



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

Analyse comparative de deux modèles d'atténuation des GES servant à quantifier les émissions provenant de la bioénergie forestière

Par : Jessica DeBiasio, Louis-Etienne Robert, Carolyn Smyth, Jérôme Laganière

Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts
Avril 2025





Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

Analyse comparative de deux modèles d'atténuation des GES servant à quantifier les émissions provenant de la bioénergie forestière

By: Jessica DeBiasio, Louis-Etienne Robert, Carolyn Smyth, Jérôme Laganière

Natural Resources Canada, Canadian Forest Service
Avril 2025

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2025

N° de cat. : Fo4-240/2025F-PDF
978-0-660-75255-6

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
580, rue Booth
Ottawa (Ontario) K1A 0E4

Une version électronique de ce rapport est disponible à partir du Dépôt ouvert des sciences et technologie (DOST) de RNCan : <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca>.

This publication is available in English under the title: *Comparative analysis of two GHG mitigation models quantifying forest bioenergy emissions*

Crédits photographiques :
première page, iStock/Claude Laprise

Le contenu de cette publication peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques, mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada, et que la reproduction n'a pas été faite en association avec Ressources naturelles Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de Ressources naturelles Canada. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à copyright-droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.

Table des matières

1. Contexte	7
2. Contexte des modèles.....	9
2.1. Cadre du potentiel d'atténuation du MBC.....	9
2.1.1.Introduction	9
2.1.2. Méthodologie	9
2.2. Modèle GES bioénergie.....	11
2.2.3.Introduction	11
2.2.4. Méthodologie	11
3. Régions étudiées.....	14
3.1. ZAF 24 – Prince George	15
3.2. ZAF 30 – Fraser.....	15
3.3. ZAF 44 – Pacifique	16
4. Comparaison des résultats des estimations des modèles	17
4.1. Émissions totales	17
4.2. Combustion de la biomasse	18
4.3. Sort possible des résidus de coupe.....	19
4.4. Combustion fossile	19
5. Discussion.....	20
5.1. Émissions totales	20
5.2. Combustion de la biomasse	20
5.3. Sort des résidus de coupe	20
5.4. Combustibles fossiles	21
5.5. Objectifs des modèles	21
5.6. Incidence sur les politiques	21
6. Bibliographie	23
7. Annexes	24
A.1. Paramètres des modèles	24
A.2. Modèle GES bioénergie et émissions provenant de la combustion de la biomasse.....	25

1. Contexte

Le Canada s'est joint à plus de 120 pays qui se sont engagés à atteindre la carboneutralité d'ici 2050 (Gouvernement du Canada, 2022). D'importantes réductions d'émissions peuvent être réalisées par l'utilisation d'énergie renouvelable pour substituer les combustibles fossiles. À titre d'exemple, notons l'utilisation de la biomasse forestière comme source de bioénergie, telle que décrite dans le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (ECCC, 2016). L'utilisation de la bioénergie comme moyen potentiel de réduire les émissions s'annonce prometteuse, et elle doit être quantifiée par l'application de modèles qui examinent les différentes sources de biomasse forestière, ainsi que la substitution des combustibles fossiles. De plus, les modèles doivent simuler des scénarios réalistes qui tiennent compte des conditions locales de la forêt et de l'industrie par rapport à un scénario de référence pour les combustibles fossiles.

Les idées fausses sur les bénéfices de la bioénergie en matière de carbone atmosphérique sont liées à la perception de la carboneutralité immédiate de la bioénergie. L'hypothèse selon laquelle le carbone libéré lors de la combustion n'a pas un effet additif sur les concentrations atmosphériques de GES ignore le temps nécessaire pour atteindre les stocks de carbone forestier initiaux, avant récolte de biomasse pour la bioénergie (Ter-Mikaelian et coll., 2014; Cowie et coll., 2021). On devrait plutôt déterminer la faisabilité de la bioénergie en fonction du temps nécessaire pour atteindre la parité de séquestration du carbone et des bénéfices de substitution de la combustion fossile évitée. Le temps nécessaire pour atteindre la parité de séquestration du carbone estime le délai avant que les bénéfices en matière de GES ne soient réalisés dans le cadre de scénarios d'utilisation de la bioénergie (Ter-Mikaelian et coll., 2014; Laganière et coll., 2017). De façon générale, la combustion de la biomasse entraîne une période initiale de dette en carbone, période où il existe des émissions nettes dans l'atmosphère (Laganière et coll., 2017). Une fois la parité de carbone atteinte, une période de bénéfices en matière de carbone se produit et la combustion de la biomasse forestière résulte en la séquestration nette du carbone dans l'atmosphère. Les bénéfices de substitution permettent de quantifier les réductions d'émissions de GES liées à l'utilisation de la bioénergie à la place de la combustion fossile (Smyth et coll., 2017). Afin d'orienter

des stratégies de mise en œuvre judicieuses, il incombe de combiner ces deux indicateurs pour quantifier l'ampleur et le temps nécessaire avant l'apparition de bénéfices en matière de GES atmosphériques grâce à la bioénergie, et ce, par rapport à un scénario de référence pour les combustibles fossiles.

Le choix des sources de biomasse forestière et l'échelle spatiale de l'évaluation sont d'importants facteurs ayant une incidence sur l'apparition de bénéfices en matière de GES atmosphériques grâce à la bioénergie. La bioénergie peut être produite en utilisant différentes sources de biomasse – comme les résidus de coupe et les troncs provenant de la coupe de récupération ou de la coupe d'arbres sur pied –, lesquelles influent sur le bilan des GES. Les résidus de coupe offrent une utilisation judicieuse de biomasse souvent sous-utilisée. Selon la localité, ces résidus sont généralement laissés sur place pour se décomposer ou empilés et brûlés (Ter-Mikaelian et coll., 2014). L'échelle d'évaluation désigne l'utilisation d'une évaluation à l'échelle du paysage ou du peuplement servant à quantifier l'incidence de la mise en œuvre de la bioénergie. Alors que les évaluations à l'échelle du peuplement fournissent des évaluations détaillées sur la dynamique du carbone à l'échelle locale, les évaluations à l'échelle du paysage fournissent une représentation de la dynamique du carbone forestier dans une zone forestière donnée (Cowie et coll., 2021). Les évaluations à l'échelle du paysage permettent de déterminer l'incidence des stratégies d'aménagement forestier sur les stocks et les flux de carbone dans la zone forestière, en plus de contribuer à la prise de décisions politiques à l'échelle nationale (Cowie et coll., 2021).

Les différents modèles de bioénergie intègrent ces complexités de façon distincte et ils ont de différentes méthodologies et données d'entrée. La quantification de ces différences et l'exploration de la manière dont les méthodologies se distinguent permettront d'éclairer les modèles futurs, et ce, pour créer une perspective plus solide sur la faisabilité de la mise en œuvre de la bioénergie par rapport aux objectifs du Canada en matière d'émissions.

Le Modèle générique du bilan du carbone (MGBC) [ainsi que les modèles connexes dans le cadre d'atténuation] et le Modèle GES bioénergie sont deux modèles

mis au point par le Service canadien des forêts (SCF) qui permettent d'estimer les réductions d'émissions liées à la mise en œuvre de la bioénergie par rapport à un scénario de référence pour les combustibles fossiles, et en fonction de conditions locales variées. Ces approches ont été élaborées afin d'évaluer différents aspects du cycle d'émissions provenant de la bioénergie et, par conséquent, elles répondent à des questions différentes. L'objectif du présent rapport est de déterminer les éléments communs et les différences entre la méthodologie et les résultats émanant des deux cadres basés sur les émissions. Cela est accompli par le biais de scénarios communs de mise en œuvre de la bioénergie dans trois régions stratégiques de la Colombie-Britannique.

La réalisation de cette comparaison permettra de quantifier les différences entre les estimations des modèles en ce qui concerne les réductions d'émissions liées à la bioénergie, et elle mettra en évidence les sources de variation entre les modèles. L'objectif est de promouvoir une collaboration plus étroite qui permettra d'améliorer les estimations des modèles et d'accroître la confiance dans nos conclusions en vue d'une meilleure mise en œuvre de l'utilisation de la bioénergie à grande échelle.

2. Contexte des modèles

Les deux cadres de modèles complémentaires ont été élaborés de façon similaire à une approche de cycle de vie, qui évalue les émissions de GES liées à toutes les phases du scénario faisant l'objet d'une analyse – de la collecte initiale jusqu'à l'utilisation finale – à une échelle qui convient à une telle analyse (Ter-Mikaelian et coll., 2014). Le potentiel d'atténuation des GES lié à la mise en œuvre de la bioénergie est évalué par rapport à un scénario contrefactuel et prédéfini, selon lequel l'utilisation des combustibles fossiles dans une région donnée se poursuit à l'avenir.

2.1. Cadre du potentiel d'atténuation du MBC

2.1.1. Introduction

Le cadre du potentiel d'atténuation du Modèle du bilan du carbone (MBC) consiste en trois modèles qui s'appuient les uns sur les autres pour estimer le potentiel d'atténuation des GES dans le contexte du scénario d'essai. Le cadre comprend les modèles suivants : le Modèle générique du bilan du carbone (MGBC), un modèle pour les produits ligneux récoltés (PLR) qui sert à faire le suivi des émissions du bois récolté issues des produits ligneux et de la bioénergie, et un modèle de programmation linéaire (PL) qui sert à quantifier les bénéfices de substitution de la combustion fossile évitée.

Le MGBC s'appuie sur un modèle bien établi, à savoir, le MBC SFC3. Ce dernier est une composante clé du Système national de surveillance, de comptabilisation et production de rapports concernant le carbone des forêts (SNSCPRCF) qui a été élaboré pour divers utilisateurs et diverses utilisations (Kurz et coll., 2009). Ce modèle empirique fondé sur des données de rendement simule les changements et les transferts des stocks de carbone forestier au fil du temps, et ce, en fonction de divers événements de perturbation et de différents scénarios de gestion de la biomasse forestière (Kurz et coll., 2009). Cela se fait par le suivi de multiples réservoirs de carbone (vivants et morts) et de flux de carbone depuis et vers l'atmosphère. Les données d'entrée se composent d'une variété de mesures vérifiables prises sur le terrain lors d'inventaire de peuplements forestiers, de tableaux

de rendement de la biomasse, de taux de récolte et d'informations sur les perturbations. Le MGBC repose sur la plateforme ouverte FLINT (*Full Lands Integration Tool*), mise au point et maintenue par la communauté de moja global (<http://moja.global>) [en anglais seulement]. Le MGBC repose actuellement sur la même structure, les mêmes équations, la même logique et les mêmes hypothèses par défaut que le MBC SFC3 (Kurz et coll., 2009), mais dans un environnement de modélisation spatialement explicite.

Le cadre intégré comprend les bénéfices de substitution liés au secteur forestier, y compris l'utilisation de la biomasse forestière et de produits forestiers à la place d'options actuelles à fortes émissions (p. ex., Smyth et coll., 2020). L'une des motivations de cette analyse comparative sur la biomasse forestière était d'évaluer la mesure dans laquelle les émissions de GES évitées pouvaient être maximisées en fonction de scénarios de bioénergie différenciés selon les régions. Un environnement de modélisation intégré qui relie le MGBC et une optimisation par programmation linéaire (PL) a permis d'estimer le bénéfice lié à l'utilisation de la bioénergie pour substituer les combustibles fossiles actuels dans 46 zones d'approvisionnement forestier (ZAF) en Colombie-Britannique. Les ZAF sont des régions spatiales désignées à travers la Colombie-Britannique qui intègrent les conditions locales relatives au bois et les pratiques de gestion des ressources pour estimer la possibilité annuelle de coupe (Gouvernement de la Colombie-Britannique, 2023).

2.1.2. Méthodologie

Les trois modèles répondent à des objectifs méthodologiques distincts et s'appuient les uns sur les autres pour évaluer le potentiel de la bioénergie en matière d'atténuation des GES dans une région donnée, comme le résume la figure 1.

Le MGBC et le MBC SFC3 résument la dynamique du carbone de 21 réservoirs de carbone pour les paysages forestiers. Sur le plan des réservoirs, 10 sont des réservoirs de biomasse vivante (y compris les tiges marchandes, le feuillage, les racines grossières, les racines fines et les produits non marchands comme les branches) et 11 sont des réservoirs de matière organique morte

(MOM) [y compris les chicots, les branches et les horizons minéraux du sol]. Chaque réservoir varie dans ses taux de décomposition (Kurz et coll., 2009). Pour chaque activité de récolte, le carbone transféré a été décrit au moyen d'une matrice de perturbation qui quantifie les flux de carbone entre les réservoirs et le secteur forestier, ainsi que les flux vers l'atmosphère (Kurz et coll., 2009). La collecte des résidus de coupe a été définie au moyen d'une matrice de perturbation afin d'utiliser une partie de « l'autre » réservoir (branches, gaules, cimes et souches), une partie des arbres de taille marchande non utilisés et une partie des arbres morts sur pied (chicots) [Smyth et coll., 2020].

Le modèle de PL a permis de déterminer les émissions évitées à l'échelle régionale. En ce qui concerne les données d'entrée, le modèle utilise les résidus de coupe, la demande régionale en énergie, ainsi que les sources existantes de carburant et leurs intensités d'émissions pour la production d'électricité et de chaleur (Smyth et coll., 2017). Le modèle comprenait la sélection de

neuf installations de bioénergie candidates, lesquelles ont été choisies afin de maximiser les émissions fossiles évitées dans chaque région. Ces installations servent de descripteurs généralisés basés sur des données d'installations décrites dans la littérature (Smyth et coll., 2017). La sélection des installations à l'échelle régionale était limitée par la disponibilité en biomasse et la demande locale en chaleur, avec toute biomasse excédentaire étant utilisée pour la production d'électricité (Smyth et coll., 2020). Compte tenu de ces exigences, le modèle d'optimisation a déterminé le type d'installation (chaleur, électricité, cogénération), la taille (petite, moyenne, grande) et le nombre d'installations de bioénergie nécessaires dans chaque ZAF pour atteindre le maximum d'émissions fossiles évitées.

Les installations optimisées choisies ont fourni les données d'entrée pour les scénarios d'essai des ZAF, dont les émissions sont comparées entre les modèles.

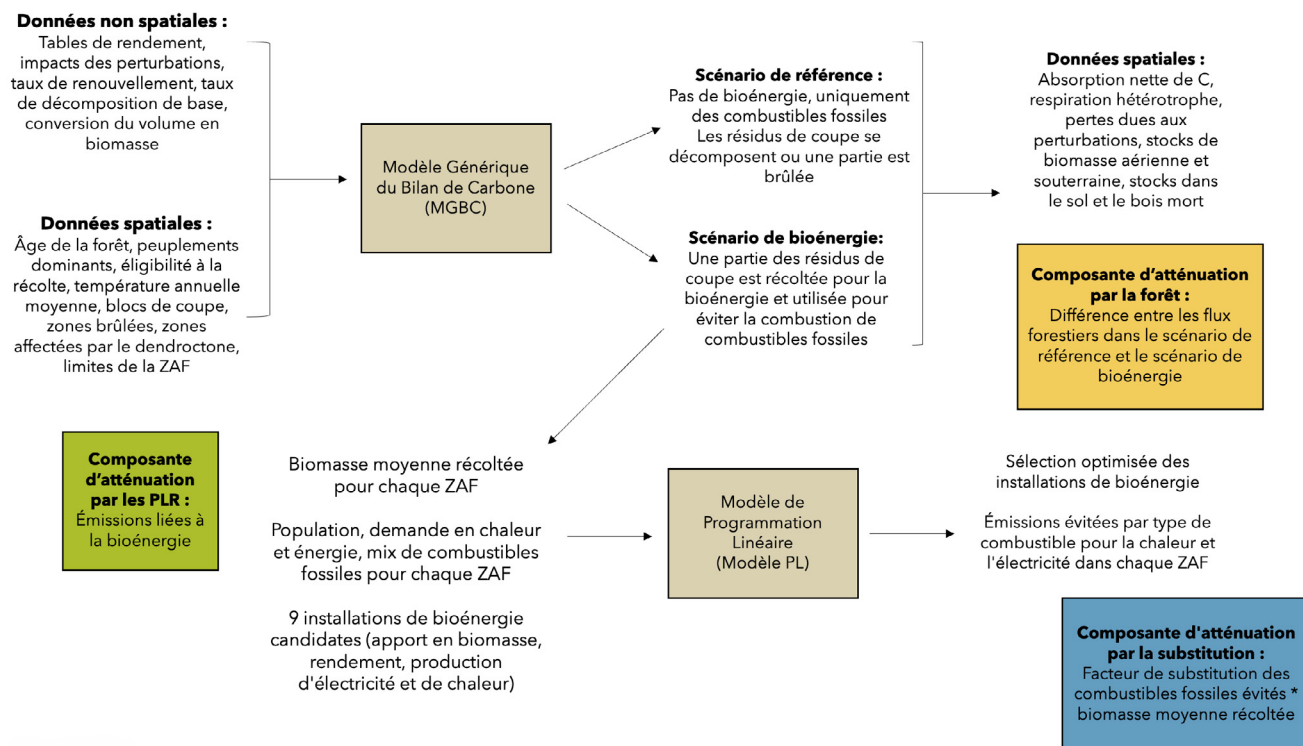


Figure 1 : Cadre conceptuel du cadre du potentiel d'atténuation du MBC

Tableau 1 : Descriptions des neuf installations de bioénergie

Type d'installation	Description de l'installation	Demande en biomasse (milliers de tonnes anhydres/année)	Taux de conversion à l'électricité (MWh/tonne anhydre)	Taux de conversion thermique (GJ/tonne anhydre)
Chaleur	Chaudière de 0,4 MWth pour chauffage urbain	0,782	-	75
	Chaudière de 2,3 MWth pour chauffage urbain	3,97	-	85
	Chaleur industrielle par gaz synthétique de 6,62 MWth	11,58	-	84
Électricité	Turbine à gaz de 0,2 MWé	1,60	1,02	-
	Cycle à générateur de vapeur de 5 MWé	34,97	1,17	-
	Cycle à générateur de vapeur de 10 MWé	63,86	1,28	-
Cogénération	Cycle de Rankine à caloporteur organique de 0,2 Mwé et de 0,98 MWth	2,09	0,78	70
	Turbine à vapeur de 1,8 Mwé et de 4,5 MWth	10,58	1,39	54
	Cogénération par turbine à vapeur de 8 Mwé	46,87	1,39	29

2.2. Modèle GES bioénergie

2.2.3. Introduction

Le Modèle GES bioénergie est un outil informatique mis au point pour évaluer le temps nécessaire avant la réduction des émissions de GES, ainsi que l'incertitude liée à la réduction de celles-ci lorsque la bioénergie est utilisée pour substituer les sources actuelles de combustibles fossiles (Laganière et coll., 2017). Le modèle permet de déployer des scénarios de bioénergie individualisés qui ont des variables de modélisation uniques en ce qui concerne la dynamique du carbone forestier, la chaîne d'approvisionnement et le déploiement du scénario de bioénergie futur et des scénarios actuels de combustibles fossiles. L'objectif du modèle est de fournir un système commun de comptabilisation du potentiel d'atténuation des GES lié à différents scénarios de bioénergie. Cela permettra de fournir des directives générales sur les sources de biomasse, les combustibles fossiles substitués et les localités susceptibles de fournir les meilleurs moyens d'atténuation des GES liés à la bioénergie, tout en soulignant l'incertitude associée aux estimations des émissions par l'inclusion d'une période d'incertitude (Laganière et coll., 2017).

Les assises du modèle ont été adaptées et améliorées par le biais de l'élaboration du progiciel R GES bioénergie (*Bioenergy GHG R-Package*) disponible depuis le réseau CRAN (*Comprehensive R Archive Network*) [Roussel et coll. 2019]. Ce progiciel permet une plus grande souplesse et plus de nuances dans l'élaboration de scénarios par l'utilisateur, permettant ainsi la modélisation de scénarios plus robustes et réalistes servant à évaluer le potentiel d'atténuation du carbone à travers une région donnée. Cette extension permet à l'utilisateur de personnaliser pleinement les processus carbone sous-jacents qui contribuent à un scénario, y compris la modification de facteurs d'efficacité, le calcul flexible des caractéristiques d'absorption du carbone par les peuplements, et la capacité de combiner plusieurs combustibles fossiles substitués et utilisations de l'énergie en même temps.

2.2.4. Méthodologie

Le modèle GES bioénergie calcule le potentiel d'atténuation des GES d'un scénario de bioénergie par rapport à un scénario contrefactuel, et ce, au moyen d'une équation générale dont on peut se servir pour tous les scénarios. Le potentiel d'atténuation des GES est calculé selon l'équation suivante :

$$\Delta GES_t = \left(\frac{GES_{t\ BIO} + CF_{t\ BIO}}{EC_{BIO}} \right) - \left(\frac{GES_{t\ FOSSILE} + CF_{t\ FOSSILE}}{EC_{FOSSILE}} \right)$$

Équation 1 : Équation du Modèle GES bioénergie permettant de calculer le potentiel d'atténuation des GES

En ce qui concerne l'équation susmentionnée, ΔGES_t désigne la différence cumulée des émissions de CO_2 eq entre les scénarios de bioénergie et fossile à un temps précis t (kg CO_2 /GJ). $GES_{t\ BIO}$ et $GES_{t\ FOSSILE}$ désignent les émissions cumulées liées à la collecte, à la transformation, au transport et à la combustion de la bioénergie ou de la source de combustible fossile au cours de l'intervalle de temps (Laganière et coll., 2017). $CF_{t\ BIO}$ et $CF_{t\ FOSSILE}$ désignent l'état du carbone forestier des scénarios de bioénergie et fossile à un temps précis t . Les résidus de coupe sont définis par le modèle comme tous les débris

ligneux générés lors des activités de récolte, y compris les branches, les cimes et l'écorce. Le taux de décomposition des résidus de coupe est déterminé par un choix parmi les neuf réservoirs de MOM modélisés, comme c'est le cas avec le MBC SFC3 (Roussel et coll., 2019). EC_{BIO} et $EC_{FOSSILE}$ désignent les efficacités de conversion énergétique des deux scénarios. Lorsque ΔGES_t est égal à zéro, la parité de carbone a été atteinte et les bénéfices d'atténuation des GES commencent à se produire.

ΔGES_t est calculé au moyen d'une hiérarchie d'éléments constitutifs qui s'appuient les uns sur les autres pour produire les scénarios de bioénergie et fossile distincts, dont leurs émissions de GES font l'objet d'une comparaison. La hiérarchie, telle que décrite dans la figure 2, est la suivante : Processus / Scénario / Delta / Système.

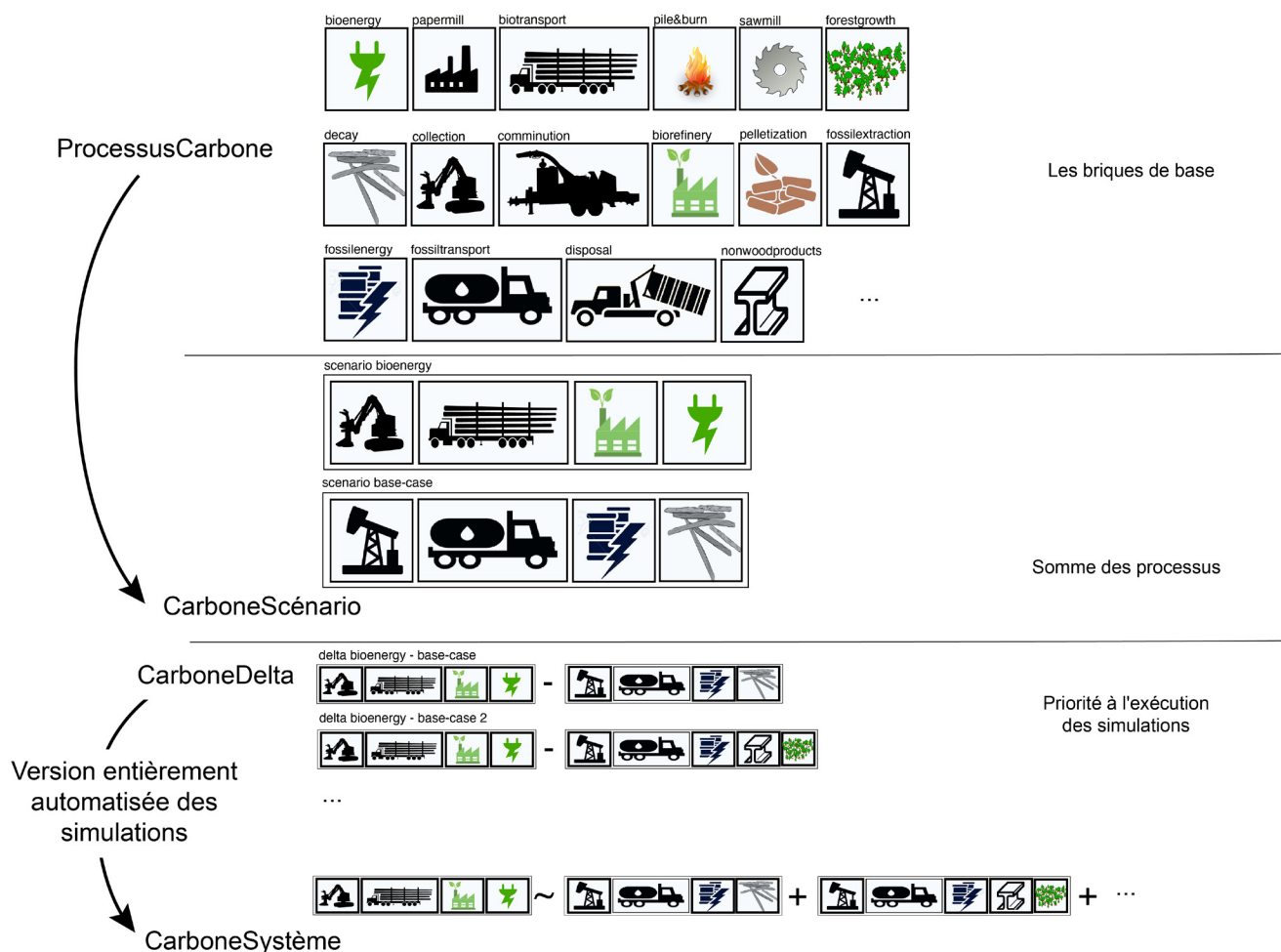


Figure 2 : Cadre conceptuel du Modèle GES bioénergie

Un Processus est l'élément constitutif de base du modèle, qui quantifie les émissions de GES d'un processus biologique ou industriel en fonction du temps (Roussel et coll., 2019). Par définition, les processus sont ouverts et des processus distincts sont quantifiés et mis en œuvre différemment selon l'application de l'utilisateur. Un ensemble de processus qui simulent une réalité théorique donnée constitue un Scénario. Dans le cadre du présent rapport, les processus quantifiés pour chaque région étudiée se combineront pour en créer les scénarios distincts, à savoir le scénario de bioénergie

et le scénario fossile contrefactuel. Delta désigne la différence entre les émissions de GES provenant des scénarios de bioénergie et fossile définis, comme décrit par l'équation 1. Un Système quantifie le temps nécessaire pour atteindre la parité de carbone, ainsi que l'incertitude inhérente à l'exécution des modèles en combinant plusieurs objets delta. Cela permet l'exécution de différentes simulations dans le cadre du même scénario d'essai.

3. Régions étudiées

Afin de rendre comparables les résultats des deux modèles, les hypothèses et les données d'entrée ont été rendues aussi similaires que possible. Grâce à une sélection stratégique des régions étudiées (Figure 3), les scénarios examinés par les modèles peuvent fournir une analyse réaliste de l'implantation en ce qui concerne la faisabilité de la bioénergie au sein des régions, en plus de l'analyse comparative des modèles.

Les scénarios des modèles se fondaient sur les ZAF de la Colombie-Britannique, car la province dispose d'un inventaire forestier spatialement explicite et accessible au public (ministère des Forêts, des Terres, de l'Exploitation des ressources naturelles et du Développement rural de la Colombie-Britannique [MFTERNDR] par le biais de l'Inventaire des ressources végétales [IRV] de 2015). Elle dispose en outre de données régionales sur la consommation d'énergie, ainsi que de récents résultats de modélisation disponibles à des fins de comparaison (Smyth et coll., 2020). En limitant l'analyse à ces ZAF, on a réduit l'incertitude des modèles en tenant compte des conditions forestières locales et de la demande en énergie afin de mieux comprendre la mise en œuvre potentielle de la bioénergie. La diversité des conditions en Colombie-Britannique a permis une sélection stratégique des scénarios de modélisation afin d'évaluer les impacts d'une variété d'hypothèses sur la réduction d'émissions liée à la bioénergie.

Afin d'estimer la demande locale en énergie, on a utilisé l'Inventaire communautaire de l'énergie et des émissions, lequel fournit les émissions issues des carburants des consommateurs résidentiels, commerciaux et industriels de petite ou de moyenne taille dans l'ensemble de la Colombie-Britannique (BC MOECCS 2015, 2016). Les types de carburants issus des communautés industrielles ont été attribués en fonction des proportions locales d'émissions de méthane et d'oxyde nitreux (Smyth et coll., 2020). On a présumé qu'un tiers de la consommation d'énergie était attribuée à l'électricité, et deux tiers à la chaleur. La consommation d'énergie de la communauté géoréférencée a été superposée aux limites des ZAF pour déterminer la demande en énergie propre aux ZAF. Le choix des sources de biomasse forestière pour la production de bioénergie a été limité à l'utilisation des résidus de coupe.

Les scénarios des modèles ont été exécutés selon des intervalles de 50 ans, soit un intervalle approprié à la réalisation de bénéfices atmosphériques à long terme par rapport aux objectifs du Canada en matière de réduction des émissions. Le temps nécessaire pour atteindre la parité de séquestration du carbone a été indiqué pour chaque scénario.

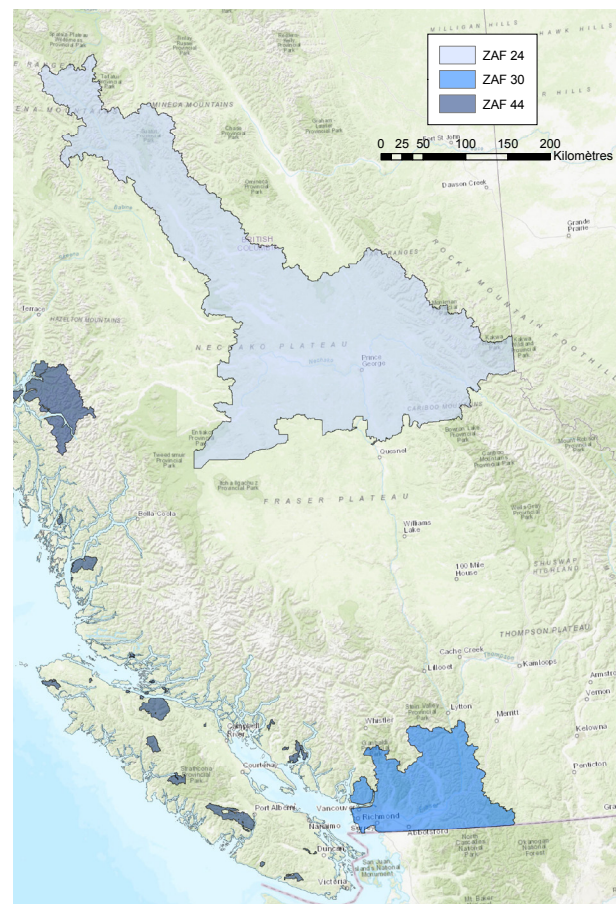


Figure 3 : Les trois régions (ZAF) étudiées

3.1. ZAF 24 – Prince George

La ZAF 24 est située dans la partie intérieure nord de la Colombie-Britannique, laquelle englobe la ville de Prince George et s'étend sur une superficie de 7 966 milliers d'hectares (Figure 4). On prévoyait que la ZAF 24 produirait 654,4 milliers de tonnes anhydres de biomasse, et qu'elle aurait une demande moyenne en électricité de 1,50 TWh et en chaleur de 2,99 TWh, compte tenu de sa population modeste de 103 000 habitants.

La configuration optimisée des installations pour la ZAF 24, telle que déterminée par le modèle de PL, se compose de 60 installations de cogénération de taille moyenne et 5 installations de chaleur de taille moyenne. La production de biochaleur dans la région a permis d'éviter la production de chaleur à partir d'électricité à faibles émissions ou de la combustion de gaz naturel et de mazout. De façon similaire, la production de bioélectricité a permis d'éviter la production d'hydroélectricité à faibles émissions. Grâce à ces installations, la ZAF de Prince George pourrait couvrir la plus grande partie de sa demande en chaleur et près de 60 % de la demande en électricité. Si l'on n'utilisait pas les résidus de coupe pour la production de bioénergie, on les empilerait et brûlerait sur place pour réduire le risque d'incendie de forêt ou on les laisserait se décomposer.

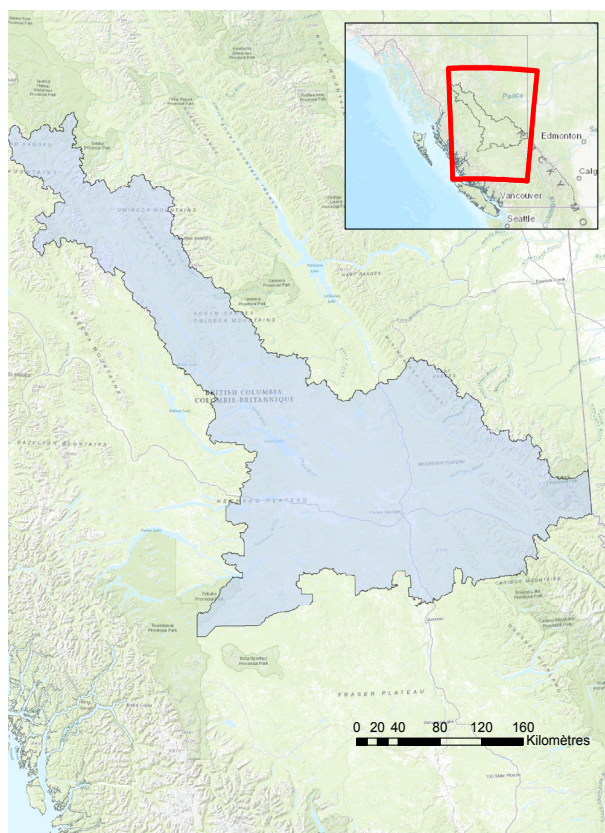


Figure 4 : ZAF 24 – Prince George

3.2. ZAF 30 – Fraser

La ZAF 30 est située le long de la côte et de la frontière méridionale de la Colombie-Britannique, laquelle englobe les basses-terres continentales et s'étend sur une superficie de 1 540 milliers d'hectares (Figure 5). La ZAF de Fraser compte une population importante d'au-delà de 2,6 millions d'habitants. Pourtant, elle produit une quantité modeste de 102 milliers de tonnes anhydres de biomasse. Compte tenu de sa population importante, la ZAF de Fraser a une forte demande en électricité (38 TWh) et en chaleur (76 TWh).

Afin d'optimiser les émissions évitées, le modèle de PL a proposé 3 grandes installations de biochaleur et 17 de taille moyenne. La production de biochaleur permettra d'éviter la combustion de mazout à l'échelle locale. La chaleur produite par ces installations ne couvrirait qu'un faible pourcentage de la demande élevée. Lorsque la récolte de biomasse n'est pas effectuée à des fins de bioénergie, la biomasse est laissée sur place pour se décomposer.

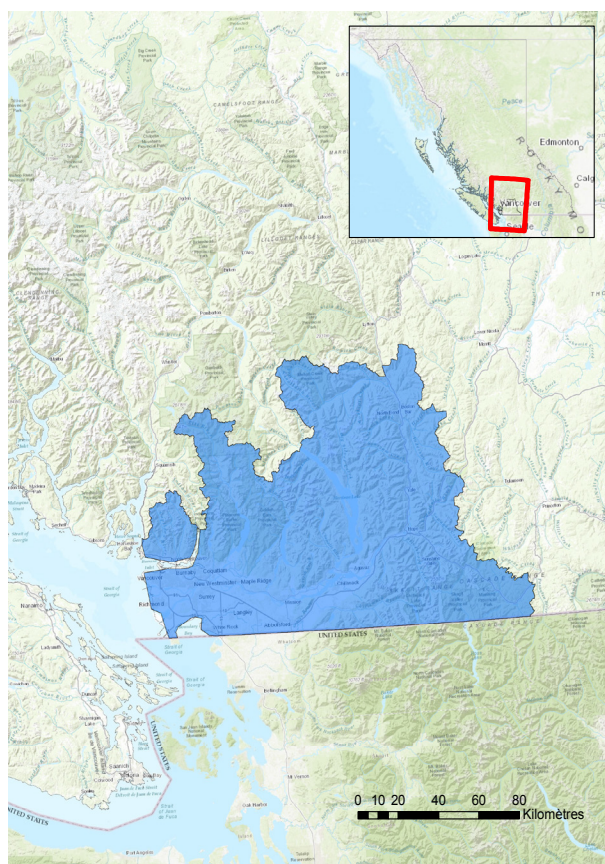


Figure 5 : ZAF 30 – Fraser

3.3. ZAF 44 – Pacifique

La ZAF 44 est située dans l'ensemble de l'île de Vancouver et le long de la côte méridionale de la Colombie-Britannique, et elle s'étend sur une superficie de 663 milliers d'hectares (Figure 6). La ZAF 44 englobe des localités très éloignées ayant une faible population de 68 habitants. En ce qui concerne la production de biomasse, elle est une productrice modeste à faible, avec 74 milliers de tonnes anhydres produites à l'échelle locale. Compte tenu de son éloignement, la ZAF du Pacifique a une faible demande en électricité (984 MWh) et en chaleur (1 970 MWh).

Quant à la sélection des installations dans la région visant à maximiser les émissions évitées, le modèle de PL a proposé 1 grande installation de bioélectricité et 6 petites. Ces installations produiraient assez d'électricité pour dépasser la demande à l'échelle locale et, par conséquent, il faudrait en exporter. Les installations de bioélectricité permettront d'éviter le réseau de distribution d'hydroélectricité à faibles émissions actuellement en usage. Si l'on n'utilisait pas les résidus de coupe à des fins de bioénergie, on les laisserait sur place pour se décomposer.



Figure 6 : ZAF 44 – Pacifique

4. Comparaison des résultats des estimations des modèles

Les variables des émissions faisant l'objet d'une comparaison entre les deux modèles pour chaque ZAF sont les suivantes : 1) les émissions liées à la combustion de la biomasse pour la production de bioénergie; 2) les émissions liées au sort des résidus de coupe lorsqu'ils ne sont pas utilisés pour la production de bioénergie (brûlage des piles ou décomposition); 3) les émissions liées à la combustion fossile évitée. On a choisi ces variables, car les deux modèles les définissent de manière comparable et ils s'appuient sur des données et des réservoirs de carbone similaires. En outre, ces variables représentent d'importantes sources d'émissions au sein du système bioénergétique et, par conséquent, il est important de les comparer.

Afin de rendre les variables des émissions comparables entre les modèles, ceux-ci ont été élaborés de façon à avoir des paramètres similaires pour que des comparaisons efficaces puissent être effectuées. Les efficacités utilisées par le modèle de GES bioénergie liées à la combustion de biomasse et à la combustion fossile, ainsi que les efficacités correspondant à la décomposition des résidus de coupe, ont été tirées du cadre du MBC. Lorsque des efficacités ne pouvaient être repérées dans le cadre du MBC, le Modèle GES bioénergie a eu recours aux données existantes provenant de la littérature. En ce qui concerne le sort possible des résidus de coupe, le cadre du MBC suppose toujours qu'une partie sera empilée et brûlée, quelle que soit la région. Ce même paramètre a été mis en œuvre dans le cadre du Modèle GES bioénergie pour les ZAF 30 et 44. Le Modèle GES bioénergie ne démontre une souplesse qu'en ce qui concerne la représentation proportionnelle du sort possible des résidus de coupe; il ne démontre aucune souplesse en ce qui concerne l'échelle temporelle, comme c'est le cas dans le cadre du MBC. Enfin, les données de sortie du cadre du MBC en matière d'émissions (fournies en MgCO_2) ont été mises à jour en MgCO_2/GJ d'énergie produite dans la ZAF afin de les rendre conformes aux données de sorties du Modèle GES bioénergie. La plupart des modifications apportées aux modèles pour coordonner leurs paramètres ont été apportées au modèle de GES bioénergie en raison de sa souplesse informatique. Une telle souplesse permet à l'utilisateur de modifier les processus et de les mettre à jour avec aisance.

4.1. Émissions totales

Les émissions totales liées au scénario de bioénergie (combustion de la biomasse) et au scénario de référence (sort des résidus de coupe et utilisation de combustibles fossiles) ont fait l'objet d'une comparaison par le biais du calcul de la différence entre les deux scénarios, soit les émissions de bioénergie moins les émissions de référence. Les émissions nettes cumulées permettent d'estimer le temps nécessaire pour atteindre la parité de carbone dans les ZAF. Des émissions nettes négatives indiquent un bénéfice en carbone lié à la mise en œuvre de la bioénergie dans la ZAF, tandis que des émissions nettes positives indiquent une dette en carbone.

Les résultats de notre analyse comparative montrent que les différences entre les émissions cumulées des modèles en 2070 sont régulièrement faibles dans l'ensemble des ZAF. À ce titre, le cadre du MBC a estimé 31 % ($1,67 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$) d'émissions négatives de plus que le Modèle GES bioénergie dans la ZAF 24 ($-3,49 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$ par rapport à $-1,82 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$); 13 % ($1,18 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$) d'émissions négatives en moins que le Modèle GES bioénergie dans la ZAF 30 ($3,66 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$ par rapport à $4,84 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$); et 9 % ($1,16 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$) d'émissions positives en moins que le Modèle GES bioénergie dans la ZAF 44 ($5,58 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$ par rapport à $6,74 \text{ MgCO}_2/\text{GJ}$) [Figure 7]. Les deux modèles montrent des bénéfices immédiats en carbone dans le cas des ZAF 24 et 30, ou ils n'atteignent jamais la parité de carbone, comme c'est le cas dans la ZAF 44. Dans le cadre du MBC, l'estimation des émissions de la ZAF 44 présente des fluctuations annuelles, avec des émissions plus importantes au cours de la période de 2045 à 2055, période où de plus importantes quantités de résidus ont été recueillies, ce qui reflète un changement dans le calendrier de récolte.

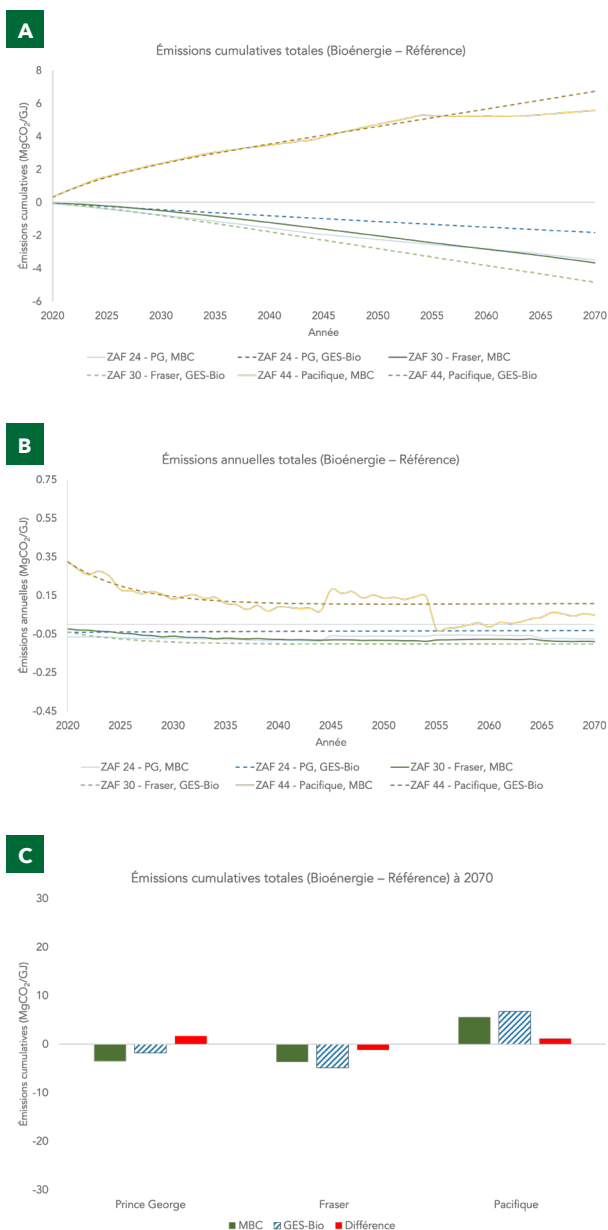


Figure 7 : Série chronologique des émissions cumulées (A) et des émissions totales annuelles (B) liées à la ZAF, calculées selon la formule « émissions de bioénergie moins les émissions de référence. » Émissions cumulées en 2070 (C). La différence est calculée selon la formule « Modèle GES bioénergie moins le cadre du MBC. » Des émissions négatives indiquent un bénéfice en carbone lié à la bioénergie dans la ZAF et des émissions positives indiquent une dette en carbone.

4.2. Combustion de la biomasse

Les deux modèles s'accordent largement sur les émissions liées à la combustion de la biomasse. À ce titre, le Modèle GES bioénergie comptait 23 % (3,33 MgCO₂/GJ) d'émissions cumulées de plus en 2070 que le cadre du MBC dans la ZAF 24 (8,11 MgCO₂/GJ par rapport à 5,35 MgCO₂/GJ); 12 % de plus (1,59 MgCO₂/GJ) dans la ZAF 30 (7,12 MgCO₂/GJ par rapport à 5,53 MgCO₂/GJ); et 11 % de plus (5,38 MgCO₂/GJ) dans la

ZAF 44 (26,29 MgCO₂/GJ par rapport à 20,91 MgCO₂/GJ) [Figure 8]. Le Modèle GES bioénergie comprend les émissions liées à la collecte, au transport, à la transformation et à la décomposition de la biomasse, alors qu'il n'est pas possible de les inclure dans le cadre du MBC. Ces processus représentent jusqu'à 6 % des estimations du Modèle GES bioénergie concernant la combustion de la biomasse. Lorsque ces processus sont exclus, les estimations des émissions cumulées du Modèle GES bioénergie ont diminué de 1 % par rapport aux estimations du cadre du MBC (22 %, 11 % et 10 % pour chaque ZAF).

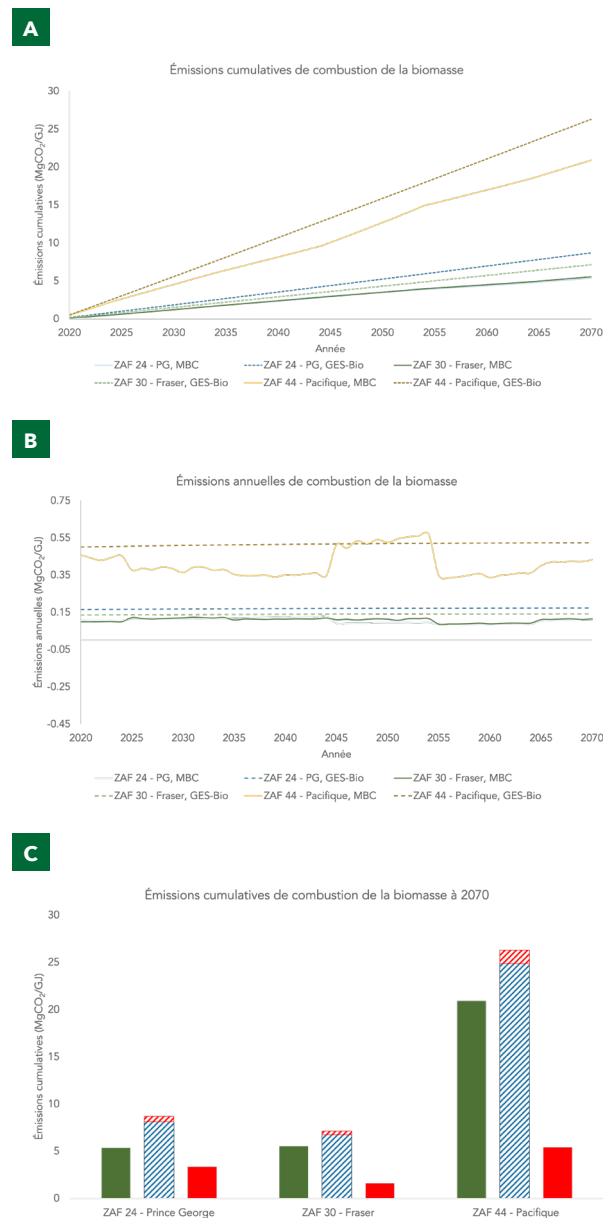


Figure 8 : Série chronologique des émissions cumulées (A) et annuelles (B) liées à la combustion de la biomasse dans le cadre du scénario de bioénergie. Émissions cumulées en 2070 (C). La différence est calculée selon la formule « cadre du MBC moins le Modèle GES bioénergie. » GES-Bio Extra comprend les émissions liées à la collecte, au transport, à la transformation et à la décomposition de la biomasse.

4.3. Sort possible des résidus de coupe

Les résultats de l'analyse comparative montrent que les différences entre les modèles en matière d'émissions liées à la décomposition et au brûlage des piles de résidus de coupe sont régulièrement faibles dans l'ensemble des ZAF. Les émissions cumulées en 2070 sont de 8 % (0,98 MgCO₂/GJ) plus élevées dans le Modèle GES bioénergie que dans le cadre du MBC dans la ZAF 24 (-6,60 MgCO₂/GJ par rapport à -5,62 MgCO₂/GJ); 15 % plus élevées (1,52 MgCO₂/GJ) dans la ZAF 30 (-5,56 MgCO₂/GJ par rapport à -4,04 MgCO₂/GJ); et 12 % plus élevées (-4,21 MgCO₂/GJ) dans la ZAF 44 (-19,28 MgCO₂/GJ par rapport à -15,07 MgCO₂/GJ) [Figure 9].

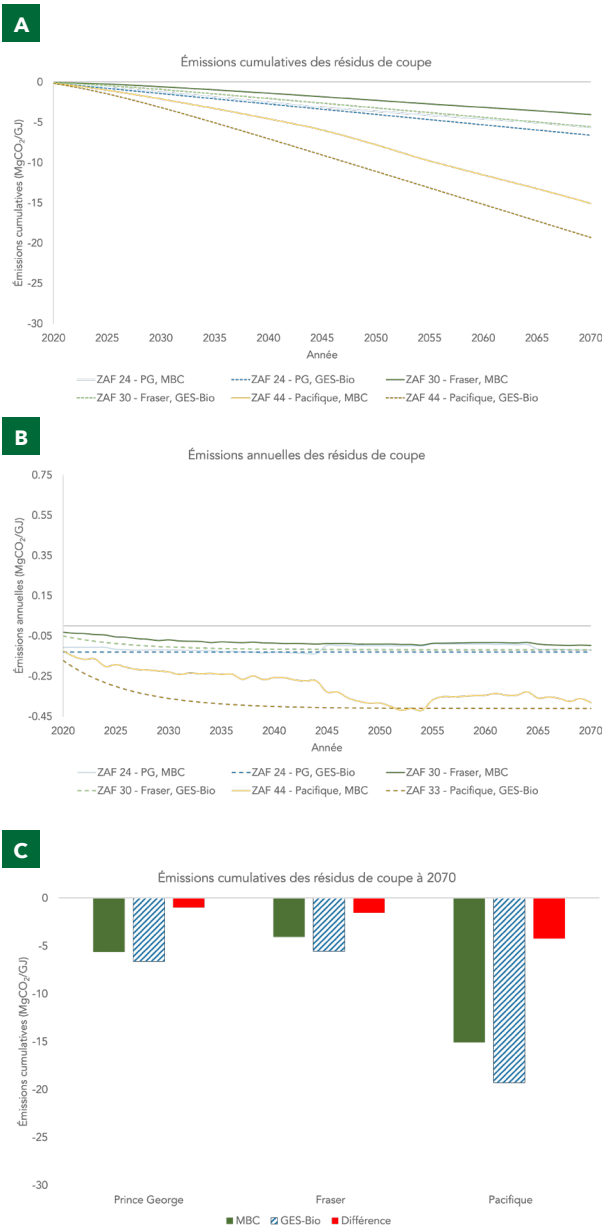


Figure 9 : Série chronologique des émissions cumulées (A) et annuelles (B) liées à la décomposition et au brûlage des résidus de coupe dans le cadre du scénario de référence. Émissions cumulées en 2070 (C). La différence est calculée selon la formule « cadre du MBC moins le Modèle GES bioénergie. »

4.4. Combustion fossile

L'analyse comparative des émissions fossiles montre que la différence entre les estimations des modèles est régulièrement faible, ainsi que la plus faible parmi les trois variables d'émissions comparées. Le Modèle GES bioénergie représente 9 % (-0,67 MgCO₂/GJ) plus d'émissions cumulées en 2070 que le cadre du MBC dans la ZAF 24 (-3,89 MgCO₂/GJ par rapport à 3,22 MgCO₂/GJ); 10 % de plus (1,25 MgCO₂/GJ) dans la ZAF 30 (-6,39 MgCO₂/GJ par rapport à 5,14 MgCO₂/GJ); et 0,4 % de plus (0,002 MgCO₂/GJ) dans la ZAF 44 (-0,26 MgCO₂/GJ par rapport à 0,26 MgCO₂/GJ) [Figure 10].

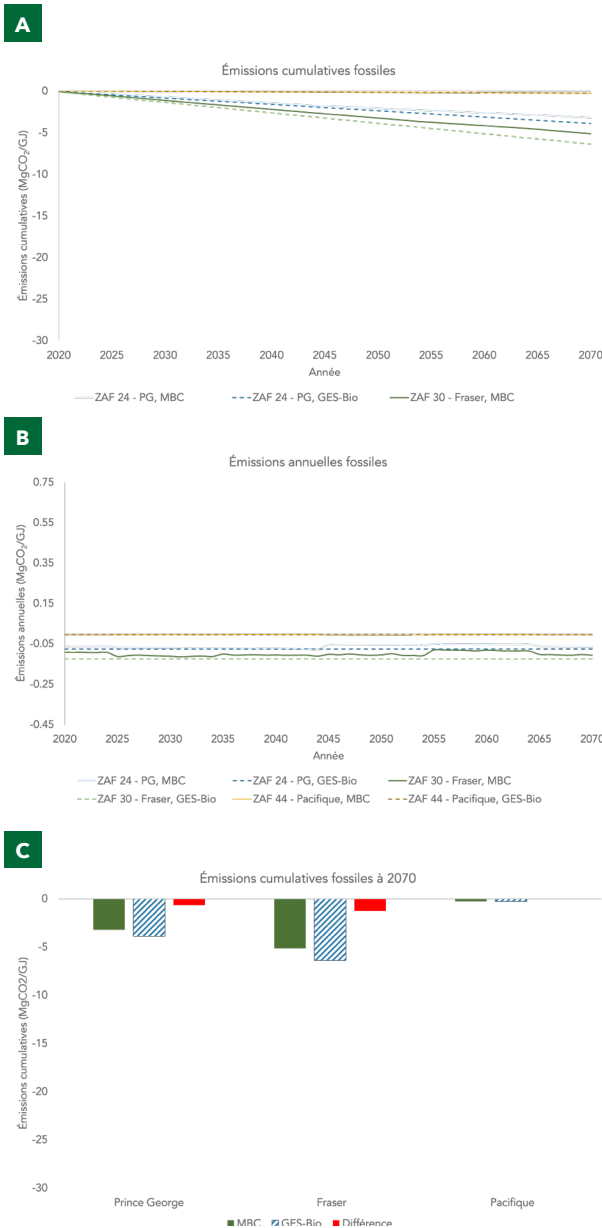


Figure 10 : Série chronologique des émissions cumulées (A) et annuelles (B) liées à l'utilisation continue de combustibles fossiles dans le cadre du scénario de référence. Émissions cumulées en 2070 (C). La différence est calculée selon la formule « cadre du MBC moins le Modèle GES bioénergie. »

5. Discussion

En général, les comparaisons montrent que les modèles s'accordent sur l'estimation des émissions pour toutes les variables et toutes les ZAF, et que les différences sont régulièrement faibles.

5.1. Émissions totales

La normalité du temps nécessaire pour atteindre la parité de carbone et les faibles écarts entre les modèles concernant les émissions totales démontrent le degré de concordance entre leurs méthodes distinctes. Le calcul des émissions totales est susceptible d'additionner les différences associées aux différentes variables et d'entraîner d'importantes différences en ce qui concerne le temps nécessaire pour atteindre la parité de carbone et l'ampleur des émissions, ce qui n'a pas été le cas avec nos comparaisons.

Les fluctuations entre les périodes annuelles de bénéfice et de dette en carbone observées dans les estimations annuelles du cadre du MBC dans la ZAF 44 mettent en évidence les différences dans la manière dont les deux modèles estiment les émissions au fil du temps. Le cadre du MBC prévoit les changements annuels en ce qui concerne le type de biomasse et la quantité récoltée au fil du temps, à mesure que l'état du carbone forestier change à la suite de la récolte et de perturbations naturelles. Cela entraîne des fluctuations annuelles sur la quantité d'émissions. Le Modèle GES bioénergie suppose des émissions annuelles constantes depuis le début de l'intervalle de temps, sans tenir compte de la possibilité de changements annuels en la quantité et le type de biomasse disponible.

5.2. Combustion de la biomasse

Le Modèle GES bioénergie estime constamment de plus importantes émissions liées à la combustion de la biomasse que le cadre du MBC. Cette différence pourrait s'expliquer par la manière dont les deux modèles définissent la variable d'émission. Le Modèle GES bioénergie tient compte des émissions liées à la collecte, au transport, au broyage et à la perte de matière sèche de la biomasse, tandis que le cadre du MBC n'en tient pas compte, contribuant ainsi aux valeurs d'émissions inférieures observées. En effet, le cadre du

MBC les considère comme négligeables par rapport aux émissions sensiblement plus importantes liées à la combustion de la biomasse.

Une autre source de variation entre les modèles se produit par la manière dont le cadre du MBC tient compte des différences dans la quantité de résidus de coupe recueillis sur une base annuelle en fonction de la récolte prévue de peuplements dans une région donnée ayant une variété d'âges, d'essences principales et d'historiques de perturbation. Ces variations annuelles en matière de biomasse ne sont pas prises en compte par le Modèle GES bioénergie, lequel suppose que les conditions initiales de la biomasse en 2020 se maintiennent tout au long de l'intervalle de temps. Cette simplification par le Modèle GES bioénergie, qui suppose que la récolte de la biomasse est stable, pourrait expliquer la raison dont les émissions du modèle sont régulièrement plus importantes que celles du cadre du MBC.

Le facteur d'émissions lié à la combustion de la biomasse est pris en compte de façon distincte par les deux modèles. En ce qui concerne la combustion de la biomasse ligneuse, le Modèle GES bioénergie utilise le facteur d'émissions par défaut présenté dans les Lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Le cadre du MBC suppose que le carbone provenant des résidus de coupe disponibles pour la bioénergie est immédiatement oxydé dans l'atmosphère sous forme de CO₂. Il suppose en outre qu'aucun autre gaz n'a été produit, ni aucune cendre. Cette particularité pourrait peut-être expliquer la différence observée entre les modèles en matière des estimations de la combustion de la biomasse.

5.3. Sort des résidus de coupe

En ce qui concerne la simulation de la décomposition, la méthodologie se distingue entre les deux modèles, ce qui pourrait expliquer les estimations plus importantes observées dans le Modèle GES bioénergie. Le cadre du MBC comprend plusieurs taux de décomposition qui représentent divers types de réservoirs de MOM, ainsi que des taux de brûlage des piles propres à chaque région. Ce peaufinage permet une modélisation très

précise des conditions de décomposition des résidus de coupe lorsqu'ils ne sont pas destinés à la bioénergie, ce qui ne peut pas être reproduit par le Modèle GES bioénergie dans sa forme actuelle. En effet, le Modèle GES bioénergie utilise un taux de décomposition moyen pendant toute la durée de la simulation.

L'évaluation modélisée de la décomposition des résidus de coupe est cohérente avec la différence de complexité des réservoirs de décomposition simulés. En s'appuyant sur les réservoirs de décomposition utilisés auparavant, le MGBC modélise la décomposition où la plupart des émissions sont libérées dans l'atmosphère, mais une partie (environ 17 %) est transférée à la matière organique humifiée du sol, laquelle se décompose très lentement. Étant donné que le Modèle GES bioénergie ne simule pas cette structure sous-jacente carbone-sol, il suppose que les émissions provenant de la décomposition sont libérées dans l'atmosphère. Une telle simplification des processus de décomposition pourrait expliquer les estimations plus élevées générées par le Modèle GES bioénergie.

Grâce à la normalisation des modèles, les deux supposent qu'il y a un certain brûlage des piles et une certaine décomposition des résidus de coupe au sein du scénario de référence, et que la différence entre les deux peut s'attribuer aux pratiques régionales – bien que la comptabilisation du sort des résidus de coupe dans le scénario de bioénergie diffère entre les deux modèles. Le MGBC suppose que différents pourcentages des réservoirs de MOM brûleront selon une matrice de perturbation pour le brûlage des piles.

5.4. Combustibles fossiles

Les émissions fossiles entre les deux modèles ont régulièrement les plus petites différences entre les variables estimées en raison de l'utilisation des mêmes intensités d'émissions fossiles.

5.5. Objectifs des modèles

Les petits écarts sur le plan des estimations des émissions rendent compte des objectifs de chaque modèle en matière de comptabilisation des émissions de GES liées à la bioénergie.

Le MGBC sert à l'analyse comparative des options d'atténuation des changements climatiques et il modélise l'aménagement forestier ainsi que les scénarios d'utilisation du bois, y compris la bioénergie. Le cadre du MGBC commence par comprendre le bilan de carbone de l'écosystème forestier. Ensuite, il

prend en considération les émissions provenant des PLR, la bioénergie et les bénéfices de substitution. Finalement, il cherche à comprendre la manière dont les différents scénarios d'aménagement forestier et d'utilisation du bois modifieraient les émissions nettes au fil du temps. Compte tenu de l'analyse à fine échelle de la structure du carbone forestier, le MGBC permet un peaufinage exact des paramètres du modèle afin de représenter les conditions régionales et de mieux comprendre l'incidence de l'aménagement sur la réduction des émissions.

Le Modèle GES bioénergie est élaboré exclusivement pour comprendre et estimer le potentiel de réduction des émissions liées à la bioénergie. L'analyse du modèle commence à l'échelle du projet, où les profils des émissions sont calculés en fonction des types de processus qui se dérouleront dans la région, par opposition aux types de conditions de la biomasse qui sont prises en compte à l'échelle régionale. L'accent mis sur les installations dans le Modèle GES bioénergie donne une vision élargie des émissions dans l'ensemble en simulant les processus plus importants dans le système bioénergétique, et ce, dans l'absence de détails fins. Cette perspective généralisée permet une personnalisation complète des processus du modèle en fonction des objectifs et des données disponibles pour la région, procédé qui a été utilisé pour synchroniser les deux modèles avant les comparaisons. Le modèle qualifie cette généralisation des émissions par le biais du calcul d'une période d'incertitude qui fournit un contexte sur les scénarios d'émissions les plus favorables et défavorables à calculer pour un projet de bioénergie ou un ensemble de projets.

5.6. Incidence sur les politiques

Il est indispensable de comprendre quand et comment utiliser ces modèles de la manière la plus convenable pour évaluer avec précision le potentiel des émissions liées à la bioénergie et élaborer des stratégies de mise en œuvre judicieuses. Les deux modèles comparés peuvent être mis en œuvre individuellement ou conjointement, chacun selon ses points forts. L'orientation « projet » et la souplesse du Modèle GES bioénergie en font un bon modèle initial pour mettre à l'essai la faisabilité de la mise en œuvre d'une installation de bioénergie dans une région en fonction de ses conditions régionales. L'accent mis sur l'état des forêts par le cadre du MGBC pourrait permettre la simulation de quelques scénarios de mise en œuvre que le Modèle GES bioénergie estime avoir des bénéfices en matière de carbone, et ce, pour mieux comprendre l'incidence des installations sur l'écosystème forestier de la région. Par ailleurs, les données de sortie du MGBC en matière de la

dynamique des forêts peuvent aussi être intégrées au Modèle GES bioénergie pour tirer parti des processus plus complexes de l'écosystème forestier, comme c'est le cas dans Steenberg et coll. (2023).

La capacité de communiquer quel modèle conviendrait le mieux pour répondre aux questions posées par

les responsables des politiques est primordiale pour pouvoir évaluer le potentiel de contribution de la bioénergie en ce qui concerne l'objectif du Canada d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

6. Bibliographie

- BC MOECCS (2015). Industrial Facility Greenhouse Gas Emissions. BC Ministry of Environment and Climate Change Strategy. <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/climate-change/data/industrial-facility-ghg> [en anglais]
- BC MOECCS (2016). Community Energy and Emissions Inventory. BC Ministry of Environment and Climate Change Strategy. <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/climate-change/data/ceei> [en anglais]
- Cowie, A. L., Berndes, G., Bentsen, N. S., Brandão, M., Cherubini, F., Egnell, G., George, B., Gustavsson, L., Hanewinkel, M., Harris, Z. M., Johnsson, F., Junginger, M., Kline, K. L., Koponen, K., Koppejan, J., Kraxner, F., Lamers, P., Majer, S., Marland, E., ... Ximenes, F. A. (2021). Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. *GCB Bioenergy*, 13(8), 1210-1231. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12844> [en anglais]
- ECCC (2016). Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques : plan canadien de lutte contre les changements climatiques. Environnement et Changement climatique Canada. <https://publications.gc.ca/site/fra/9.828776/publication.html>
- Gouvernement de la Colombie-Britannique (2023). FADM - Zone d'approvisionnement en bois (TSA) – Portail du gouvernement ouvert. [<https://open.canada.ca/data/fr/dataset/8daa29da-d7f4-401c-83ae-d962e3a28980>] (Consulté le 18 novembre 2002)
- Gouvernement du Canada. (2022). La carboneutralité d'ici 2050. [<https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/carboneutralite-2050.html>] (Consulté le 26 août 2022)
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., White, T. M., Stinson, G., Shaw, C. H., Rampley, G. J., Smyth, C., Simpson, B. N., Neilson, E. T., Trofymow, J. A., Metsaranta, J., & Apps, M. J. (2009). CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*, 220(4), 480-504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018> [en anglais]
- Laganière, J., Paré, D., Thiffault, E., & Bernier, P. Y. (2017). Range and uncertainties in estimating delays in greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy sourced from Canadian forests. *GCB Bioenergy*, 9(2), 358-369. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12327> [en anglais]
- Roussel, J., Serra, R., Robert, L.-E., Thiffault, E., Laganière, J. (2019). Bioenergy GHG R-Package. Disponible sur demande depuis GitHub.
- Smyth, C. E., Xu, Z., Lemprière, T. C., & Kurz, W. A. (2020). Climate change mitigation in British Columbia's forest sector: GHG reductions, costs, and environmental impacts. *Carbon Balance and Management*, 15, 21. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00155-2> [en anglais]
- Smyth, C., Rampley, G., Lemprière, T. C., Schwab, O., & Kurz, W. A. (2017). Estimating product and energy substitution benefits in national-scale mitigation analyses for Canada. *GCB Bioenergy*, 9(6), 1071-1084. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12389> [en anglais]
- Steenberg, J.W.N., Laganière, J., Ayer, N.W., Duinker, P.N. (2023). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Forest Bioenergy Production at Combined Heat and Power Projects in Nova Scotia, Canada. *Forest Science*, fxac060. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxac060> [en anglais]
- Strengers, B; Matthews, R; Berndes, G; Cowie, A; Laganière, J. 2024. On the Science of Carbon Debt. The Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Ministry of Infrastructure and Water Management, Government of Netherlands, 270 p. <https://www.pbl.nl/en/publications/on-the-science-of-carbon-debt> [en anglais]
- Ter-Mikaelian, M. T., Colombo, S. J., & Chen, J. (2015). The Burning Question: Does Forest Bioenergy Reduce Carbon Emissions? A Review of Common Misconceptions about Forest Carbon Accounting. *Journal of Forestry*, 113(1), 57-68. <http://dx.doi.org/10.5849/jof.14-016> [en anglais]

7. Annexes

A.1. Paramètres des modèles

La présente annexe fait état des facteurs d'émissions utilisés par le Modèle GES bioénergie, ainsi que le pourcentage d'attribution et les valeurs d'efficacité

utilisés par le Modèle GES bioénergie et le cadre du MBC. Ces paramètres servent à calculer les émissions liées aux trois variables comparées (combustion de la biomasse, sort possible des résidus de coupe, combustion fossile).

Facteurs d'émissions (kgCO ₂ /GJ)	ZAF 24	ZAF 30	ZAF 44
Collecte	0,86	0,86	0,86
Transformation	0,76	0,76	0,76
Transport	0,012	0,012	0,012
Combustion	112,1	112,1	112,1
Gaz naturel	70,84	-	-
Mazout	100,28	100,28	-
Hydroélectricité	-	-	5,17

Attribution (%)	ZAF 24	ZAF 30	ZAF 44
Biochaleur	68	100	0
Bioélectricité	4	0	100
Gaz naturel	68	-	-
Mazout	4	100	-
Hydroélectricité	28	-	100
Décomposition	0	70	70
Brûlage des piles	100	30	30

Efficiency (%)	ZAF 24	ZAF 30	ZAF 44
Biochaleur	54	85	-
Bioélectricité	25	-	23
Mazout-électricité	25	-	-
Par défaut	-	85	23
Hydroélectricité	-	-	100

A.2. Modèle GES bioénergie et émissions provenant de la combustion de la biomasse

La présente annexe fait état de l'attribution des émissions provenant de la combustion de la biomasse entre les émissions liées à la combustion proprement dite et les émissions liées à la collecte, au transport, à la transformation et à la perte de matière sèche, comme défini par le Modèle GES bioénergie.

Combustion de la biomasse, GES-Bio (MgCO ₂ /GJ)	ZAF 24	ZAF 30	ZAF 44
Total	8,67	7,12	26,29
Combustion	8,11	6,73	24,86
Pourcentage du total	93,54 %	94,51 %	94,55 %
Collecte, transport, transformation, perte de matière sèche	0,56	0,39	1,43
Pourcentage du total	6,46 %	5,49 %	5,45 %