186/s13705-019-0225-0. Repéré à <https://dx.doi.org/10.1186/s13705-019-0225-0>

- Meyer, M. A., & Priess, J. A. (2014). Indicators of bioenergy-related certification schemes – An analysis of the quality and comprehensiveness for assessing local/regional environmental impacts. *Biomass and Bioenergy*, 65, 151-169. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.03.041
- Michel, J., Kristina Maud, B., Stéphanie, Y., Charles, S., Valérie, L., Corinne, G., . . . Philippe, A. (2016). Indice du risque social. Consultée le 26/03/2020
- Németh, B., Molnar, A., Bozoki, S., Wijaya, K., Inotai, A., Jonathan, C., & Kalo, Z. (2018). Comparison of weighting methods used in multicriteria decision analysis frameworks in healthcare with focus on low- and middle-income countries. *Journal of comparative effectiveness research*.
- Niemeijer, D., & de Groot, R. S. (2008). A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators*, 8(1), 14-25. doi: 10.1016/j.ecolind.2006.11.012
- Odu, G. O. (2019). Weighting methods for multi-criteria decision making technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(8), 1449. doi: 10.4314/jasem.v23i8.7. Repéré à <https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v23i8.7>
- Organisation des Nations Unies. (2015a). *Accord de Paris*.
- Organisation des Nations Unies. (2015b). *Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030*.
- Röser, D., Asikainen, A., Stupak, I., & Pasanen, K. (2008). Forest energy resources and potentials. Dans D. Röser, A. Asikainen, K. Raulund-Rasmussen & I. Stupak (Éds.), *Sustainable Use of Forest Biomass for Energy* (pp. 9-28). Dordrecht, the Netherlands.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. (1990). How to make a decision : The Analytic Hierarchical Process (AHP). *European Journal of Operational Research*, 48.
- Scott, J. A., Ho, W., & Dey, P. K. (2012). A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems. *Energy*, 42(1), 146-156. doi: 10.1016/j.energy.2012.03.074. Repéré à <https://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.074>

- Smeets, E. M. W., & Faaij, A. P. C. (2007). Bioenergy potentials from forestry in 2050. *Climatic Change*, 81(3-4), 353-390. doi: 10.1007/s10584-006-9163-x. Repéré à <https://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9163-x>
- Smith, L. J., & Torn, M. S. (2013). Ecological limits to terrestrial biological carbon dioxide removal. *Climatic Change*, 118(1), 89-103. doi: 10.1007/s10584-012-0682-3
- Thiffault, E., Hannam, K. D., Paré, D., Titus, B. D., Hazlett, P. W., Maynard, D. G., & Brais, S. (2011). Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests — A review. *Environmental Reviews*, 19(NA), 278-309. doi: 10.1139/a11-009
- Thiffault, E., St-Laurent Samuel, A., & Serra, R. (2015). *La récolte de biomasse forestière saines pratiques et enjeux écologiques dans la forêt boréale canadienne*. Ressources naturelles Canada, Nature Québec, Fédération québécoise des coopératives forestières.
- Thivierge, M.-N. (2011). *Développement d'un ensemble d'indicateurs pour l'évaluation de la durabilité environnementale des fermes québécoises en grandes cultures* (Université Laval, Québec).
- Timonen, K., Reinikainen, A., Kurppa, S., & Riipi, I. (2021). Key Indicators and Social Acceptance for Bioenergy Production Potential as Part of the Green Economy Transition Process in Local Areas of Lapland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 527. doi: 10.3390/ijerph18020527. Repéré à <https://dx.doi.org/10.3390/ijerph18020527>
- Transition énergétique Québec. (2021). Outil de suivi des projets financés dans le cadre du Programme biomasse forestière résiduelle (volet TEQ).
- Villeneuve, C., Riffon, O., & Tremblay, D. (2016). *Comment réaliser une analyse de développement durable? Guide d'utilisation de la Grille d'analyse de développement durable*. Université du Québec à Chicoutimi: Département des sciences fondamentales.
- Werhahn-Mees, W., Palosuo, T., Garcia-Gonzalo, J., Röser, D., & Lindner, M. (2011). Sustainability impact assessment of increasing resource use intensity in forest bioenergy production chains. *GCB Bioenergy*, 3(2), 91-106. doi: 10.1111/j.1757-1707.2010.01068.x
- Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2020). *Etat de l'énergie au Québec*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal.

Zahraee, S. M., Shiwakoti, N., & Stasinopoulos, P. (2020). Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis: 40-Years comprehensive review of methods, decision issues, sustainability challenges, and the way forward. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105777. doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105777. Repéré à <https://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105777>