



# CIRAIG<sup>MC</sup>

Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services



## RAPPORT TECHNIQUE – ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DE DIFFÉRENTS SCÉNARIOS D'APPROVISIONNEMENT DE CENTRALES THERMIQUES EN GRANULES DE BOIS

AVRIL 2014

*Préparé pour*

**Bureau de promotion des produits du bois du Québec (QWEB)**

À l'attention de  
**M. Sylvain Labbé**

Président-Directeur Général

Tél.: 418-650-6385

[slabbe@quebecwoodexport.com](mailto:slabbe@quebecwoodexport.com)

Ce rapport a été préparé par le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG).

Fondé en 2001, le CIRAIG a été mis sur pied afin d'offrir aux entreprises et aux gouvernements une expertise universitaire de pointe sur les outils du développement durable. Le CIRAIG est un des plus importants centres d'expertise en cycle de vie sur le plan international. Il collabore avec de nombreux centres de recherche à travers le monde et participe activement à l'Initiative sur le cycle de vie du Programme des Nations Unies sur l'Environnement (PNUE) et de la Société de Toxicologie et de Chimie de l'Environnement (SETAC).

Le CIRAIG a développé une expertise reconnue en matière d'outils du cycle de vie incluant l'analyse environnementale du cycle de vie (ACV) et l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV). Complétant cette expertise, ses travaux de recherche portent également sur l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) et d'autres outils incluant les empreintes carbone et eau. Ses activités comprennent des projets de recherche appliquée touchant plusieurs secteurs d'activités clés dont l'énergie, l'aéronautique, l'agroalimentaire, la gestion des matières résiduelles, les pâtes et papiers, les mines et métaux, les produits chimiques, les télécommunications, le secteur financier, la gestion des infrastructures urbaines, le transport ainsi que de la conception de produits « verts ».

## **AVERTISSEMENT**

À l'exception des documents entièrement réalisés par le CIRAIG, comme le présent rapport, toute utilisation du nom du CIRAIG ou de Polytechnique Montréal lors de communication destinée à une divulgation publique associée à ce projet et à ses résultats doit faire l'objet d'un consentement préalable écrit d'un représentant dûment mandaté du CIRAIG ou de Polytechnique Montréal.

## **CIRAIG**

Centre interuniversitaire de recherche  
sur le cycle de vie des produits, procédés et services  
École Polytechnique de Montréal  
Département de génie chimique  
2900, Édouard-Montpetit  
Montréal (Québec) Canada  
C.P. 6079, Succ. Centre-ville  
H3C 3A7

[www.ciraig.org](http://www.ciraig.org)

Rapport soumis par :  
BUREAU DE LA RECHERCHE ET CENTRE DE  
DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE (B.R.C.D.T.)  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Université de Montréal Campus  
C.P. 6079, Succ. Centre-ville  
Montréal (Québec) H3C 3A7

## Remerciements

---

Le CIRAIG tient à souligner le soutien de David Paré et Jérôme Laganière, tous deux de Ressources naturelles Canada, lors de la réalisation de cette étude.

## Équipe de travail

---

### Réalisation

Hugues Imbeault-Tétreault, ing. jr., M.Sc.A.



Réalisation de l'ACV

Pablo Tirado Seco, M.Sc.A.



Réalisation de l'ACV (support)

Annie Levasseur, Ph.D.



Support technique et révision

### Collaboration

Catherine Reid, ing. jr., M.Sc.A.

Coordination du projet

### Direction de projet

Pr Réjean Samson, ing., Ph.D.



Directeur général, CIRAIG

## Sommaire

---

Le but de cette étude réalisée par le CIRAIG pour le compte du Bureau de promotion des produits du bois du Québec (QWEB) était de réaliser une analyse simplifiée de l’empreinte carbone de deux filières de granules de bois différentes : 1) l’utilisation de granules produits en Ontario comme substitution au charbon dans une centrale thermique de Grande-Bretagne et 2) l’utilisation de granules fabriqués au Québec comme substitution à une chaudière au mazout dans un édifice local.

L’**unité fonctionnelle** de l’étude, c’est-à-dire la référence à laquelle se rapporte l’évaluation de l’empreinte carbone se définit comme suit : « Produire 1 kWh d’électricité en Grande-Bretagne en 2014 » pour la première filière, et « Produire 1 MJ de chaleur au Québec en 2014 » pour la seconde.

Ainsi, les systèmes permettant de répondre à ces fonctions sont :

- Système A.1 : Les granules produits en Ontario à partir de billes de bois et de résidus forestiers sont utilisés comme substitut au charbon dans la centrale thermique de Drax en Grande-Bretagne.
- Système A.2 : Le charbon est utilisé afin de produire de l’électricité à la centrale thermique de Drax en Grande-Bretagne. Les résidus forestiers non utilisés pour fabriquer des granules se dégradent en forêt et la forêt mature qui aurait fourni des billes de bois pour la production de granules reste intacte.
- Système B.1 : Les granules fabriqués au Québec à partir de résidus de scierie et forestiers sont utilisés comme substitut à une chaudière au mazout dans un édifice local.
- Système B.2 : Le mazout est utilisé afin de produire de la chaleur dans un édifice local. Les résidus forestiers non utilisés pour fabriquer des granules se dégradent en forêt.

L’évaluation de l’empreinte carbone a été réalisée à partir des derniers potentiels de réchauffement climatique (PRC ou GWP en anglais) du GIEC (Myrhe *et al.*, 2013) sur un horizon de 100 ans avec rétroaction du climat (*climate feedback*).

Les résultats des scénarios A.1 et B.1 sont, respectivement, 201 g CO<sub>2</sub> éq./kWh et 18 g CO<sub>2</sub> éq./MJ. Pour le scénario A.1, les phases les plus importantes sont le transport des granules (42 %), l’extraction du bois et les résidus de bois (36 %) et la production des granules (18 %). Pour ce qui est du scénario B.1, c’est l’extraction du bois et les résidus de bois qui dominant (57 %), suivis de la production de chaleur (14 %), le transport des granules (12 %) et la production des granules (10 %). En comparaison avec les scénarios fossiles respectifs (A.2 et B.2), l’utilisation de granules pour produire de l’électricité en Grande-Bretagne émet quatre fois moins de GES fossiles, et plus de cinq fois moins pour produire de la chaleur au Québec.

Le temps de recouvrement de la dette carbone, due aux émissions supplémentaires de GES fossiles et biogéniques de l’utilisation de granules en remplacement aux combustibles fossiles, a été estimé à 27 ans pour le scénario ontarien (A.1) et à moins d’un an pour le scénario québécois (B.1).

Les analyses de sensibilité sur la source de bois, les émissions de CH<sub>4</sub> pendant le séchage, le *grid mix* de l’Ontario, le transport des granules et la production de chaleur à partir de gaz naturel n’ont pas remis en question les résultats d’empreinte carbone.

## Table des matières

---

Remerciements.....	iii
Équipe de travail.....	iv
Sommaire .....	v
Liste des tableaux .....	vii
Liste des figures .....	vii
Liste des abréviations et sigles .....	viii
<b>1 Mise en contexte .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Modèle d'étude .....</b>	<b>3</b>
2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée .....	3
2.2 Description générale du produit à l'étude .....	3
2.3 Fonctions et unité fonctionnelle .....	4
2.4 Frontières des systèmes .....	5
2.4.1 Processus inclus dans les systèmes A.1 et A.2 .....	5
2.4.2 Processus inclus dans les systèmes B.1 et B.2.....	8
2.4.3 Frontières géographiques et temporelles.....	11
2.5 Sources, hypothèses et données d'inventaire du cycle de vie (ICV) .....	11
2.6 Évaluation de l'empreinte et de la dette carbone .....	13
2.7 Interprétation .....	14
2.7.1 Évaluation de la qualité des données d'inventaire .....	14
2.7.2 Analyses de sensibilité.....	15
<b>3 Résultats et interprétation .....</b>	<b>17</b>
3.1 Empreinte carbone des systèmes de granules .....	17
3.2 Comparaison des systèmes.....	19
3.3 Dette carbone .....	20
3.4 Qualité des données d'inventaire .....	20
3.5 Analyses de sensibilité.....	21
3.6 Applications et limites de l'empreinte carbone .....	22
3.7 Recommandations et perspectives .....	23
3.7.1 Recommandations pour améliorer la filière de granules ontariens (A.1).....	23
3.7.2 Recommandations pour améliorer la filière de granules québécois (B.1).....	23
3.7.3 Perspectives.....	23
<b>4 Conclusions.....</b>	<b>25</b>
<b>5 Références .....</b>	<b>26</b>

## Liste des tableaux

---

Tableau 1-1 : Empreintes carbone sur la production d'énergie à partir de granules de bois.....	2
Tableau 2-1 : Caractéristiques de performance et flux de référence .....	5
Tableau 2-2 : Processus inclus et exclus des frontières de l'empreinte carbone (scénarios A.1 et A.2).....	7
Tableau 2-3 : Processus inclus et exclus des frontières de l'empreinte carbone (scénarios B.1 et B.2) .....	10
Tableau 2-4 : Mélanges d'approvisionnement électrique utilisés .....	12
Tableau 2-5 : Principales données, sources et hypothèses utilisées dans l'établissement de l'ICV d'avant-plan.....	13
Tableau 3-1 : Émissions en kg par scénario.....	17
Tableau 3-2 : Variation en pourcentage des émissions de GES fossiles par rapport au cas de base .....	22

## Liste des figures

---

Figure 2-1 : Granules de bois. Source : QWEB.....	4
Figure 2-2 : Frontières des systèmes A.1 et A.2 de production d'électricité. ....	6
Figure 2-3 : Frontières des systèmes B.1 et B.2 de production de chaleur.....	9
Figure 3-1 : Émissions de GES fossiles du scénario A.1. ....	18
Figure 3-2 : Émissions de GES fossiles du scénario B.1. ....	18
Figure 3-3 : Comparaison des émissions de GES fossiles de la production d'électricité à partir de granules et à partir de charbon (scénario de base).....	19
Figure 3-4 : Comparaison des émissions de GES fossiles de la production de chaleur à partir de granules et à partir de mazout (scénario de base). ....	20

## Liste des abréviations et sigles

---

ACV	Analyse du cycle de vie
CH <sub>4</sub>	Méthane
CIRAIG	Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services
COV	Composé organique volatil
CO <sub>2</sub> éq.	Dioxyde de carbone équivalent
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie (appelé ACVI par ISO)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
GES	Gaz à effet de serre
ICV	Inventaire du cycle de vie
ISO	Organisation internationale de normalisation
MJ	Mégajoules d'énergie
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PRG	Potentiel de réchauffement global (GWP en anglais)



## 1 Mise en contexte

---

Le Bureau de promotion des produits du bois du Québec (QWEB) a mandaté le CIRAIG pour qu'il réalise une évaluation du potentiel de réduction des émissions de GES de granules fabriqués à partir de bois. Ces granules seront produits en Ontario et envoyés par la suite en Grande-Bretagne afin d'y être utilisés en remplacement du charbon dans les centrales thermiques ou au Québec pour être utilisés dans de petites centrales thermiques pour le chauffage de bâtiments.

Ce rapport présente :

- Les objectifs et le champ de l'étude (**Chapitre 2**).
- Les résultats de l'empreinte et de la dette carbone, leur interprétation et les recommandations associées (**Chapitre 3**).
- Les conclusions résultantes (**Chapitre 4**).

Cette étude a été réalisée en accord avec les normes ISO 14 040 et 14 044 (ISO, 2006a, b) pour un rapport d'usage interne par QWEB.

Une revue sommaire des publications pertinentes portant sur l'empreinte carbone de l'utilisation de granules de bois pour la production d'électricité et de chaleur a été effectuée. Ceci a permis de dresser un portrait des travaux déjà réalisés, et ce, principalement dans un contexte canadien, afin de comparer divers choix méthodologiques et sources de données employées, ainsi que les principales conclusions auxquelles elles arrivent. Les documents consultés les plus pertinents sont répertoriés au Tableau 1-1.

**Tableau 1-1 : Empreintes carbone sur la production d'énergie à partir de granules de bois**

Auteurs (année)	Contexte géographique <sup>1</sup>	Titre	Notes
<i>Berceau à l'utilisateur (production de granules + exportation)</i>			
Magelli et al. (2009)	Colombie-Britannique / Suède	An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe	80 % des émissions dues au transport par bateau
Pa et al. (2012)	Colombie-Britannique / Pays-Bas	Environmental footprints of British Columbia wood pellets from a simplified life cycle analysis	Moitié des émissions dues au transport par bateau
<i>Production d'électricité</i>			
Burke (2006)	Colombie-Britannique	A life cycle carbon balance for electricity produced from forest residues: a British Columbian case study	164 g CO <sub>2</sub> éq. / kWh 3 à 6 fois moins que combustibles fossiles
Hilton & Murray (2013)	Colombie-Britannique / Royaume-Uni	British Columbia wood pellets – Sustainability fact sheet	55,5 g CO <sub>2</sub> éq. / kWh Résidus de scierie sans émissions allouées
Melbye (2012)	Norvège	Life cycle assessment of Norwegian bioenergy heat and power systems	110 à 450 g CO <sub>2</sub> éq. / kWh
Zhang (2010)	Ontario	Life Cycle Environmental and Cost Evaluation of Bioenergy Systems	16 g CO <sub>2</sub> éq. / kWh Réduction de 91 % des émissions de GES par rapport au charbon
<i>Production de chaleur</i>			
Mahalle (2013)	Nouveau-Brunswick / Europe	Comparative life cycle assessment of pellet, natural gas and heavy fuel oil as heat energy sources	32 g CO <sub>2</sub> éq. / MJ de chaleur 2 à 3 fois moins que combustibles fossiles
Melbye (2012)	Norvège	Life cycle assessment of Norwegian bioenergy heat and power systems	50 à 200 g CO <sub>2</sub> éq. / MJ de chaleur

<sup>1</sup> Lorsque deux régions sont précisées, la première indique le lieu de production des granules, tandis que la deuxième, leur lieu d'utilisation.

## 2 Modèle d'étude

---

Ce chapitre présente le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'évaluation de l'empreinte carbone.

### 2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée

Le **but de cette étude** était de réaliser une analyse simplifiée de l'empreinte carbone de deux filières de granules de bois différentes : 1) l'utilisation de granules produits en Ontario comme substitution au charbon dans une centrale thermique de Grande-Bretagne et 2) l'utilisation de granules fabriqués au Québec comme substitution à une chaudière au mazout dans un édifice local.

Plus spécifiquement, les **objectifs** de l'étude étaient de :

1. Calculer l'empreinte carbone des systèmes définis par le cycle de vie complet des deux filières de granules de bois;
2. Évaluer la dette carbone pour les différents scénarios.

La description des systèmes est présentée à la section suivante.

Les résultats de cette étude préliminaire sont voués à un usage interne par QWEB, afin d'améliorer la compréhension de l'utilisation de biomasse forestière à des fins énergétiques, d'identifier les points chauds et problèmes potentiels liés à leur cycle de vie et de déterminer les possibilités d'amélioration. Cette empreinte carbone n'a pas la qualité suffisante pour être employée à des fins de divulgation publique ou de marketing. Elle fournit cependant les bases à une étude plus détaillée qui pourrait servir ces objectifs.

Conformément aux normes ISO, les revues critiques d'ACV/empreinte carbone sont facultatives lorsque les résultats sont voués à un usage interne par le mandataire. Cependant, une telle revue est une étape importante et obligatoire pour assurer la validité complète des résultats avant certaines communications publiques, telles que les déclarations environnementales de produits, suivant les normes ISO 14 020, ou les affirmations comparatives rendues publiques, suivant les normes ISO 14 040.

En ce qui a trait à cette étude, une revue interne a été réalisée par le CIRAIQ. Dans le cas où QWEB désirerait rendre ses résultats publics, une revue critique devrait être effectuée par un expert ACV externe ou un comité de parties intéressées. Ce genre de revue facilite la communication des résultats et augmente la crédibilité de l'analyse, notamment parce qu'elle implique une tierce partie, indépendante de l'équipe de réalisation du projet.

### 2.2 Description générale du produit à l'étude

Les granules de bois sont composés de fines particules de bois compressées. Ils possèdent généralement 5 % d'eau (base humide) et un pouvoir calorifique supérieur d'environ 20 MJ/kg anhydre.



Figure 2-1 : Granules de bois. Source : QWEB.

### 2.3 Fonctions et unité fonctionnelle

Les systèmes étudiés sont évalués sur la base de leur **fonction** :

Filière ontarienne	Filière québécoise
Produire de l'électricité en Grande-Bretagne	Produire de la chaleur au Québec

L'**unité fonctionnelle**, c'est-à-dire la référence à laquelle se rapporte l'évaluation de l'empreinte carbone se définit comme suit :

Filière ontarienne	Filière québécoise
« Produire 1 kWh d'électricité en Grande-Bretagne en 2014 »	« Produire 1 MJ de chaleur au Québec en 2014 »

Ainsi, les systèmes à l'étude permettant de remplir ces fonctions sont :

- **Système A.1** (voir Figure 2-2) : Les granules produits en **Ontario** à partir de billes de bois et de résidus forestiers sont utilisés comme substitut au charbon dans la centrale thermique de Drax en Grande-Bretagne.
- **Système A.2** (voir Figure 2-2) : Le charbon est utilisé afin de produire de l'électricité à la centrale thermique de Drax en Grande-Bretagne. Les résidus forestiers non utilisés pour fabriquer des granules se dégradent en forêt et la forêt mature qui aurait fourni des billes de bois pour la production de granules reste intacte.
- **Système B.1** (voir Figure 2-3) : Les granules fabriqués au **Québec** à partir de résidus de scierie et forestiers sont utilisés comme substitut à une chaudière au mazout dans un édifice local.
- **Système B.2** (voir Figure 2-3) : Le mazout est utilisé afin de produire de la chaleur dans un édifice local. Les résidus forestiers non utilisés pour fabriquer des granules se dégradent en forêt. Pour ce qui est des résidus de scierie, il est considéré que leur utilisation pour fabriquer des granules est une forme de valorisation de déchets. Étant donné que les

résidus de scierie seraient brûlés pour produire de la chaleur s'ils n'étaient pas utilisés pour fabriquer des granules, aucun scénario alternatif n'a été considéré dans ce système afin de calculer la dette carbone puisque leur utilisation en granules n'accélère pas l'émission de leur contenu en carbone.

Les scénarios A.2 et B.2 ont servi de scénarios de base afin de calculer les bénéfices et la dette carbone des scénarios A.1 et B.1 respectivement.

Les **flux de référence** font appel à la quantité de produits nécessaires pour remplir la fonction étudiée. Considérant la performance de chaque système, il est posé que l'unité fonctionnelle ci-haut est remplie par les flux de référence du Tableau 2-1.

**Tableau 2-1 : Caractéristiques de performance et flux de référence**

Système	Performance	Flux de référence
Système A.1	Efficacité <sup>2</sup> de centrale thermique : 39,5 % (Voegele, 2014)	517 g/kWh de granules à 5 % d'humidité (base humide) avec PCI de 17,62 MJ/kg humide (Oberberger et Thek, 2012)
Système A.2	Efficacité de centrale thermique : 40 % (IEA, 2013)	311 g/kWh de charbon (houille) avec PCI de 28,9 MJ/kg (ecoinvent)
Système B.1	Efficacité de chaudière : 93 % (Séguin, 2014)	61 g/MJ de granules à 5 % d'humidité (base humide) avec PCI de 17,62 MJ/kg humide (Oberberger et Thek, 2012)
Système B.2	Efficacité de chaudière : 94 % (ecoinvent)	25 g/MJ ou 30 ml/MJ de mazout léger avec PCI de 42,6 MJ/kg (ecoinvent)

## 2.4 Frontières des systèmes

Les frontières des systèmes servent à identifier les étapes, processus et flux qui seront considérés dans l'empreinte carbone. Elles incluent toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et donc, nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée.

Les sous-sections qui suivent présentent une description générale des frontières des systèmes, ainsi que les considérations géographiques et temporelles associées.

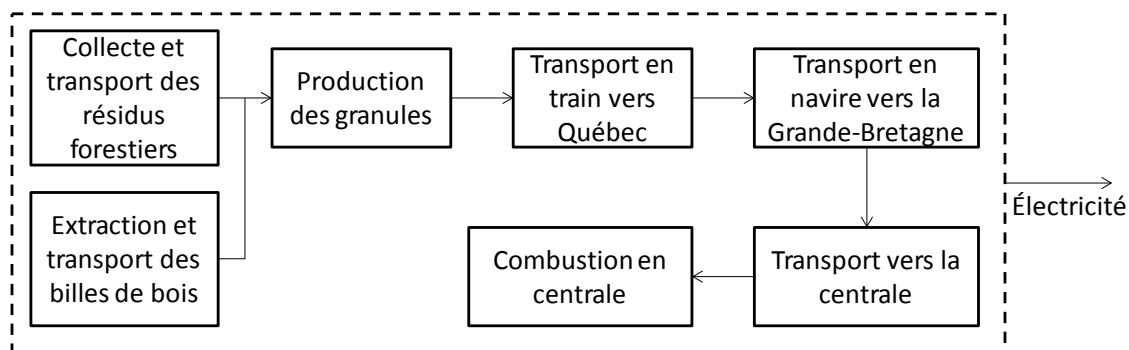
### 2.4.1 Processus inclus dans les systèmes A.1 et A.2

La Figure 2-2 schématise les frontières des systèmes de production d'électricité A.1 et A.2. Elles incluent les sous-systèmes (étapes du cycle de vie) suivants : la collecte et le transport des résidus forestiers, l'extraction et le transport des billes de bois, la production des granules, leur transport et leur combustion. Dans les études préliminaires telles que la présente, le détail des systèmes (quantification des flux et processus) n'est pas fourni.

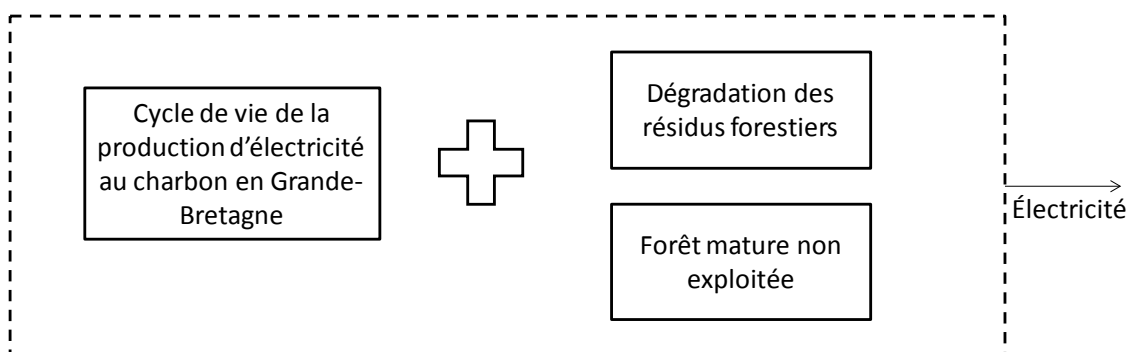
Ces diverses étapes du cycle de vie des produits à l'étude forment les **sous-systèmes d'avant-plan**, tandis que tous les processus d'approvisionnement et de gestion des rejets impliqués à chacune de ces étapes constituent les **sous-systèmes d'arrière-plan** (non affichés sur les figures).

<sup>2</sup> Sauf sur mention contraire, l'efficacité est calculée à l'aide du pouvoir calorifique inférieur (PCI).

## Granules de bois produits en Ontario (A.1)



## Scénario de base (A.2)



**Figure 2-2 : Frontières des systèmes A.1 et A.2 de production d'électricité.**

Le sous-système « **collecte et transport des résidus forestiers** » inclut le broyage des résidus forestiers au lieu de coupe, de même que leur livraison au site de production. Aucune émission reliée aux activités forestières ayant généré les résidus forestiers n'a été incluse.

Le sous-système « **extraction et transport des billes de bois** » inclut la récolte des arbres, la construction de chemins forestiers, de même que la livraison des billes de bois au site de production.

Le sous-système « **production des granules** » touche à la fabrication du produit en tant que tel. Il inclut le séchage de la biomasse et sa transformation en granules. Il inclut également certains consommables et l'opération des équipements (consommation d'électricité et de combustibles fossiles).

Les sous-systèmes « **transport en train vers Québec** », « **transport en navire vers la Grande-Bretagne** » et « **transport vers la centrale** » visent le transport des granules de leur lieu de production jusqu'à l'utilisateur, c'est-à-dire la centrale thermique de Drax dans le Yorkshire du Nord, Grande-Bretagne. La dernière étape de transport est assurée également par train.

Quant à lui, le sous-système « **combustion en centrale** » concerne l'utilisation des granules par la centrale thermique afin de produire de l'électricité.

Enfin, les sous-systèmes d'arrière-plan « **approvisionnement** » et « **gestion des rejets** » (non présents sur les figures) concernent respectivement, pour chacun des sous-systèmes d'avant-plan précédents, toutes les activités reliées à :

- L'approvisionnement en ressources (eau, énergie, produits chimiques, matériaux), comprenant l'extraction, le traitement et la transformation des ressources naturelles, de même que les différents transports requis jusqu'à l'arrivée aux sites d'utilisation des ressources (c.-à-d. les sous-systèmes d'avant-plan).
- Le transport et au traitement des déchets générés à l'une ou l'autre de ces étapes du cycle de vie, en tenant compte des mises en valeur possibles (réutilisation, recyclage, valorisation énergétique ou autres).

Pour ce qui est du scénario de base (A.2), celui-ci inclut le cycle de vie de la production d'électricité au charbon à la centrale thermique de Drax en Grande-Bretagne, ainsi que les émissions directes de la dégradation des résidus forestiers non utilisés et celles de la forêt mature non exploitée. Ces émissions ont servi à calculer la dette carbone du scénario A.1.

Dans tous les sous-systèmes, les processus d'arrière-plan identifiables sont inclus de manière à fournir la vue la plus complète possible du système. Par exemple, dans le cas de l'énergie utilisée pour un transport, non seulement les émissions liées à la combustion de carburant sont considérées, mais aussi les processus et matières nécessaires à la production de ce carburant (émissions indirectes). De cette manière, les chaînes de production de tous les entrants sont remontées jusqu'à l'extraction des matières premières. Ce niveau de complétude correspond au scope 3 de comptabilisation des GES, tel que défini par le *GHG Protocol*.

Les processus et flux inclus et exclus de l'analyse sont résumés au Tableau 2-2. L'approvisionnement et la gestion des rejets ont été répartis entre les étapes du cycle de vie afin de simplifier la lecture du tableau.

**Tableau 2-2 : Processus inclus et exclus des frontières de l'empreinte carbone (scénarios A.1 et A.2)**

Sous-système	Processus	Commentaire
Collecte et transport des résidus forestiers (13 % de l'approvisionnement en biomasse)	Opération de broyage	Consommation de diesel et certains consommables (huiles, lames, etc.) et production de l'équipement (émissions directes et indirectes) <i>Collecte de résidus avant broyage exclue faute de données</i>
	Transport au site de production	Consommation de diesel et infrastructure de transport (émissions directes et indirectes)
Extraction et transport des billes de bois (87 % de l'approvisionnement en biomasse)	Récolte des arbres	Consommation de diesel (émissions directes et indirectes)
	Construction des chemins forestiers	Consommation de diesel (émissions directes et indirectes)
	Transport au site de production	Consommation de diesel et infrastructure de transport (émissions directes et indirectes)
Production des granules	Fabrication	Production de certains consommables (huiles) incluse (émissions indirectes) <i>Autres ressources et rejets exclus</i>
	Opération de fabrication sur site	Consommation d'électricité, de combustibles fossiles (émissions directes et indirectes) et émissions directes à l'environnement incluses
	Séchage	Biomasse brûlée pour séchage incluse dans

		l'entrant de bois de l'usine Émissions directes incluses
	<i>Infrastructure</i>	<i>Exclue (données non disponibles)</i>
Transport en train vers Québec (1 300 km)	Émissions directes et indirectes	Incluses
	Infrastructure de transport	Incluse
Transport en navire vers la Grande-Bretagne (5 300 km)		
Transport vers la centrale (75 km)	Manutention et entreposage	Consommation électrique incluse
Combustion en centrale (granules)	Production d'électricité	Production de certains consommables incluse (émissions indirectes)
	Opérations	Émissions directes à l'environnement incluses
	Infrastructure	Incluse
	Gestion des rejets	Incluse
Cycle de vie de la production d'électricité au charbon en Grande-Bretagne	Production d'électricité	Extraction du charbon et production de certains consommables incluses (émissions indirectes)
	Opérations	Émissions directes à l'environnement incluses
	Infrastructure	Incluse
	Transport	Inclus
	Gestion des rejets	Incluse
Toutes les étapes	<i>Transit des employés</i>	<i>Exclu (considéré négligeable)</i>

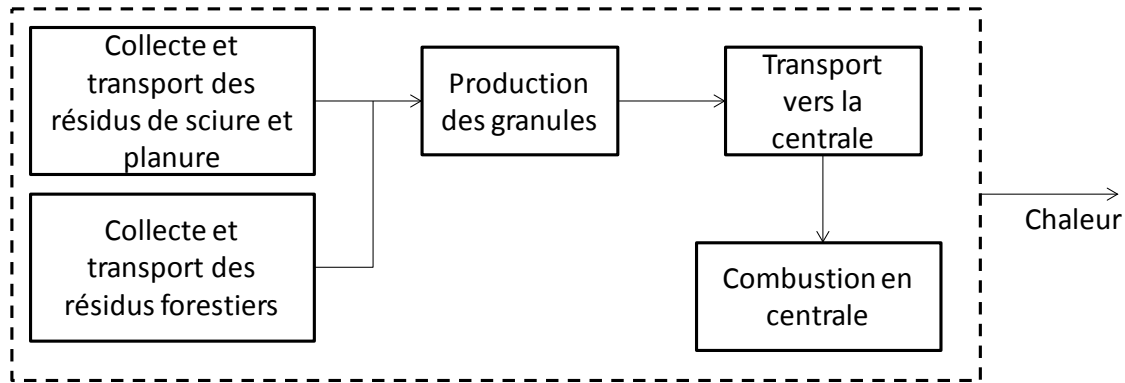
Il est à noter qu'aucun critère d'inclusion ou de coupure n'a été appliqué pour la présente étude.

#### **2.4.2 Processus inclus dans les systèmes B.1 et B.2**

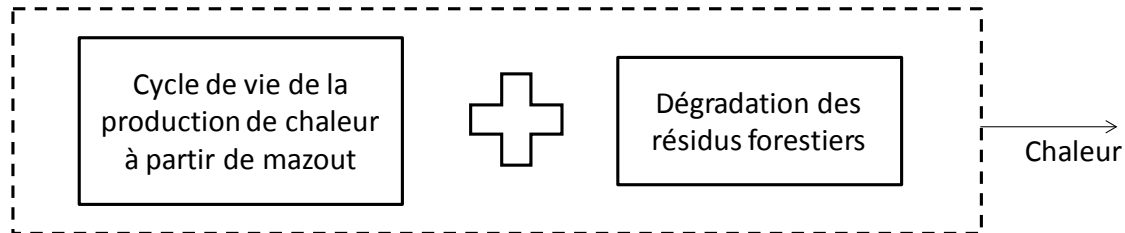
La Figure 2-3 schématise les frontières des systèmes de production de chaleur B.1 et B.2. Elles incluent les sous-systèmes (étapes du cycle de vie) suivants : la collecte et transport des résidus de sciure et planure, la collecte et le transport des résidus forestiers, la production des granules, leur transport et leur combustion en centrale.



### Granules de bois produits au Québec (B.1)



### Scénario de base (B.2)



**Figure 2-3 : Frontières des systèmes B.1 et B.2 de production de chaleur.**

Le sous-système « **collecte et transport des résidus de sciure et planure** » inclut la récolte des arbres, la construction de chemins forestiers, la livraison des billes de bois à la scierie, de même que les opérations de sciage. Les émissions de ces activités sont allouées massivement aux différents coproduits de sciage (bois d’œuvre, sciures, planures, blocs de bois).

Le sous-système « **collecte et transport des résidus forestiers** » inclut le broyage des résidus forestiers au lieu de coupe, de même que leur livraison au site de production. Aucune émission reliée aux activités forestières ayant généré les résidus forestiers n’a été incluse.

Le sous-système « **production des granules** » touche à la fabrication du produit en tant que tel. Il inclut le séchage de la biomasse et sa transformation en granules. Il inclut également certains consommables et l’opération des équipements (consommation d’électricité et de combustibles fossiles).

Le sous-système « **transport vers la centrale** » vise le transport par camion des granules, de leur lieu de production jusqu’à l’utilisateur. Dans ce cas-ci, l’étude suppose que l’utilisateur se trouve à Québec.

Quant à lui, le sous-système « **combustion en centrale** » concerne l’utilisation des granules par une chaudière afin de produire de la chaleur.

Pour ce qui est du scénario de base (B.2), celui-ci inclut le cycle de vie de la production de chaleur à partir de mazout, ainsi que les émissions directes de la dégradation des résidus forestiers non utilisés. Ces émissions ont servi à calculer la dette carbone du scénario B.1. L’étude suppose que les résidus de sciure et planure seraient brûlés s’ils n’étaient pas utilisés pour les granules. Les émissions de dioxyde de carbone biogénique contenu dans les granules du

scénario B.1 qui en sont constitués ne sont donc pas devancées par rapport au scénario de référence et n'affectent pas la dette carbone.

Les processus et flux inclus et exclus de l'analyse sont résumés au Tableau 2-3. L'approvisionnement et la gestion des rejets ont été répartis entre les étapes du cycle de vie afin de simplifier la lecture du tableau.

**Tableau 2-3 : Processus inclus et exclus des frontières de l'empreinte carbone (scénarios B.1 et B.2)**

Sous-systèmes	Processus	Commentaires
Collecte et transport des résidus de sciure et planure (80 % de l'approvisionnement en biomasse)	Récolte des arbres	Consommation de diesel (émissions directes et indirectes)
	Construction des chemins forestiers	Consommation de diesel (émissions directes et indirectes)
	Opérations de sciage	Production de certains consommables (huiles) incluse (émissions indirectes) Consommation d'électricité, de combustibles fossiles (émissions directes et indirectes) et émissions directes à l'environnement incluses
	Transport au site de production	Consommation de diesel et infrastructure de transport (émissions directes et indirectes)
Collecte et transport des résidus forestiers (20 % de l'approvisionnement en biomasse)	Opération de broyage	Consommation de diesel et certains consommables (huiles, lames, etc.) et production de l'équipement (émissions directes et indirectes) <i>Collecte des résidus avant broyage exclue faute de données</i>
	Transport au site de production	Consommation de diesel et infrastructure de transport (émissions directes et indirectes)
Production des granules	Fabrication	Production de certains consommables (huiles) incluse (émissions indirectes)
	Opération de fabrication sur site	Consommation d'électricité, de combustibles fossiles (émissions directes et indirectes) et émissions directes à l'environnement incluses
	Séchage	Biomasse brûlée pour séchage incluse dans l'entrant de bois de l'usine Émissions directes incluses
	<i>Infrastructure</i>	<i>Exclue (données non disponibles)</i>
Transport vers la centrale (200 km)	Émissions directes et indirectes	Incluses
	Infrastructure de transport	Incluse
	<i>Manutention et entreposage</i>	<i>Exclus (données non disponibles)</i>
Combustion en centrale (granules)	Production de chaleur	Production de certains consommables incluse (émissions indirectes)
	Opérations	Émissions directes à l'environnement incluses
	Infrastructure	Incluse
	Gestion des rejets	Incluse
Cycle de vie de la production de chaleur à partir de mazout	Production de chaleur	Extraction du pétrole et production de certains consommables incluses (émissions indirectes)
	Opérations	Émissions directes à l'environnement incluses
	Infrastructure	Incluse
	Transport	Inclus
	Gestion des rejets	Incluse
Toutes les étapes	<i>Transit des employés</i>	<i>Exclu (considéré négligeable)</i>

### 2.4.3 Frontières géographiques et temporelles

Conformément à l'unité fonctionnelle sélectionnée, la présente étude constitue une empreinte carbone représentative, en premier lieu, des contextes ontarien et britannique (scénarios A.1 et A.2), ainsi que, en second lieu, du contexte québécois (scénarios B.1 et B.2). Tous les scénarios se veulent représentatifs de la situation en 2014. Ainsi, les activités d'avant-plan ont été modélisées de manière à répondre à ce critère.

Dans le cas du scénario A.1, la production de granules ontariens transitant par Québec pour être expédiés en Grande-Bretagne n'avait pas encore débuté à la rédaction de ce rapport. Les données primaires de production provenaient d'estimations de l'entreprise qui prévoyait démarrer avant la fin de 2014. De plus, les frontières temporelles de ce scénario incluent la séquestration de carbone issue de la régénération de la forêt suite à la coupe ayant fourni les billes de bois, ainsi que les émissions de dégradation des résidus forestiers. Le bilan carbone de la forêt est considéré neutre, c'est-à-dire que la quantité de carbone séquestré lors de la régénération de la forêt est considérée égale à la quantité de carbone contenu dans le bois récolté.

Par ailleurs, il est à noter que certains processus compris dans les frontières des systèmes peuvent avoir lieu n'importe où ou à n'importe quel moment s'ils sont nécessaires à la réalisation de l'unité fonctionnelle. Par exemple, les processus associés à l'approvisionnement en matières premières, ainsi qu'à la gestion des rejets générés peuvent avoir lieu un peu partout dans le monde. De plus, certains processus peuvent générer des émissions sur une plus longue période que l'année de référence. C'est le cas de l'enfouissement de déchets, qui engendre des émissions (biogaz et lixiviat) sur une période de temps dont la longueur (de quelques décennies à plus d'un siècle) dépend de la conception et des paramètres d'opération des cellules d'enfouissement et de la modélisation de leurs émissions dans l'environnement.

## 2.5 Sources, hypothèses et données d'inventaire du cycle de vie (ICV)

Les données requises à l'empreinte carbone concernent les matières premières utilisées, l'énergie consommée ainsi que les émissions et rejets générés à chaque étape du cycle de vie étudié.

La collecte de données est une étape importante qui a été réalisée de manière itérative entre le CIRAIG, QWEB et ses partenaires. La qualité des résultats d'une empreinte carbone dépend de la qualité des données utilisées pour effectuer l'évaluation. C'est pourquoi tous les efforts ont été faits pour que les informations disponibles les plus crédibles et les plus représentatives soient intégrées à l'étude.

Cette étude a été réalisée de manière à privilégier les **données primaires** disponibles et faciles d'accès. Ces données ont été fournies pour la plupart par QWEB et ses partenaires. Elles incluent les données propres à la production de granules de l'entreprise ontarienne Rentech (production future ; scénario A.1) et de deux producteurs québécois (scénario B.1).

Ces données primaires ont été collectées grâce à un questionnaire électronique format Excel transmis à QWEB et aux producteurs de granules.

Les sources de données incluent également des données standard relatives aux produits génériques étudiés, aux règles de l'art et aux pratiques générales dans le secteur évalué. C'est

notamment le cas de la biomasse forestière, plus précisément la récolte de billes de bois et les résidus de scierie.

Les données manquantes, incomplètes ou non facilement accessibles ont quant à elles été complétées par des **données secondaires**, c.-à-d. issues de la base de données d'inventaire *ecoinvent*, de la base de données interne du CIRAIG, de bases de données publiques disponibles, de la littérature et de jugements d'experts.

La plupart de ces données secondaires proviennent des modules de données d'inventaire du cycle de vie (ICV) disponibles dans la base de données *ecoinvent* version 3.01 ([www.ecoinvent.ch/](http://www.ecoinvent.ch/)). Cette base de données européenne est particulièrement reconnue par la communauté scientifique internationale, car elle surpasse de loin les autres bases de données commerciales tant du point de vue quantitatif (nombre de processus inclus) que qualitatif (qualité des procédés de validation, complétude des données, etc.).

L'utilisation de données européennes pour représenter l'Amérique du Nord peut introduire un biais dans certains cas. Cependant, il est estimé que la cohérence et la complétude de cette base de données en font une option préférable à d'autres données disponibles pour la plupart des processus.

Dans la mesure du possible, les modules de données génériques employés dans le cadre de cette étude ont été adaptés de manière à augmenter leur représentativité du contexte analysé. Plus particulièrement, pour toutes les activités d'avant-plan dont le pays ou la province était connu, les modules génériques ont été adaptés en utilisant les mélanges d'approvisionnement électrique (*grid mix*) correspondants.

Le Tableau 2-4 présente le détail de certains *grid mix* utilisés.

**Tableau 2-4 : Mélanges d'approvisionnement électrique utilisés**

Mode de génération électrique	Québec	Ontario
<b>Charbon</b>	0,01 %	17,6 %
<b>Pétrole</b>	0,01 %	1,0 %
<b>Gaz naturel</b>	0,08 %	7,9 %
<b>Nucléaire</b>	0,24 %	47,2 %
<b>Hydroélectrique</b>	97,84 %	24,7 %
<b>Éolien</b>	1,22 %	0,6 %
<b>Biomasse</b>	0,06 %	1,2 %
<b>Autre</b>	< 0,1 %	--

Note : le total peut différer de 100 % à cause de l'arrondissement. Les modes de génération électriques pour lesquels la fraction indiquée est < 0,1 % ont été négligés dans la modélisation. Source: *ecoinvent* 3.01.

Dans les cas où aucune source n'était disponible, des **hypothèses** ont aussi été posées, en accord avec QWEB.

Le Tableau 2-5 résume les principales sources de données employées dans cette empreinte carbone.

**Tableau 2-5 : Principales données, sources et hypothèses utilisées dans l'établissement de l'ICV d'avant-plan**

Type de données	Source de données
Collecte et transport des résidus forestiers	Processus ecoinvent v3.01
Production de granules en Ontario	Rentech
Transport des granules	Processus ecoinvent v3.01
Cycle de vie de la prod. d'électricité à partir de charbon en Grande-Bretagne	Processus ecoinvent v3.01 modifié pour correspondre à l'efficacité de la centrale de Drax
Décomposition des résidus forestiers	Ressources naturelles Canada
Collecte et transport des résidus de sciure et de planure	Energex, Boisaco
Production des granules au Québec	Energex, Boisaco
Caractéristiques de la centrale thermique	Processus ecoinvent v3.01 modifié pour correspondre à l'efficacité de la chaudière PELLEMATIC 56 kW (Séguin, 2014)
Cycle de vie de la prod. de chaleur à partir de mazout	Processus ecoinvent v3.01 (chaudière au mazout léger, 10 kW, non modulée)
Fin de vie des résidus de sciure et planure	QWEB
Émissions de GES liés aux différents processus	Processus ecoinvent v3.01

Le logiciel SimaPro 8.0, développé par PRé Consultants ([www.pre.nl](http://www.pre.nl)), a été utilisé pour faire la modélisation des systèmes et réaliser le calcul de l'inventaire.

## 2.6 Évaluation de l'empreinte et de la dette carbone

L'évaluation des émissions de GES entrant et sortant des frontières du système a été réalisée à partir des derniers potentiels de réchauffement climatique (PRC ou GWP en anglais) du GIEC (Myrhe *et al.*, 2013) sur un horizon de 100 ans. À noter que les facteurs utilisés tiennent compte de la rétroaction du climat (*climate feedback*).

Les résultats sont présentés à la façon du *GHG Protocol Product Life Cycle Reporting and Accounting Standard* ([www.ghgprotocol.org](http://www.ghgprotocol.org)), c'est-à-dire que les émissions de GES fossiles, biogéniques, dues au changement d'utilisation des terres et la séquestration de CO<sub>2</sub> sont présentées séparément.

L'utilisation de biomasse à des fins énergétiques occasionne plus d'émissions de GES, en considérant les émissions biogéniques, que l'utilisation de combustibles fossiles, ce que l'on nomme la dette carbone. Si les granules proviennent d'arbres récoltés, le carbone biogénique est par la suite séquestré par les arbres en croissance, « remboursant » la dette carbone au bout d'un certain nombre d'années. Si les granules proviennent de résidus forestiers, le concept de dette carbone provient du fait que leur combustion accélère la libération du carbone contenu

dans le bois par rapport au scénario de base où les résidus se dégraderaient plus lentement en forêt. Le temps de recouvrement de la dette carbone a donc été estimé. Il représente le nombre d'années nécessaires au remboursement de la dette carbone par rapport au scénario de base. Pour ce faire, des données fournies par Ressources naturelles Canada ont été utilisées (Paré, 2014).

Pour la dette carbone du scénario A.1, deux mécanismes entraînent en ligne de compte dans le calcul : le renouvellement de la forêt suite à la coupe pour les granules provenant d'arbres récoltés (A.1) et la dégradation des résidus forestiers non utilisés pour les granules provenant de résidus forestiers (A.2). Ainsi, de la quantité excédentaire de CO<sub>2</sub> équivalent (fossiles et biogéniques) du scénario A.1 par rapport aux émissions fossiles du scénario A.2 a été soustraite la quantité annuelle de CO<sub>2</sub> séquestré par les nouveaux arbres et les émissions annuelles de dégradation des résidus en forêt. Le taux de croissance des arbres provenait de tables de production donnant l'évolution du volume dans le temps du bouleau et du peuplier (Pothier et Savard, 1998). Quant à elles, les émissions de dégradation des résidus en forêt ont été estimées avec un taux de 8,242 % par an (Paré, 2014).

Pour ce qui est du scénario B.1, seule la dégradation des résidus forestiers entraine en ligne de compte. Le même taux de dégradation que le scénario A.2 a été utilisé.

## 2.7 Interprétation

Cette dernière phase de l'empreinte carbone permet de discuter les résultats obtenus et de les mettre en perspective. Elle inclut une comparaison des systèmes décrits à la section 2.4.

Les résultats présentés au chapitre 3 sont appuyés sur une analyse complète et approfondie. Cela comprend notamment une évaluation de la qualité des données et des analyses de sensibilité.

La méthodologie employée pour l'analyse et l'interprétation des données est résumée dans les sous-sections qui suivent. Mais d'abord, une précision est donnée quant à l'analyse de l'inventaire.

### 2.7.1 Évaluation de la qualité des données d'inventaire

La fiabilité des résultats et des conclusions de l'empreinte carbone dépend de la qualité des données d'inventaire qui sont utilisées. Il est donc important de s'assurer que ces données respectent certaines exigences spécifiées en accord avec l'objectif de l'étude.

Selon la norme ISO, les exigences relatives à la qualité des données devraient au minimum en assurer la **validité**, ce qui est équivalent ici à leur représentativité quant à l'âge, la provenance géographique et la performance technologique. Ainsi, les données utilisées devraient être représentatives :

- De la période définie par l'unité fonctionnelle, soit 2014 (voir section 2.3) ;
- Du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les systèmes à l'étude, soit l'Ontario, la Grande-Bretagne et le Québec (voir sous-section 2.4.3) ;
- Des caractéristiques technologiques des processus de production de granules, d'électricité et de chaleur.

Bien qu'aucune méthode particulière ne soit actuellement prescrite par l'ISO, deux critères ayant une influence sur la qualité de l'inventaire ont été choisis pour évaluer les données :

- **Fiabilité** : concerne les sources, les méthodes d'acquisition et les procédures de vérification des données. Une donnée jugée fiable est une donnée vérifiée et mesurée sur le terrain. Ce critère se réfère principalement à la quantification des flux économiques.
- **Représentativité** : traite des corrélations géographique et technologique. Est-ce que l'ensemble des données reflète la réalité? Une donnée est jugée représentative lorsque la technologie est en relation directe avec le champ d'étude. Ce critère se rapporte principalement au choix des processus servant à modéliser le système.

En parallèle à l'évaluation de la qualité des données utilisées, une estimation de la contribution des processus (c.-à-d. dans quelle mesure les processus modélisés avec ces données contribuent à l'empreinte carbone des systèmes à l'étude) a été effectuée. En effet, une donnée de qualité inférieure peut très bien convenir dans le cas d'un processus dont la contribution est minime. Par contre, des données de bonne qualité devront être recherchées pour les processus qui influencent grandement les conclusions de l'étude.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse de contribution s'est résumée à observer l'importance relative des différents processus modélisés par rapport à l'empreinte carbone évaluée.

### 2.7.2 Analyses de sensibilité

Plusieurs paramètres utilisés lors de la modélisation des systèmes présentent une certaine incertitude, plus particulièrement liée aux hypothèses et aux modules de données génériques employés. Les résultats obtenus sont liés à ces paramètres et leur incertitude est transférée aux conclusions tirées.

À partir des principaux processus/paramètres contributeurs identifiés par l'analyse de qualité des données, des analyses de sensibilité ont été effectuées sur les paramètres suivants :

#### Systèmes A.1 et B.1 (granules Ontario et Québec)

- **Source de bois**
  - **Ontario (A.1)** : L'approvisionnement en billes de bois a été modélisé par une donnée québécoise de récolte de résineux du nord du fleuve Saint-Laurent, malgré le fait que des feuillus sont utilisés. Il était jugé que le contexte nordique québécois (régime public, grandes distances) était approprié pour le contexte nordique ontarien. Afin d'évaluer l'influence de la donnée utilisée pour modéliser cet approvisionnement, une analyse de sensibilité a été réalisée en remplaçant la donnée utilisée dans le cas de base par une donnée européenne d'ecoinvent de récolte de feuillus « *Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark* », l'essence correspondant au contexte ontarien.
  - **Québec (B.1)** : L'approvisionnement en bois pour les résidus de sciure et planure a été modélisé par la donnée québécoise de récolte de résineux du nord du fleuve Saint-Laurent. Étant donné qu'une partie de l'approvisionnement en bois a lieu au sud du fleuve et avec du feuillu, une analyse de sensibilité a été réalisée en remplaçant les données utilisées dans le cas de base par la donnée ecoinvent « *Sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark* ».

#### Système A.1 (granules Ontario)

- **Émissions de CH<sub>4</sub> pendant le séchage** : Le séchage des granules émet des composés organiques volatils (COV) dont une partie est émise sous forme de CH<sub>4</sub>, un puissant GES.

Ces émissions n'ont toutefois pas été considérées, puisque la proportion de CH<sub>4</sub> parmi les COV émis n'était pas connue. Une analyse de sensibilité sur les émissions de CH<sub>4</sub> a été effectuée en considérant que tous les COV sont émis sous forme de CH<sub>4</sub>.

- **Grid mix de l'Ontario** : Le *grid mix* ontarien utilisé, dans lequel une partie de l'électricité est produite à partir de charbon, est valide pour la période de 2008 à 2013. Toutefois, il est prévu que les centrales au charbon en Ontario soient remplacées par des centrales à la biomasse d'ici 2015<sup>3</sup>. Une analyse a donc été réalisée pour évaluer l'effet de produire une partie de l'électricité en Ontario à partir de biomasse en remplacement du charbon.

#### Système B.1 (granules Québec)

- **Transport des granules** : Ce scénario a considéré un transport des granules sur une distance de 200 km en camion, qui est représentative de la distance entre plusieurs producteurs de granules et la ville de Québec. Or, il est pertinent d'évaluer l'influence de la distance de transport des granules sur l'empreinte carbone. Ainsi, une analyse de sensibilité a été réalisée en supposant que les granules sont transportés sur une distance de 500 km en camion.

#### Système B.2 (mazout Québec)

- **Production de chaleur à partir de gaz naturel** : Ce scénario a considéré que la chaleur était produite à partir de mazout. Or, il se peut que cette chaleur soit produite à partir de gaz naturel. Une analyse a donc été réalisée pour évaluer l'effet d'utiliser du gaz naturel dans la modélisation.

Les résultats des analyses de sensibilité effectuées sont présentés à la section 3.5.

---

<sup>3</sup> <http://www.powerauthority.on.ca/power-planning/long-term-energy-plan-2013>



### 3 Résultats et interprétation

Ce chapitre couvre les deux dernières phases de l'étude, c'est-à-dire l'évaluation de l'empreinte et de la dette carbone des systèmes étudiés et l'interprétation des résultats, conformément au cadre méthodologique présenté aux sections 2.6 et 2.7. Il présente les résultats des systèmes de granules à l'étude, leur comparaison avec leur scénario de base respectif, de même que différentes études de sensibilités et une analyse de la qualité des données.

#### 3.1 Empreinte carbone des systèmes de granules

Le premier objectif de l'étude était d'établir l'empreinte carbone de la production d'électricité et de chaleur à partir de granules de bois. Les résultats globaux de ces derniers sont, respectivement, 229 g CO<sub>2</sub> éq./kWh et 18 g CO<sub>2</sub> éq./MJ. Le Tableau 3-1 présente le détail des résultats de chaque scénario, c'est-à-dire séparément les émissions de GES fossiles, biogéniques, dues au changement d'utilisation des terres et le CO<sub>2</sub> séquestré.

**Tableau 3-1 : Émissions en kg par scénario**

	Ontario		Québec	
	Granules de bois	Scénario de base	Granules de bois	Scénario de base
CO <sub>2</sub> éq. fossile	2.29E-01	8.09E-01	1.78E-02	9.45E-02
CO <sub>2</sub> éq. biogénique	9.99E-01	1.42E-01	1.30E-01	1.45E-04
CO <sub>2</sub> éq. dû au changement d'utilisation des terres	8.62E-05	8.00E-05	4.05E-06	6.10E-06
CO <sub>2</sub> séquestré <sup>4</sup>	1.00E+00	1.45E-01	1.24E-01	8.59E-05

Les résultats ont servi à identifier les processus et paramètres qui contribuent le plus à l'empreinte carbone des différents systèmes (c.-à-d. à identifier les points chauds du cycle de vie de chacun des systèmes). Les figures suivantes illustrent les sous-systèmes contribuant à l'empreinte carbone (GES fossiles) des scénarios A.1 et B.1. La Figure 3-1 montre que les phases les plus importantes du scénario A.1 sont le transport des granules (51 %), l'extraction du bois et les résidus de bois (30 %) et la production des granules (15 %). Pour ce qui est du scénario B.1 (Figure 3-2), c'est l'extraction du bois et les résidus de bois qui dominent (57 %), suivis de la production de chaleur (14 %), le transport des granules (12 %) et la production des granules (10 %).

<sup>4</sup> Les quantités de CO<sub>2</sub> séquestré ne sont pas égales aux émissions biogéniques puisque ces dernières sont en kg CO<sub>2</sub> éq. et incluent les autres GES biogéniques non absorbés par les végétaux dont le méthane (CH<sub>4</sub>). De plus, les flux de carbone des nombreux processus d'arrière-plan ne balancent pas exactement.

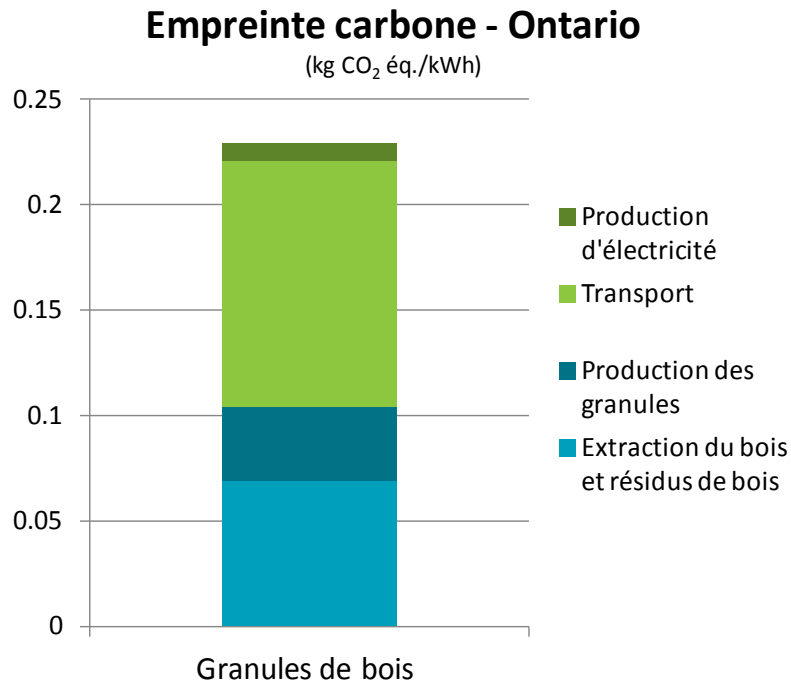


Figure 3-1 : Émissions de GES fossiles du scénario A.1.

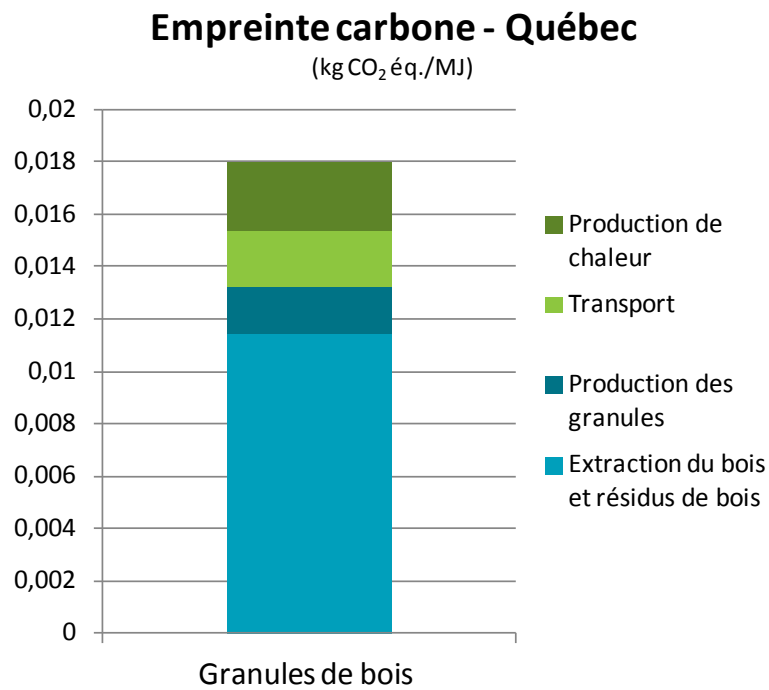


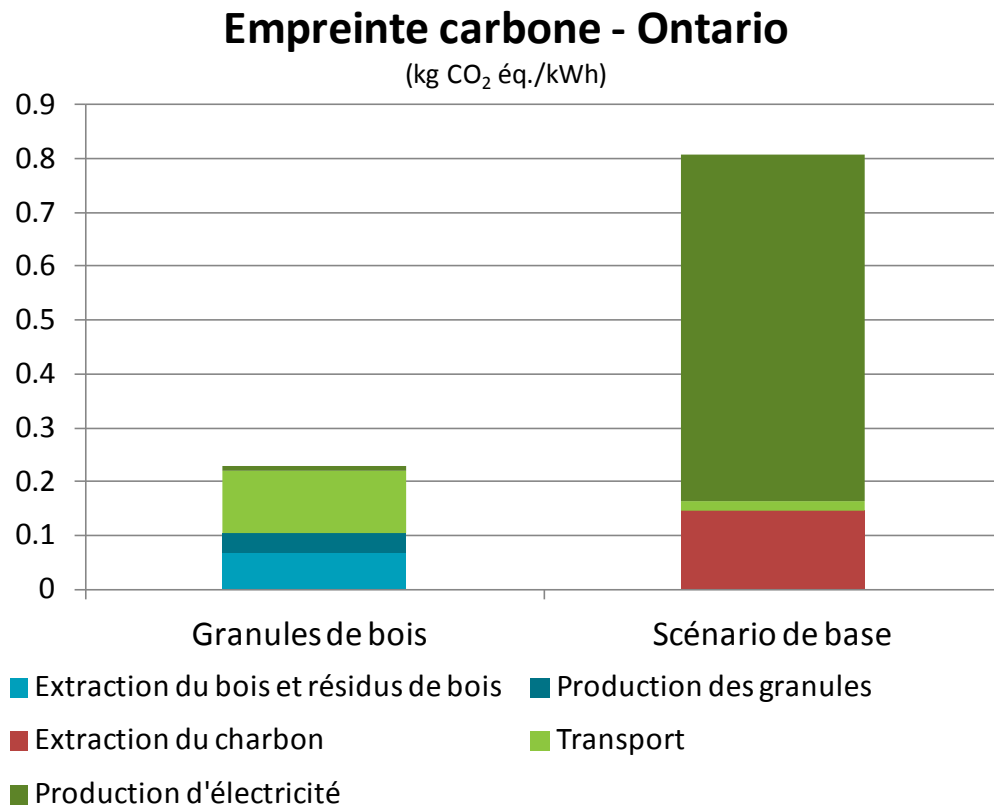
Figure 3-2 : Émissions de GES fossiles du scénario B.1.

### 3.2 Comparaison des systèmes

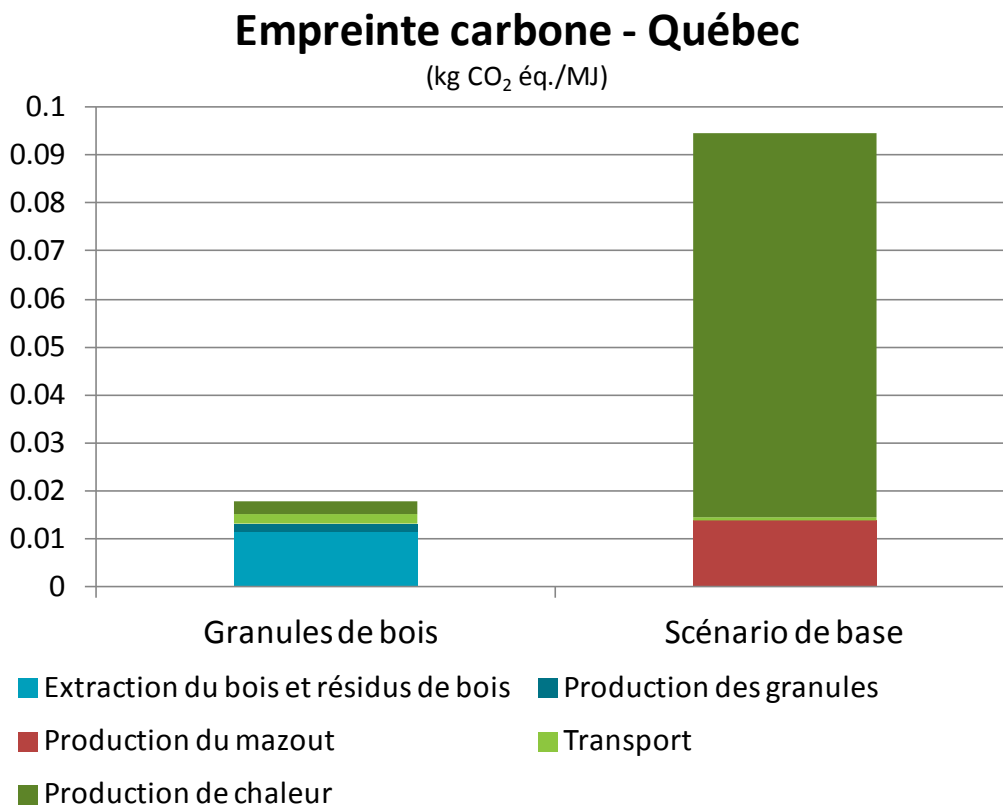
Les figures suivantes illustrent deux comparaisons :

1. Entre la production d'électricité à partir de granules et celle à partir du charbon (Figure 3-3) ; et
2. Entre la production de chaleur à partir de granules et celle à partir du mazout (Figure 3-4).

Dans le premier cas, l'utilisation de granules émet **quatre** fois moins de GES fossiles, et plus de **cinq** fois moins dans le deuxième.



**Figure 3-3 : Comparaison des émissions de GES fossiles de la production d'électricité à partir de granules et à partir de charbon (scénario de base).**



**Figure 3-4 : Comparaison des émissions de GES fossiles de la production de chaleur à partir de granules et à partir de mazout (scénario de base).**

### 3.3 Dette carbone

Suivant la méthodologie décrite à la section 2.6, la dette carbone des scénarios A.1 et B.1 a été estimée. Tel qu'illustré au Tableau 3-1, l'utilisation de granules occasionne des émissions de GES fossiles et biogéniques supplémentaires de 403 g CO<sub>2</sub> éq. et 62,5 g CO<sub>2</sub> éq. Respectivement. Cela correspond à un temps de recouvrement de la dette carbone de **27 ans** dans le cas du scénario A.1 et **moins d'un an** pour le scénario B.1.

### 3.4 Qualité des données d'inventaire

À partir de ces analyses, il a été possible de constater qu'advenant qu'une empreinte carbone détaillée soit effectuée, l'amélioration de certaines données jugées comme étant de qualité moyenne ou faible ne changerait pas le principal résultat de cette étude, c'est-à-dire que l'utilisation de granules permet de réduire les émissions de GES fossiles par rapport au charbon et au mazout pour une perspective à long terme. Cependant, il est important de noter que pour le scénario A.1, le temps de recouvrement de la dette carbone est de 27 ans. Ainsi, le scénario de granules de bois pour produire de l'électricité en Grande-Bretagne a un bilan carbone supérieur au scénario de production d'électricité à partir de charbon à court terme. Ce temps de recouvrement important est principalement causé par le fait qu'une portion importante des

granules de bois provient d'arbres récoltés et non de résidus. Par contre, des efforts supplémentaires de collecte de données permettraient d'en augmenter la précision. En effet, la dynamique de séquestration de carbone en forêt pour le bouleau et le peuplier a été déterminée à l'aide de courbes de croissance de peuplement par manque de données d'échange de carbone entre la forêt et l'atmosphère.

Les principales données à améliorer pour augmenter la robustesse des résultats sont liées aux processus/paramètres suivants :

- Collecte de résidus forestiers avant broyage.
- Infrastructure de production de granules.
- Manutention et entreposage des granules entre les différents modes de transport.
- Courbe de croissance des arbres pour le calcul du temps de recouvrement de la dette carbone : les échanges de CO<sub>2</sub> entre la forêt et l'atmosphère n'étant pas disponibles pour les essences à l'étude, ceux-ci ont été estimés à l'aide du taux de croissance des arbres. Cette approximation sous-estime le temps de recouvrement de la dette carbone puisqu'une jeune forêt émet généralement plus de CO<sub>2</sub> qu'elle n'en absorbe (Bernier & Paré, 2013). Or, ce phénomène n'a pas été considéré dans cette étude.
- Impact de l'utilisation des résidus forestiers et des billes sur le bilan de carbone de la forêt : il a été considéré que l'utilisation des résidus forestiers et la récolte des billes n'affectaient pas le bilan de carbone de la forêt, ce qui n'est peut-être pas le cas. De la recherche est nécessaire afin de mieux comprendre l'impact de ces activités sur les bilans de carbone forestier.
- L'extraction des billes de bois : bien que des données québécoises soient disponibles, elles ne correspondent pas tout à fait au contexte géographique à l'étude.
- Transport en train et en bateau : vu leur contribution pour le scénario A.1, il serait pertinent de comparer les émissions des processus de transport écoinvent utilisés avec celles d'autres sources.
- Technologie de chaudière au mazout pour le Québec : augmenter la représentativité de la technologie considérée pour le Québec.
- Production de granules ontariens : effectuer une mise à jour avec des données de production réelles.

À l'intérieur du champ de l'étude, seule l'extraction des billes de bois a été testée en analyse de sensibilité.

### 3.5 Analyses de sensibilité

Les limites de cette analyse préliminaire sont essentiellement liées au caractère incomplet et plus ou moins valide de l'inventaire. En effet, plusieurs processus initialement inclus dans le cycle de vie des systèmes étudiés ont dû être estimés, principalement par manque d'informations les concernant. L'inclusion ou l'augmentation de la validité de certains processus dans l'inventaire modifierait les résultats d'empreinte carbone. Il est donc important d'évaluer dans quelle mesure ces modifications pourraient inverser les conclusions obtenues, en particulier si les processus exclus ou estimés sont différents pour les alternatives comparées ou concernent des éléments qui semblent avoir le plus d'influence sur les résultats.

Telles que décrites à la section 2.7.2, six analyses de sensibilité ont été effectuées pour vérifier l'influence des hypothèses de modélisation sur les conclusions de l'étude. Le Tableau 3-2 liste la

variation en pourcentage des émissions de GES fossiles par rapport au cas de base du même scénario (Tableau 3-1).

**Tableau 3-2 : Variation en pourcentage des émissions de GES fossiles par rapport au cas de base**

Analyse de sensibilité	Variation par rapport au cas de base (%)
<b>Ontario (scénario A.1)</b>	
Source de bois	-7 %
Émissions de CH <sub>4</sub> pendant le séchage	0 %
<i>Grid mix</i> de l'Ontario	-7 %
<b>Québec (scénario B.1)</b>	
Source de bois	-5 %
Transport des granules	18 %
<b>Québec (scénario B.2)</b>	
Production de chaleur à partir de gaz naturel	-16 %

Ces résultats montrent que les paramètres testés n'affectent pas les conclusions de cette étude, c'est-à-dire que l'utilisation de granules permet de réduire les émissions de GES fossiles. Même en couplant les variations qui désavantagent les granules pour les scénarios B.1 et B.2, c'est-à-dire l'augmentation du transport des granules et la production de chaleur à partir de gaz naturel à la place de mazout, les émissions sont 3,8 fois supérieures pour le combustible fossile.

### 3.6 Applications et limites de l'empreinte carbone

Cette empreinte carbone visait à réaliser une analyse simplifiée de l'empreinte carbone de deux filières de granules de bois différentes : 1) l'utilisation de granules produits en Ontario à partir de résidus forestiers comme substitution au charbon dans une centrale thermique de Grande-Bretagne et 2) l'utilisation de granules fabriqués au Québec comme substitution à une chaudière au mazout dans un édifice local. Toute conclusion tirée de cette étude hors de son contexte original doit être évitée.

Ces résultats pourront être utilisés pour :

- Caractériser l'empreinte carbone des différents systèmes étudiés, en identifier et en comparer les « points chauds » et les paramètres clés ;
- Cibler les forces et les faiblesses de chacune des alternatives et identifier les conditions pour lesquelles une alternative semble préférable à une autre.

### Les principales limites pouvant cependant être soulevées concernent :

- La validité des hypothèses relatives au cycle de vie des systèmes étudiés ;
- La complétude et la validité des données d'inventaire. En particulier, l'utilisation de données secondaires provenant de bases de données ICV européennes peut influencer la validité des résultats dans le contexte géographique des différents systèmes à l'étude. De surcroît, la nature préliminaire de l'étude fait en sorte que seules les données facilement accessibles ont été utilisées.

Il convient enfin de rappeler qu'une empreinte carbone n'évalue que partiellement les impacts potentiels sur l'environnement. Une analyse de cycle de vie permettrait une analyse plus complète de ceux-ci.

## **3.7 Recommandations et perspectives**

### **3.7.1 Recommandations pour améliorer la filière de granules ontariens (A.1)**

À la lumière des résultats du scénario A.1, les mesures suivantes pourraient améliorer l'empreinte carbone de la filière de granules ontariens :

1. Limiter le transport en train des granules : malgré que la distance parcourue à l'aide de ce moyen de transport soit environ 4 fois inférieure à celle du bateau, les émissions par kilomètre sont environ le même nombre de fois supérieures.
2. Utiliser davantage de résidus forestiers afin de réduire le temps de recouvrement de la dette carbone : cette recommandation ne tient cependant pas compte d'impacts positifs potentiels qu'auraient ces résidus laissés au sol, ceux-ci pouvant influencer le contenu en carbone du sol.

### **3.7.2 Recommandations pour améliorer la filière de granules québécois (B.1)**

À la lumière des résultats du scénario B.1, les mesures suivantes pourraient améliorer l'empreinte carbone de la filière de granules québécois :

1. Effectuer une analyse plus poussée du marché québécois des coproduits de scierie dans le but de mieux comprendre les conséquences d'une augmentation de la production de granules, et ainsi de mieux évaluer les impacts de leur utilisation sur le climat : la diversité des coproduits de scierie ainsi que leurs multiples usages font en sorte que des scénarios d'utilisation de granules autres que celui utilisé lors de cette étude sont possibles, et pourraient influencer l'empreinte carbone de la filière québécoise.
2. Minimiser les distances de transport des granules : bien que le transport contribue beaucoup moins à l'empreinte carbone de la filière québécoise qu'à celle de la filière ontarienne, l'analyse de sensibilité a indiqué que la distance de transport est un paramètre sensible, le transport par camion émettant plus de GES par tonne-kilomètre que le transport par bateau.

### **3.7.3 Perspectives**

Bien que chaque empreinte carbone possède ses objectifs et son champ d'étude propres, comparer les résultats de cette étude avec ceux de la littérature répertoriée au Tableau 1-1 révèle que ceux-ci sont d'une amplitude comparable. La source de la biomasse et sa distance de l'utilisateur sont des paramètres déterminants pour l'empreinte carbone.

Dans la présente étude, le calcul du temps de recouvrement de la dette carbone est une amélioration significative par rapport à la plupart des études existantes. Elle permet de mesurer les effets des émissions de GES biogéniques qui, comme les GES fossiles, participent aux changements climatiques lorsqu'ils sont émis. Les résultats ont permis de démontrer que le scénario A.1 possédait un temps de recouvrement de la dette carbone non négligeable et qu'à court terme, l'utilisation de granules de bois produits en Ontario pour alimenter les centrales électriques britanniques à la place du charbon n'était pas favorable. Par contre, à long terme, les granules de bois s'avèrent être une bien meilleure option que le charbon. Il est aussi important de considérer que ces conclusions sont applicables uniquement à petite échelle et qu'une utilisation de granules de bois entraînant une augmentation importante des coupes forestières devrait être évaluée à l'aide d'une ACV de type conséquentiel.



## 4 Conclusions

---

Cette étude a permis de répondre aux deux objectifs établis au départ, à savoir de réaliser une analyse simplifiée de l’empreinte carbone de deux filières de granules de bois différentes : 1) l’utilisation de granules produits en Ontario à partir de résidus forestiers comme substitution au charbon dans une centrale thermique de Grande-Bretagne et 2) l’utilisation de granules fabriqués au Québec comme substitution à une chaudière au mazout dans un édifice local.

Les résultats ont révélé que l’utilisation des granules permet de diminuer substantiellement les émissions de GES fossiles. Cependant, le temps de recouvrement de la dette carbone occasionnée par les émissions totales de GES supplémentaires par rapport aux scénarios de base s’élève à 27 ans pour la filière ontarienne et de moins d’un an pour la filière québécoise. Ainsi, l’utilisation de granules fabriqués à partir de billes de bois (scénario A.1) n’est pas favorable à court terme, mais l’est à long terme. Le calcul du temps de recouvrement de la dette carbone est une amélioration par rapport à la littérature concernant l’empreinte carbone des granules de bois.

## 5 Références

---

- BERNIER, P. et PARÉ, D. (2013). Using ecosystem CO<sub>2</sub> measurements to estimate the timing and magnitude of greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy. Global Change Biology Bioenergy. 5, p.67-72.
- BURKE, M. A. (2006). A life cycle carbon balance for electricity produced from forest residues : a British Columbian case study. University of British Columbia, 140 pages.
- HILTON, G. et MURRAY, G. (2013). British Columbia wood pellets – Sustainability fact sheet, étude réalisée pour la Wood Pellet Association of Canada et le gouvernement de la Colombie-Britannique, 8 pages.
- IEA (2013). Upgrading and efficiency improvement in No 13/9 August 2013 coal-fired power plants, International Energy Agency (IEA) Clean Coal Centre, 2 pages En ligne : <http://www.iea-coal.org.uk/documents/83185/8784/Upgrading-and-efficiency-improvement-in-coal-fired-power-plants,-CCC/221> [Page consultée le 25 juin 2014].
- ISO (2006a). ISO 14040: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre, Organisation internationale de normalisation, 24 p.
- ISO (2006b). ISO 14044: Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices, Organisation internationale de normalisation, 56 p.
- MAGELLIA, F., BOUCHER, K., BI, H. T., MELIN, S., BONOLIA, A. (2009). An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe. Biomass and bioenergy. 33, p.434-441.
- MAHALLE, L. (2013). Comparative life cycle assessment of pellet, natural gas and heavy fuel oil as heat energy sources, étude réalisée par FPIInnovations pour Ressources naturelles Canada, Vancouver, 42 pages.
- MELBYE, A. M. (2012). Life cycle assessment of Norwegian bioenergy heat and power systems. Mémoire de maîtrise. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 211 pages.
- MYHRE, G., SHINDELL, D., BRÉON, F.-M., COLLINS, W., FUGLESTVEDT, J., HUANG, J., KOCH, D., LAMARQUE, J.-F., LEE, D., MENDOZA, B., NAKAJIMA, T., ROBOCK, A., STEPHENS, G., TAKEMURA, T. ET ZHANG, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Dans: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 659 pages.
- OBERNBERGER, I. et THEK, G. (2012). The pellet handbook – The production and thermal utilisation of pellets. Taylor and Francis, Florence (KY), 590 pages.
- PA, A., CRAVEN, J. S., BI, X. T., MELIN, S. et SOKHANSANJ, S. (2012). Environmental footprints of British Columbia wood pellets from a simplified life cycle analysis. International Journal of Life Cycle Assessment. 17, p.220-231.
- PARÉ, D. (2014). Communication personnelle. Dette carbone de granules. 25 juin 2014. Courriel entre David Paré (Ressources naturelles Canada) et Hugues Imbeault-Tétreault (CIRAIG).

- PORTZ, T. (2013). Reinventing the Rail Car, Biomass Magazine, En ligne : <http://biomassmagazine.com/articles/9695/reinventing-the-rail-car> [Page consultée le 8 août 2014].
- POTHIER et SAVARD (1998). Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec.
- SÉGUIN, M. (2014). Communication personnelle. Fiche technique OkoFEN. 7 mai 2014. Courriel entre Michel Séguin (Resomass) et Hugues Imbeault-Tétreault (CIRAIG).
- VOEGELE, E. (2014). Drax considers developing additional U.S. pellet capacity, Biomass Magazine, En ligne : <http://biomassmagazine.com/articles/10025/drax-considers-developing-additional-u-s-pellet-capacity> [Page consultée le 8 août 2014].
- ZHANG, Y. (2010). Life Cycle Environmental and Cost Evaluation of Bioenergy Systems. Thèse de doctorat, University of Toronto, Toronto, 208 pages.