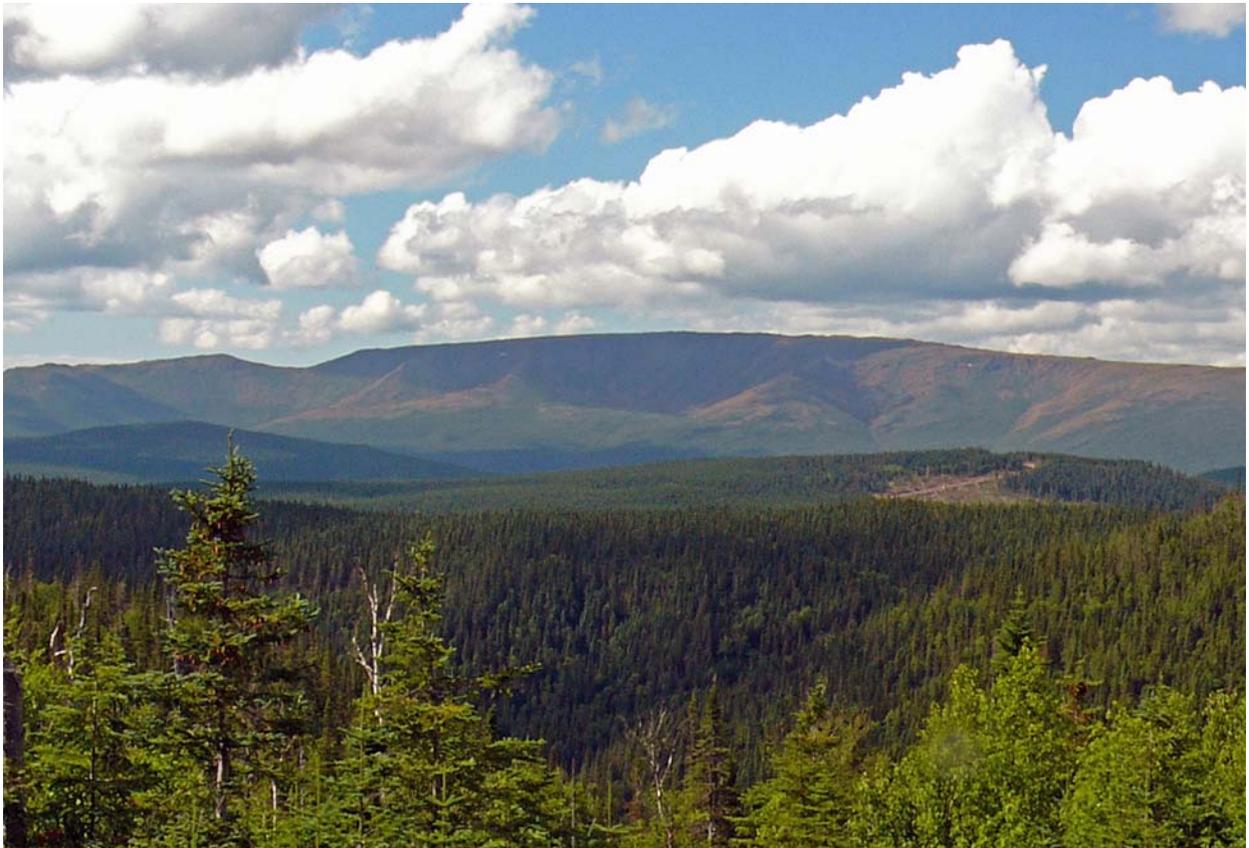


Avis scientifique

L'utilisation de la biomasse forestière
pour réduire les émissions de gaz à effet de serre
du Québec



Avis scientifique

L'utilisation de la biomasse forestière
pour réduire les émissions de gaz à effet de serre
du Québec

Présenté à Forêt Québec par :

Pierre Bernier, David Paré et Evelyne Thiffault, Ressources naturelles Canada
Robert Beauregard et Luc Bouthillier, Université Laval
Annie Levasseur, École polytechnique de Montréal
Amélie St-Laurent-Samuel

En collaboration avec :

Bureau de promotion des produits du bois du Québec
Ministère des Ressources naturelles
Ministère du Développement durable,
de l'Environnement, de la Faune et des Parcs

Ministère des Ressources naturelles

Québec, octobre 2012

Rédaction

Amélie St-Laurent-Samuel, contractuelle

Photo

Pierre Petitclerc, ministère des Ressources naturelles

Pour de plus amples renseignements

Ministère des Ressources naturelles
Direction des communications
5700, 4^e Avenue Ouest, C-402
Québec (Québec) G1H 6R1
Téléphone : 418 627-8609
Télécopieur : 418 643-0720
Courriel : services.clientele@mrn.gouv.qc.ca
Numéro de publication : DAEF-0347

Cette publication, conçue pour une impression recto verso, est offerte dans le site Internet du ministère des Ressources naturelles à l'adresse suivante : www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/biomasse-reduction-emission.pdf.

Référence : BERNIER, P., et autres (2012). *Avis scientifique — L'utilisation de la biomasse forestière pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du Québec*, Québec, gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, 19 p.

© Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles, 2012
Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2012
ISBN 978-2-550-66543-4

Sommaire

Contexte

Des cibles de lutte contre les changements climatiques ont été définies par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2011) afin de stabiliser, d'ici à 2050, la concentration atmosphérique mondiale de CO₂ en dessous du seuil de 450 parties par millions (ppm). Le Québec a pris des engagements en vue de réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) pour les années 2012, 2020 et 2050 de manière cohérente par rapport à ce seuil. Il a aussi retenu l'utilisation de la biomasse forestière afin de produire de l'énergie en remplacement de combustibles fossiles comme l'un des moyens pour tenir ses engagements.

Mandat du Comité sur la contribution du secteur forestier à la lutte contre les changements climatiques

Dans ce contexte, les travaux du Comité ont pour but d'arriver à une compréhension commune de la science qui entoure l'enjeu de l'utilisation de la biomasse forestière à des fins de production de bioénergie et ainsi d'éclairer les preneurs de décisions. Les constats et les recommandations formulées par le Comité ne concernent que le territoire québécois; ils s'inscrivent dans une démarche d'aménagement durable des forêts qui prend en considération, notamment, le maintien de la productivité des sols et des sites forestiers.

Dans le présent avis, un projet de biomasse forestière consiste à utiliser l'une des sources de biomasse forestière ou une combinaison de celles-ci (résidus de coupe issus des activités d'aménagement forestier, biomasse résiduelle issue des processus industriels, produits forestiers postconsommation et biomasse issue de plantations énergétiques) dans le but de produire de l'énergie sous formes de chaleur, de vapeur et d'électricité.

Faits saillants

- Telle que l'a reconnue le GIEC, la biomasse forestière est un outil important dans la lutte contre les changements climatiques. Elle constitue une source d'énergie renouvelable dont les bénéfices sur le plan climatique sont permanents et s'accumulent avec le temps.
- Par rapport à un scénario de référence utilisant un combustible fossile, un projet de biomasse peut engendrer un surcroît initial d'émissions, souvent appelé « dette de carbone », qui entraîne un délai dans la réduction des émissions de GES.
- Le type de biomasse forestière (par exemple, les résidus de coupe, les déchets industriels, les arbres verts) utilisé influence grandement ce délai, auquel on réfère en général en tant que « temps de remboursement de la dette de carbone ».
- Les réductions des émissions de GES sont obtenues plus rapidement quand le projet de bioénergie utilise soit des résidus provenant de processus industriels, de coupe forestière ou de bois de postconsommation, soit de la biomasse additionnelle issue d'activités telles que le boisement de friches en plantations énergétiques.
- Le concept de carboneutralité n'est pas un bon outil d'évaluation de projets de bioénergie à base de biomasse forestière. Toutefois, le fait de ne pas considérer les projets de biomasse

comme carboneutres ne constitue pas une condamnation de l'utilisation de la biomasse forestière.

- La transition du système d'approvisionnement énergétique vers les énergies renouvelables se fera sur plusieurs décennies. Des projets de bioénergie amenant des réductions d'émissions de GES à plus long terme devraient donc aussi faire partie d'une stratégie sur les énergies renouvelables.

Recommandations du Comité

- Le Comité recommande que chaque projet de biomasse forestière soit évalué par une analyse du cycle de vie complet qui tiendrait compte de la répartition dans le temps des émissions des GES, y compris celles provenant de l'écosystème forestier d'où est prélevée la biomasse.
- Afin de maximiser les réductions des émissions de GES à court terme (2020), le Comité recommande que soient d'abord favorisés les projets de biomasse forestière qui se caractérisent par :
 - l'utilisation de biomasse forestière résiduelle de toutes sources ou encore l'utilisation de biomasse additionnelle issue d'activités vouées à cette fin, telles que les plantations énergétiques sur des terres actuellement non forestières ou l'intensification de l'aménagement forestier;
 - l'utilisation de modes de conversion à haute efficacité de récupération de l'énergie, comme la production de chaleur et la cogénération;
 - le remplacement prioritaire du charbon et ensuite des produits pétroliers avant celui du gaz naturel.
- Afin de maximiser les réductions d'émissions de GES à moyen et à long terme, le Comité recommande de poursuivre aussi la mise au point et l'analyse de scénarios de biomasse forestière qui pourraient engendrer des réductions réelles d'ici à 2050.

Table des matières

| | |
|---|----|
| 1. Changements climatiques : un enjeu urgent..... | 1 |
| 2. Contexte au Québec | 3 |
| 3. Mandat | 3 |
| 4. Contribution de la biomasse forestière à la réduction des émissions de CO ₂ | 4 |
| 4.1 Sources de biomasse forestière..... | 4 |
| 4.1.1 Résidus issus des activités d'aménagement forestier..... | 5 |
| 4.1.2 Bois de récupération..... | 5 |
| 4.1.3 Biomasse résiduelle issue des processus industriels..... | 5 |
| 4.1.4 Produits forestiers de postconsommation | 5 |
| 4.1.5 Plantations énergétiques | 5 |
| 4.2 Évaluation de la contribution à la réduction des émissions selon les sources de biomasse..... | 6 |
| 4.3 Autres paramètres à considérer | 7 |
| 4.3.1 Modes de conversion en énergie | 7 |
| 4.3.2 Combustibles fossiles remplacés | 7 |
| 5. Exemple simplifié d'analyse de cycle de vie d'un projet de bioénergie..... | 9 |
| 5.1 Émissions liées à la combustion | 9 |
| 5.2 Ajout des émissions de CO ₂ produites par les résidus forestiers laissés en forêt (scénario de référence)..... | 10 |
| 5.3 Émissions cumulatives d'un projet de biomasse..... | 11 |
| Conclusion | 15 |
| Bibliographie | 17 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 Exemples de temps de remboursement de la dette de carbone en rapport avec les principaux paramètres des projets (les méthodes d'analyse pouvant varier entre les projets)..... | 8 |
| Tableau 2 Calcul des émissions de CO ₂ liées à la combustion pour l'exemple type | 10 |
| Tableau 3 Émissions totales cumulées de CO ₂ | 11 |
| Tableau 4 Émissions totales de CO ₂ cumulées d'un projet de biomasse | 12 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 Contributions du secteur forestier aux efforts d'atténuation des émissions de GES..... | 2 |
| Figure 2 Cumul des réductions d'émissions de CO ₂ engendrées dans l'exemple type | 13 |

1. Changements climatiques : un enjeu urgent

À l'heure actuelle, les changements climatiques constituent un enjeu de société incontournable qui comporte des dimensions scientifiques, économiques et géopolitiques. Ils affectent, à différentes échelles, les populations humaines et leur environnement. Il est maintenant établi dans la communauté scientifique internationale que les activités humaines, notamment l'utilisation des combustibles fossiles et la déforestation, sont la cause des changements climatiques actuellement observés. La raison en est qu'elles engendrent dans l'atmosphère des émissions de gaz à effet de serre (GES). À l'échelle planétaire, l'augmentation de la température moyenne annuelle planétaire au cours des années allant de 1906 à 2005 est évaluée à environ 0,74 °C (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007). Une telle augmentation moyenne peut sembler faible, mais elle n'est qu'un indice des changements déjà observés dans les patrons globaux des précipitations et les extrêmes climatiques.

Au Québec, des changements de température annuelle moyenne de l'ordre de 0,5 à 1,2 °C ont été observés de 1960 à 2003. En 2050, l'augmentation anticipée des températures est de l'ordre de 2,5 à 3,8 °C, dans le sud du Québec, et de 4,5 à 6,5 °C, dans le nord de celui-ci. L'accroissement attendu des précipitations est d'environ 8,6 à 18,9 % par rapport à la normale, dans le sud du Québec, et de 16,8 à 29,4 % dans le nord. Ces changements du climat affecteront de façon marquée les activités économiques, la santé humaine, les infrastructures et les écosystèmes naturels du Québec (Desjarlais et autres, 2010).

Devant ces changements observés et prévus, le GIEC souligne l'urgence d'agir en incitant les émetteurs de GES à stabiliser la concentration atmosphérique de CO₂ à 450 parties par million (ppm) d'ici à 2050. Cette stabilisation permettrait de limiter à 2 °C le réchauffement planétaire, un seuil postulé comme étant critique vis-à-vis de l'impact sur les écosystèmes. Dans un rapport récent, l'Agence internationale de l'énergie affirme que ce seuil de 450 ppm pourrait être atteint dès 2017 « faute d'entreprendre des actions radicales » (International Energy Agency, 2011). Dans le contexte du Protocole de Kyoto, premier traité mis en place à l'échelle internationale pour réduire les émissions mondiales de GES, les pays industrialisés se sont engagés à réduire de 5,2 % leurs émissions de GES au cours des années allant de 2008 à 2012, par rapport à celles de 1990.

Le GIEC reconnaît l'importance de la foresterie et des produits issus de la forêt dans la lutte contre les changements climatiques :

« Un aménagement forestier durable visant à maintenir ou accroître les stocks de carbone tout en produisant d'une manière soutenue du bois, de la fibre ou de

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

Le GIEC a été créé en 1988 par deux organismes de l'Organisation des Nations unies (ONU), l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE). Le but visé était de documenter le phénomène des changements climatiques, d'en comprendre les causes, de projeter sa trajectoire dans le futur, de cibler les répercussions potentielles et de réfléchir à des stratégies d'atténuation et d'adaptation pour y faire face (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007).

Les activités du GIEC rendent compte, régulièrement, de l'état de la recherche en vue d'informer les décideurs à propos de leurs choix en ce qui a trait aux changements climatiques.

l'énergie, va générer les plus grands bénéfices durables en matière d'atténuation. »
(Nabuurs et autres, 2007)

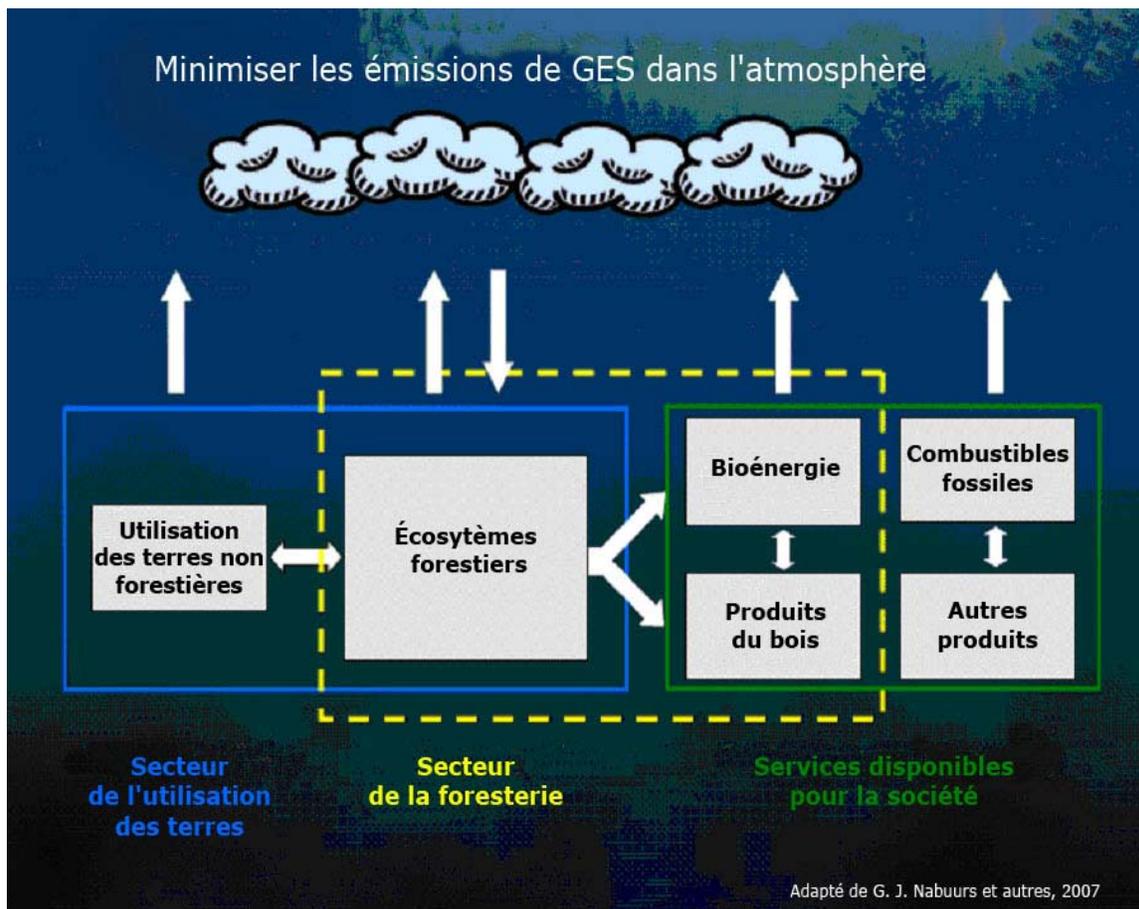


Figure 1 Contributions du secteur forestier aux efforts d'atténuation des émissions de GES

Le GIEC souligne le rôle crucial que peut jouer la bioénergie pour l'atténuation des émissions de GES, en remplacement des combustibles fossiles (Chum et autres, 2011). Par contre, comme le démontre l'abondante littérature scientifique sur le sujet, une comptabilisation rigoureuse des émissions de GES est nécessaire pour s'assurer que les bénéfices de réduction des émissions sont réels et que la stratégie d'atténuation des changements climatiques est efficace (Searchinger et autres, 2009; Holtsmark, 2012).

Dans un contexte plus large, il faut considérer qu'il faudra plusieurs décennies de changements structurels importants pour permettre l'intégration des énergies renouvelables dans le système énergétique actuel (Moomaw et autres, 2011). Par exemple, on estime qu'il a fallu de 50 à 70 ans, à partir de leur introduction, pour que les combustibles fossiles deviennent des produits de commodité (Kerr Casper, 2010). Pour les sources d'énergies renouvelables, dont la biomasse forestière fait partie, il faudra sans doute autant de temps en raison, particulièrement, de leur faible densité énergétique (c'est-à-dire leur quantité d'énergie par unité de masse) par rapport aux combustibles fossiles. Conséquemment, vue l'urgence de la situation, il est crucial de favoriser des actions rapides et bénéfiques à brève échéance (par exemple, 2020). Toutefois, il est important de ne pas considérer ces échéances comme des limites mais plutôt comme des jalons dans la transformation du système énergétique, transformation qui durera vraisemblablement plusieurs décennies.

2. Contexte au Québec

Le Québec est engagé dans la lutte contre les changements climatiques depuis 1992, année où il a adhéré aux objectifs et aux principes de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). En 2007, cet engagement s'est renforcé, alors que le Québec s'est déclaré lié au Protocole de Kyoto. Le gouvernement a adopté des cibles de réduction de GES de 6 % sous le niveau de 1990, pour 2012, et de 20 % sous le niveau de 1990, d'ici à 2020. En 2001, dans le contexte de la Conférence des gouverneurs de la Nouvelle-Angleterre et des premiers ministres de l'est du Canada, le Québec a également adopté une cible, pour 2050, de réduction des GES à l'échelle régionale allant de 75 à 85 % sous le niveau de 2001.

En 2008, dans le contexte de la refonte du régime forestier, le ministère des Ressources naturelles s'est engagé à doter le Québec d'une stratégie industrielle axée sur des produits à forte valeur ajoutée (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2008). Un des quatre axes d'intervention de cette stratégie repose sur le développement de la filière énergétique à partir de la biomasse forestière. En 2009, dans le contexte de son plan d'action vers la *Valorisation de la biomasse forestière*, le gouvernement québécois a fait valoir les bénéfices, sur le plan environnemental, qui pourraient découler du développement de la filière de la biomasse au Québec (Ministère des ressources naturelles et de la faune, 2009).

3. Mandat

Dans ce contexte d'évolution des connaissances, Forêt Québec a sollicité un groupe de scientifiques, d'experts et de parties prenantes en vue de préparer un avis sur la contribution de la biomasse forestière à la lutte contre les changements climatiques. Cette démarche a pour but de faire la lumière sur les connaissances scientifiques actuelles et d'alimenter les politiques et actions futures du ministère des Ressources naturelles. L'objectif des travaux du Comité sur la contribution du secteur forestier à la lutte contre les changements climatiques est d'établir une vision commune de la science soutenant la compréhension du rôle de la biomasse forestière dans la réduction des émissions de GES et de dégager les priorités dans les actions considérées comme les plus prometteuses à cet égard.

Dans le présent document, le Comité ne traite pas des sous-produits non gazeux de la combustion du bois et des combustibles fossiles, tels que les particules fines ou la suie, même s'ils peuvent affecter le climat. Cet avis porte sur la contribution au bilan de GES de la bioénergie produite à partir de la biomasse forestière seulement. De plus, afin de simplifier le texte, l'ensemble des GES issus de la combustion de la biomasse forestière et des combustibles fossiles est représenté par son équivalent en émissions de CO₂.

Il faut aussi rappeler que l'évaluation des bénéfices de réduction des émissions de CO₂ engendrés par l'utilisation de la biomasse forestière pour la production de bioénergie s'inscrit dans une démarche d'aménagement durable des forêts qui « exige d'intégrer l'économie, le plan social et l'environnement dans les décisions » (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2010). Le développement de la filière de la bioénergie repose donc sur l'acceptabilité des pratiques sur le plan social et doit favoriser notamment la vitalité des régions en cause sur le plan économique. Le suivi environnemental, la prévention par la détermination des sites à risque (Thiffault et autres, 2011) et une modulation cohérente de l'intensité de la récolte sont aussi considérés comme étant inhérents au développement des projets.

4. Contribution de la biomasse forestière à la réduction des émissions de CO₂

La combustion de la biomasse est souvent qualifiée de « carboneutre », un concept qui reflète le simple constat que la combustion de la biomasse retourne dans l'atmosphère le carbone déjà absorbé par les plantes. Ce concept est toutefois incomplet dans l'analyse de projets de bioénergie, car il ne tient compte ni de la répartition dans le temps des émissions de CO₂, ni des options à considérer dans l'évaluation de tels projets. Par exemple, si des arbres ne sont pas récoltés pour produire de la bioénergie, ils peuvent continuer à absorber du carbone atmosphérique. Leur combustion interrompt donc cette activité de séquestration de carbone en plus de libérer du carbone dans l'atmosphère. L'utilisation de la carboneutralité comme base d'évaluation pour les projets de bioénergie a été invalidée par de nombreuses études scientifiques internationales (Searchinger et autres, 2009; Cherubini, Strømman et Hertwich, 2011; Haberl et autres, 2012), par l'*Environmental Protection Agency* (l'Agence de protection de l'environnement) des États-Unis et par le comité scientifique de l'Agence européenne pour l'Environnement.

Le concept de carboneutralité ne peut donc pas servir de base scientifique à une politique sur la bioénergie à la lumière des connaissances disponibles. Cependant, la mise au rancart de ce principe ne constitue pas une condamnation de la bioénergie. Il faudrait plutôt concevoir une politique qui prendrait en considération toute la dynamique des émissions de CO₂ dans le temps par rapport à un scénario de référence. Cela permettrait de favoriser les options de bioénergie qui procurent des bénéfices réels dans un laps de temps approprié.

Par unité d'énergie produite, les émissions de CO₂ de la biomasse forestière sont typiquement plus élevées que celles des combustibles fossiles parce que la biomasse contient moins d'énergie par unité de carbone que les produits pétroliers et le gaz naturel. De plus, la biomasse est souvent brûlée avec une plus faible efficacité de conversion que les combustibles fossiles. Ces deux éléments entraînent une dette de carbone dans les premières années de la plupart des projets de bioénergie à base de biomasse forestière. Ce fait est reconnu par la littérature scientifique internationale et ne fait l'objet d'aucune controverse (Bird et autres, 2011). Le remboursement de cette dette peut prendre de quelques années à plusieurs décennies. Cette durée est contrôlée en grande partie par la dynamique en CO₂ du système biologique d'où provient la biomasse.

À terme, les processus biologiques du cycle du carbone jouent toujours en faveur de l'utilisation de la biomasse forestière comme source de bioénergie. Comparée aux combustibles fossiles, la bioénergie finit toujours par réduire les émissions de CO₂ lorsqu'elle provient d'un aménagement durable des forêts, parce que les arbres repoussent et que les résidus de coupe et les déchets industriels finissent par se décomposer naturellement. En fait, on remplace un combustible fossile qui a un cycle de millions d'années par un combustible biologique qui, lui, a un cycle allant de quelques années à quelques décennies. L'enjeu ici n'est donc pas de démontrer qu'un gain existe, mais plutôt de savoir quand ce gain se manifestera, et quelle en sera l'ampleur.

4.1 Sources de biomasse forestière

Les principales sources de biomasse forestière sont : les résidus issus des activités d'aménagement forestier, le bois de récupération, la biomasse résiduelle issue de la

transformation industrielle, les produits forestiers de postconsommation et les plantations énergétiques. La récolte d'arbres « verts » en forêt naturelle pour la production de bioénergie n'est pas une activité courante. Dans le présent avis, elle est considérée comme une option temporaire envisageable pour pallier aux contraintes d'approvisionnement en biomasse des autres sources mentionnées précédemment.

4.1.1 Résidus issus des activités d'aménagement forestier

Les résidus issus des activités d'aménagement regroupent l'ensemble de la matière ligneuse récupérée en forêt qui ne trouve pas preneur pour la transformation en produits forestiers traditionnels. Cette matière est constituée des résidus de coupe, tels que les branches et les houppiers d'arbres dont le tronc est récolté pour les produits traditionnels du bois, et des tiges de taille non marchande de faible qualité ou d'essences non commerciales coupées à l'occasion d'activités sylvicoles.

4.1.2 Bois de récupération

Cette source de biomasse comprend les arbres morts issus de peuplements perturbés par le feu ou les épidémies d'insectes, et qui sont impropres à la transformation en produits forestiers traditionnels.

4.1.3 Biomasse résiduelle issue des processus industriels

Les écorces, les sciures de bois et la liqueur noire sont les principaux coproduits des processus industriels (Paré et autres, 2011; Dymond et autres, 2010). La grande majorité de la biomasse résiduelle des processus de transformation est déjà vouée à la fabrication de produits du bois, tels les panneaux de particules et la pâte, de même qu'à la production d'énergie (chaleur et, ou, électricité) (Paré et autres, 2011). Toutefois, l'attribution relative entre ces utilisations varie dans le temps et selon les structures industrielles.

4.1.4 Produits forestiers de postconsommation

Les résidus forestiers de postconsommation sont des résidus urbains qui proviennent principalement d'activités de déconstruction. Les résidus de postconsommation servent déjà en bonne partie à la fabrication de produits solides, mais une proportion se retrouve encore dans les sites d'enfouissement. Cependant, la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles – Plan d'action 2011-2015 – Allier économie et environnement* stipule que les résidus ligneux ne pourront plus être enfouis à partir de 2014. Cela pourrait donc avoir pour effet d'augmenter la disponibilité des résidus ligneux utilisables pour la production d'énergie (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2011).

4.1.5 Plantations énergétiques

Sur les terres agricoles, les friches et les terres marginales, la création de plantations d'arbres ou d'arbustes, sur de courtes rotations, destinées à la production d'énergie augmente la quantité de biomasse disponible en raison de la forte productivité par unité de territoire qui leur est associée (Paré et autres, 2011; Réseau ligniculture Québec, 2008). Les enjeux liés aux plantations énergétiques sont encore nombreux. Les émissions de CO₂ associées à leur production sont plus élevées que celles associées à la production de biomasse provenant des forêts naturelles, en raison de leur modèle agricole de production. Malgré leur proximité

potentielle par rapport aux utilisateurs, ces plantations sont souvent peu rentables sur le plan économique en raison, entre autres, du coût de renonciation aux terres dans la zone agricole (Ressources naturelles Canada, 2010a et b; Réseau ligniculture Québec, 2008). Au Québec, bon nombre de terres agricoles sont cependant à l'état de friches et pourraient, en principe, être converties en plantations énergétiques. Parce que ce sont des plantations destinées à la production d'énergie et parce que l'autre choix est le maintien d'une friche peu fixatrice de carbone, cette biomasse peut être considérée comme carboneutre, hormis les émissions de CO₂ liées à sa production. L'intensification de l'aménagement forestier à des fins de production de biomasse pourrait aussi hypothétiquement générer des volumes de biomasse excédentaires qui seraient eux aussi carboneutres parce que le CO₂ serait volontairement capturé dans l'atmosphère avant la combustion des plantes.

4.2 Évaluation de la contribution à la réduction des émissions selon les sources de biomasse

L'évaluation de la contribution de la biomasse forestière à la réduction des émissions de CO₂ en vue de remplacer les combustibles fossiles se fait en comparant les émissions du scénario dans lequel la biomasse est la ressource utilisée pour produire de l'énergie (appelé « scénario de la bioénergie ») aux émissions du scénario de référence. Le scénario de référence correspond à la situation qui, normalement, aurait prévalu si le projet de biomasse n'avait pas existé. Concrètement, il faut déterminer toutes les activités d'un projet de biomasse du scénario de la bioénergie et comparer dans le temps l'ensemble des puits (processus retirant du CO₂ de l'atmosphère) et des émissions totales à chacun des deux scénarios pour produire une quantité donnée d'énergie. Ce calcul s'appelle une analyse de cycle de vie comparative.

La complexité d'une analyse de cycle de vie comparative augmente en fonction de la complexité des choix et des conséquences de mettre ou non en place un projet de bioénergie à base de biomasse forestière, et de la complexité des filières technologiques utilisées. Ces analyses démontrent cependant que le type de biomasse forestière a une très forte influence sur la rapidité avec laquelle les projets qu'ils alimentent génèrent des réductions d'émissions de GES. Toutes choses étant égales par ailleurs, nous pouvons donc classer les types de biomasse forestière en trois délais de remboursement de la dette de carbone. Les délais en nombres d'années, qui sont mentionnés ci-dessous, sont approximatifs et se réfèrent à ceux d'un projet dans lequel l'énergie est extraite de la biomasse de manière efficace (par exemple, un projet de génération de chaleur).

Court terme (moins de 10 ans) : les résidus de postconsommation, les résidus industriels, les résidus de coupe et autres résidus d'aménagement forestier qui se décomposent rapidement (par exemple, les petits arbres provenant d'éclaircies précommerciales) et la biomasse issue de plantations de courte rotation en boisement.

Moyen terme (de 10 à 20 ans) : les bois de récupération à la suite de perturbations naturelles, les souches et les tiges de bon diamètre, mais d'essences non commerciales, coupées lors des opérations de récolte et laissées sur place.

Long terme (plusieurs décennies) : les arbres verts sur pied provenant de forêts naturelles ou de plantations issues de la conversion de forêts matures.

Le scénario de référence est facile à établir et la comparaison avec le scénario de la bioénergie est simple lorsque la production de bioénergie utilise une biomasse provenant de résidus de

coupe, de bois de postconsommation, de processus industriels, tels que la liqueur noire, ou d'une autre forme de biomasse résiduelle qui, si non utilisée, se décomposerait et émettrait du CO₂ dans l'atmosphère sur une courte période de temps. Dans ces cas, la contribution de la biomasse forestière à la réduction des émissions de CO₂ est rapide et certaine. C'est aussi le cas lorsque la biomasse utilisée provient d'un territoire aménagé de manière à produire de la biomasse additionnelle, comme pour les plantations énergétiques établies sur des terres agricoles abandonnées.

Les bénéfices de réduction des émissions sont bien plus lointains, incertains et difficiles à prédire avec des sources de biomasse telles que les arbres verts. Dans le scénario de référence, ces arbres auraient vraisemblablement continué de fixer du carbone pendant un certain temps, en amoindrissant les émissions du combustible fossile de ce scénario. Par contre, il se peut que dans le scénario de référence, les arbres subissent une perturbation naturelle (feu, épidémie d'insectes) ou soient récoltés pour faire d'autres produits. Les hypothèses étant nombreuses, la prédiction du délai avant le paiement de la dette de carbone et la génération de bénéfices réels à long terme est plus hasardeuse.

Il est aussi reconnu que la conversion de forêts dites naturelles en plantations énergétiques cause des effets négatifs sur le climat. En effet, la substitution d'une forêt à maturité par une plantation énergétique entraîne d'importantes émissions de CO₂ au moment de la conversion en raison de la baisse des stocks de carbone à cet endroit. La dette de carbone associée à la conversion est souvent très longue malgré les réductions d'utilisation de combustibles fossiles liées à la combustion de la biomasse qui y serait produite dorénavant (Righelato et Spracklen, 2007).

4.3 Autres paramètres à considérer

La certitude d'obtenir des bénéfices de la bioénergie forestière et le délai d'obtention de ces bénéfices varient en fonction de la source de biomasse forestière utilisée. D'autres paramètres font également varier les bénéfices; il s'agit du mode de conversion de la biomasse en énergie (efficacité à produire de l'énergie) et le type de combustible fossile remplacé.

4.3.1 Modes de conversion en énergie

La quantité d'énergie utile produite par la biomasse forestière dépend du mode de conversion utilisé. Par exemple, le taux d'efficacité de conversion visant uniquement la production d'électricité par des centrales thermiques classiques va de 35 à 45 %, tandis que les taux des chaudières de chauffage seules et de la cogénération (chauffage et électricité combinés) s'élèvent, respectivement, à 90 % et à 85 % (European Environment Agency, 2010). Ainsi, les modes de conversion devraient être sélectionnés dans l'ordre suivant de priorité :

1. Chaleur et cogénération
2. Électricité
3. Biocarburant

4.3.2 Combustibles fossiles remplacés

Certains combustibles fossiles dégagent une plus grande quantité de CO₂ par unité d'énergie que d'autres, et leur remplacement prioritaire augmente la rapidité de génération et l'ampleur des bénéfices d'un projet de bioénergie sur le climat. Les combustibles fossiles peuvent être

classés en ordre décroissant d'émissions de CO₂ (kg/GJ), le premier présentant donc la meilleure occasion de substitution par la biomasse (Agence de l'efficacité énergétique, 2009) :

1. Charbon : 92,385 kg CO₂/GJ
2. Mazout lourd : 74,032 kg CO₂/GJ
3. Mazout léger, diesel : 70,483/72,125 kg CO₂/GJ
4. Essence : 68,145/73,156 kg CO₂/GJ
5. Gaz naturel : 50,198 kg CO₂/GJ

En outre, les émissions avant consommation liées à l'extraction de certains de ces combustibles fossiles sont très élevées. En effet, toutes les méthodes d'extraction d'huile engendrent des émissions avant consommation importantes et beaucoup plus élevées que celles liées à la biomasse forestière. Ces émissions peuvent être particulièrement élevées dans les cas de l'extraction d'huile par injection de vapeur ou, encore, quand le gaz naturel est brûlé au puits comme déchet de l'extraction de l'huile, comme cela se fait encore dans certaines exploitations qui ne sont pas desservies par des gazoducs. Le raffinage entraîne aussi des émissions importantes par, entre autres, la combustion de déchets gaziers provenant du processus de distillation fractionnée. L'ensemble de ces sources d'émissions atteint, en moyenne, 25 % des émissions à la cheminée (Air Resource Board, 2009; Manomet Center for Conservation Sciences, 2010).

Le tableau 1 montre l'effet important du type de biomasse et des paramètres du projet sur le temps de remboursement de la dette de carbone. Les processus de certification touchant les biocarburants liquides utilisent déjà un critère de temps (Scarlat et Dallemand, 2011; van Dam, Junginger et Faaij, 2010). On considère généralement que le calcul des effets sur les GES doit être fait sur un horizon de 20 ou 30 ans (mêmes références).

Tableau 1 Exemples de temps de remboursement de la dette de carbone en rapport avec les principaux paramètres des projets (les méthodes d'analyse peuvent varier entre les projets)

| Dette (années) | Type de biomasse forestière utilisée | Mode de conversion (énergie produite) | Combustible fossile remplacé | Référence |
|----------------|--------------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|
| 4 | Branches | Chaleur | Gaz naturel | Repo, Tuomi et Lisk, 2010 |
| 6 | Résidus de coupe ¹ | Chaleur | Mazout | Bernier et Paré, 2012 |
| 22 | Souches | Chaleur | Gaz naturel | Repo, Tuomi et Lisk, 2010 |
| 70-75 | Tiges ² commerciales | Chaleur (chauffage résidentiel et urbain) | Mazout | Manuilova et Johnston, 2011 |
| 74 | Résidus de coupe | Éthanol | Essence (Fuel E85) | McKechnie et autres, 2011 |
| 90 | Arbres entiers ³ | Chaleur | Mazout | Bernier et Paré, 2012 |
| > 100 | Arbres entiers | Éthanol | Essence (Fuel E85) | McKechnie et autres, 2011 |

1. Résidus de coupe : parties non commerciales de l'arbre, généralement les branches et, parfois, l'extrémité fine de la tige.

2. Tige : tige principale de l'arbre, entre la souche et le sommet.

3. Arbre entier : ensemble de la partie aérienne de l'arbre, comprenant la tige et les branches.

5. Exemple simplifié d'analyse de cycle de vie d'un projet de bioénergie

Ce chapitre donne un exemple de calcul des émissions de CO₂ d'un scénario de la biomasse comparé à un scénario de référence avec combustible fossile pour la production de chaleur. Dans cet exemple type, la biomasse est composée de résidus de coupe forestière et le combustible fossile est le mazout lourd. Dans le scénario de référence, les résidus de coupe demeurent en forêt où ils se décomposent avec le temps. Le choix des résidus de coupe comme source de biomasse simplifie beaucoup l'exemple tout en conservant les concepts de base de la comparaison au scénario de référence et de la comptabilisation des flux de CO₂ dans le temps.

5.1 Émissions liées à la combustion

Sur une base annuelle, les émissions de combustion sont la somme des émissions à la cheminée et des émissions avant consommation liées à l'extraction, au transport et au prétraitement du combustible (Cherubini, 2010). Les émissions à la cheminée dépendent du facteur d'émission du combustible et de l'efficacité du processus de conversion de cette énergie. Propriété intrinsèque du combustible, le facteur d'émission se définit comme la quantité de CO₂ émise pour la production, en conditions idéales, d'une quantité d'énergie donnée. Le facteur d'émission est exprimé en kilogrammes de CO₂ émis par gigajoule d'énergie produite (kg CO₂/GJ). Pour l'exemple type, nous utilisons les facteurs d'émission du GIEC (pouvoir calorifique inférieur du combustible [PCI]) de 112 kg CO₂/GJ pour le bois et de 74 kg CO₂/GJ pour le mazout.

Paramètres de l'exemple type

Le scénario de la biomasse :

- Utilisation de résidus de coupe
- Génération de CO₂

Émissions totales = Émissions de combustion

Le scénario de référence :

- Décomposition des résidus de coupe en forêt
- Production d'énergie CO₂ par le mazout lourd

Émissions totales = Émissions de combustion du mazout + Émissions des résidus laissés en forêt

L'efficacité du processus de conversion, quant à elle, représente le pourcentage de l'énergie totale qui est récupéré par le processus. Nous utilisons une efficacité de 85 % dans notre exemple pour les deux scénarios.

Finalement, les valeurs des émissions avant consommation (c'est-à-dire les émissions liées à la chaîne d'approvisionnement) utilisées pour cet exemple sont d'environ 5,6 kg CO₂/GJ, soit 5 % du facteur d'émission pour la biomasse (Repo, Tuomi et Liski, 2010), alors qu'elles sont de 18,5 kg CO₂/GJ, soit 25 % du facteur d'émission pour le mazout lourd (Air Resource Board, 2009). Le tableau 2 illustre comment se fait le calcul des émissions liées à la combustion.

Tableau 2 Calcul des émissions de CO₂ liées à la combustion pour l'exemple type

| Éléments qui influent sur les émissions de combustion ¹ | Scénario de la biomasse (résidus de coupe) | Scénario de référence (mazout lourd) |
|---|--|--------------------------------------|
| Facteur d'émission (kg CO ₂ /GJ) ² | 112* | 74,1* |
| + Taux d'efficacité du processus de conversion (%) | 85 | 85 |
| = Émissions à la cheminée (kg CO ₂ /GJ) | 131,8 | 87,6 |
| + Émissions avant consommation (kg CO ₂ /GJ) | 5,6 | 18,5 |
| = Émissions de combustion de CO ₂ (kg CO ₂ /GJ) | 137 | 106 |

1. Pour la production d'un GJ d'énergie.

2. Les facteurs d'émission par défaut, présentés par le GIEC, correspondent au PCI.

5.2 Ajout des émissions de CO₂ produites par les résidus forestiers laissés en forêt (scénario de référence)

Pour compléter l'analyse, le scénario de référence doit comptabiliser les émissions de CO₂ liées à la décomposition en forêt des résidus de coupe qui auraient été brûlés dans le projet de biomasse. La dynamique temporelle des émissions liées à ces résidus diffère grandement dans les deux scénarios. Dans le scénario de référence, la décomposition graduelle de la biomasse laissée en forêt émet du CO₂ pendant plusieurs années alors que, dans le scénario de la bioénergie, sa combustion génère ces mêmes émissions immédiatement à la cheminée.

Le tableau 3 illustre comment les émissions de CO₂ se répartissent dans le temps pour une seule année de production énergétique. Dans les deux scénarios, les émissions de combustion sont faites pendant l'année de la production énergétique. Cependant, dans le scénario de référence (mazout lourd), la biomasse laissée sur le parterre de coupe se décompose graduellement, ajoutant ses émissions de CO₂ à celles émises à la combustion. Les émissions totales cumulées venant du scénario du mazout lourd dépassent celles du scénario de la biomasse à partir de l'an 4, à cause de la décomposition graduelle des résidus qui ne sont pas brûlés.

Tableau 3 Émissions totales cumulées de CO₂

| Année | Scénario de la biomasse | Scénario de référence (mazout lourd) | | | |
|-------|---|---|--|--|--|
| | Émissions de combustion (kg CO ₂) | Émissions de combustion (kg CO ₂) | Émissions des résidus ¹ (kg CO ₂) | Émissions totales (combustion + résidus) (kg CO ₂) | Émissions totales cumulées (kg CO ₂) |
| 0 | 137 | 106 | 8 | 114 | 114 |
| 1 | - | - | 7 | 8 | 122 |
| 2 | - | - | 7 | 7 | 130 |
| 3 | - | - | 6 | 7 | 136 |
| 4 | - | - | 6 | 6 | 143 |
| 5 | - | - | 6 | 6 | 149 |
| 6 | - | - | 5 | 6 | 154 |
| 7 | - | - | 5 | 5 | 160 |
| 8 | - | - | 5 | 5 | 165 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 100 | - | - | 0 | 0 | 243 |

1. Les nombres présentés dans la colonne intitulée « Émissions des résidus » sont basés sur un taux annuel de décomposition de 6 % de la quantité de résidus requise pour produire un GJ d'énergie.

Dans cet exemple, après la production d'énergie à l'an « 0 », trois années additionnelles sont requises dans le scénario de la biomasse pour en venir à égaliser les émissions totales du scénario de référence (mazout lourd). En d'autres termes, la bioénergie produite dans l'année « 0 » a généré une dette de CO₂ qui a été remboursée en trois ans; à partir de ce moment, la bioénergie produit des bénéfices de réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

5.3 Émissions cumulatives d'un projet de biomasse

Dans un projet concret, l'énergie est produite pendant une séquence d'années. À chaque nouvelle année, il se produit de nouvelles émissions de combustion et de nouvelles émissions de résidus à partir de nouvelles superficies sur lesquelles les résidus forestiers se décomposent et émettent graduellement du CO₂. Le tableau 4 illustre une comparaison sur plusieurs années des scénarios de la biomasse (B) et du mazout lourd (M). Le premier jeu de colonnes B et M, en gras, correspond aux émissions totales annuelles des deux scénarios, tirées du tableau 3 à partir de l'année « 0 ». Pour chaque année s'ajoute une nouvelle paire de colonnes B et M correspondant aux émissions totales liées à la production d'énergie au cours de cette nouvelle année, selon les deux scénarios. La colonne « Différence » montre que, de l'année 6 à l'année 7, la dette de CO₂ accumulée en début de projet est remboursée totalement. Les lignes 20, 50 et 100 ans sont présentées pour illustrer comment les réductions de GES s'accumulent durant toute la durée du projet.

Tableau 4 Émissions totales de CO₂ cumulées d'un projet de biomasse

| Année | Émissions annuelles (kg/CO ₂) | | | | | | | | | | | | | | | | | | Émissions totales annuelles (kg/CO ₂) | | Émissions cumulées totales (kg/CO ₂) | | Différence ¹ (kg/CO ₂) |
|-------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|------|--|-------|---|
| | B | M | B | M | B | M | B | M | B | M | B | M | B | M | B | M | B | M | B | M | B | M | |
| 0 | 137 | 114 | | | | | | | | | | | | | | | | | 137 | 114 | 137 | 114 | -23 |
| 1 | -- | 8 | 137 | 114 | | | | | | | | | | | | | | | 137 | 122 | 274 | 236 | -38 |
| 2 | -- | 7 | -- | 8 | 137 | 114 | | | | | | | | | | | | | 137 | 130 | 411 | 366 | -45 |
| 3 | -- | 7 | -- | 7 | -- | 8 | 137 | 114 | | | | | | | | | | | 137 | 136 | 548 | 502 | -46 |
| 4 | -- | 6 | -- | 7 | -- | 7 | -- | 8 | 137 | 114 | | | | | | | | | 137 | 143 | 685 | 645 | -40 |
| 5 | -- | 6 | -- | 6 | -- | 7 | -- | 7 | -- | 8 | 137 | 114 | | | | | | | 137 | 149 | 822 | 794 | -28 |
| 6 | -- | 6 | -- | 6 | -- | 6 | -- | 7 | -- | 7 | -- | 8 | 137 | 114 | | | | | 137 | 154 | 959 | 948 | -11 |
| 7 | -- | 5 | -- | 6 | -- | 6 | -- | 6 | -- | 7 | -- | 7 | -- | 8 | 137 | 114 | | | 137 | 160 | 1096 | 1108 | 12 |
| 8 | -- | 5 | -- | 5 | -- | 6 | -- | 6 | -- | 6 | -- | 7 | -- | 7 | -- | 137 | 114 | 137 | 165 | 1233 | 1273 | 40 | |
| -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 20 | | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | 137 | 206 | 2877 | 3549 | 672 |
| -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 50 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | 137 | 237 | 6987 | 10355 | 3368 |
| -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 100 | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | 137 | 243 | 13837 | 22434 | 8597 |

1. La colonne « Différence » indique les réductions cumulées d'émissions en CO₂ du scénario de la biomasse, un chiffre négatif indiquant une émission en CO₂ initialement plus forte pour le scénario de la biomasse. Les réductions des émissions en CO₂ engendrées par le scénario de la biomasse se poursuivent durant toute la vie du projet, tel que l'illustre la figure 2.

La figure 2 montre les résultats de la colonne « différence » du tableau précédent. Cette figure illustre comment, sur une période de cent ans, les bénéfices climatiques en matière d'émissions évitées s'accumulent pour le reste de la durée de vie du projet à partir de ce point de remboursement. La portion agrandie de la figure 2 montre la dynamique de remboursement de la dette de carbone dans les premières années du projet.

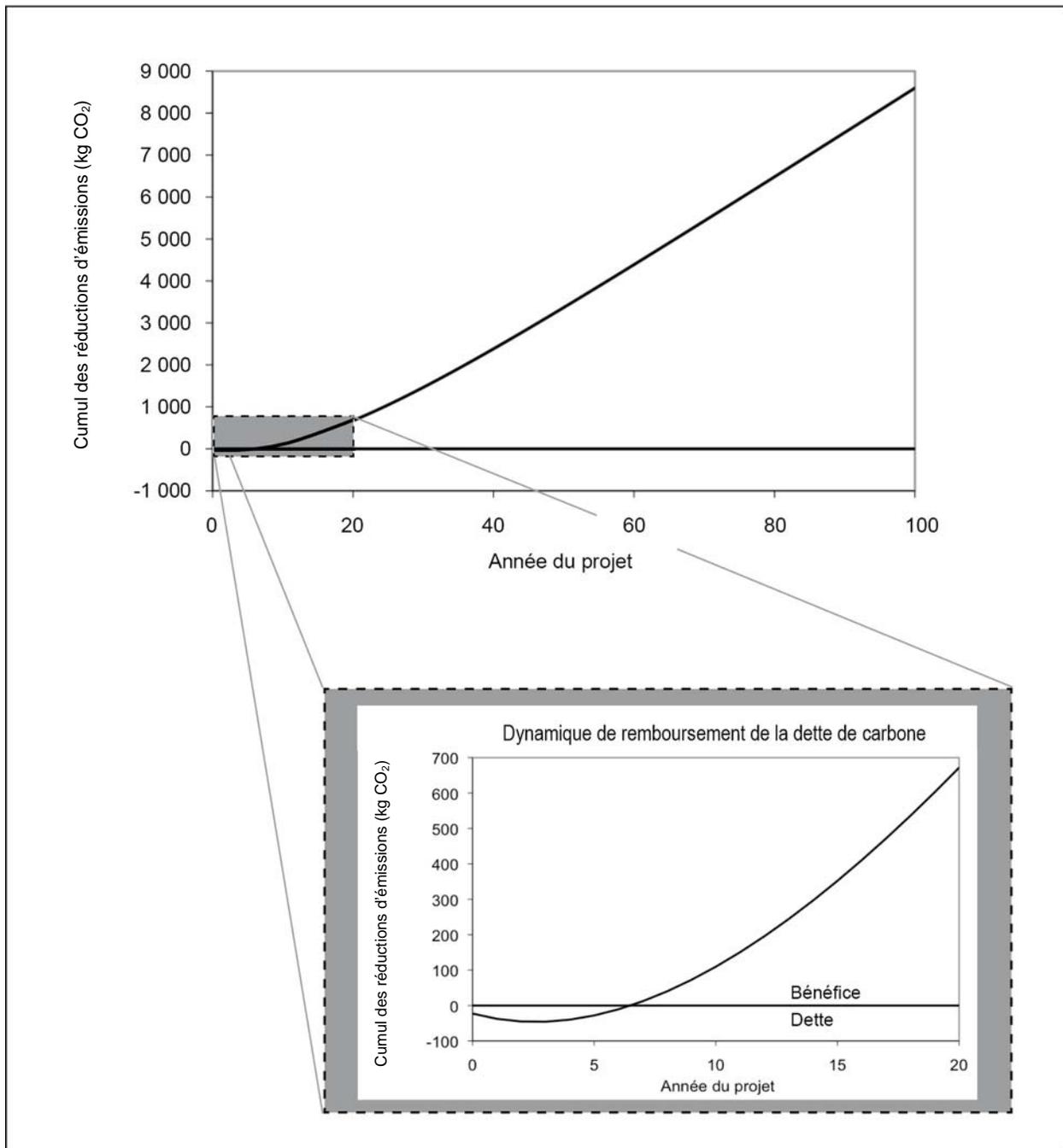


Figure 2 Cumul des réductions d'émissions de CO₂ engendrées dans l'exemple type

Conclusion

L'utilisation de la biomasse forestière à des fins de production de bioénergie engendre des bénéfices de réductions d'émissions de CO₂ si cette utilisation remplace celle des combustibles fossiles. L'enjeu est donc de déterminer l'ampleur de ces bénéfices et le temps nécessaire pour les obtenir. Nous savons que les réductions d'émissions sont obtenues plus rapidement quand la production d'énergie est faite à partir d'une biomasse qui se décompose rapidement, telle que la majorité de la biomasse résiduelle, ou de la biomasse produite particulièrement à des fins de production d'énergie. Les options technologiques modulent aussi l'ampleur et le temps de génération de ces bénéfices.

Une politique efficace pour la lutte contre les changements climatiques devrait favoriser d'abord les sources de biomasse qui produisent rapidement des bénéfices faciles à quantifier. Elle devrait également favoriser les modes de conversion en énergie les plus efficaces et le remplacement des combustibles fossiles à forte émission de CO₂ par unité d'énergie. C'est, notamment, sur ces bases qu'est fondée la toute nouvelle politique sur la bioénergie de l'État du Massachusetts (Massachusetts Department of Energy Resources, 2011).

Par ailleurs, la transition du système d'approvisionnement énergétique se fera, selon toute probabilité, sur plusieurs décennies. Comme le développement d'une filière de la bioénergie vigoureuse et efficace ne peut reposer que sur la création d'un marché dynamique, il est donc opportun de considérer un portefeuille d'options de bioénergie qui inclut également les options dont les bénéfices climatiques sont prévus à plus long terme. Ces options devront évidemment occuper initialement une portion réduite et adéquate du portefeuille. Leur déploiement graduel permettra alors la transformation souhaitable de l'infrastructure énergétique en un système basé sur les énergies renouvelables.

Aussi, en plus des bénéfices qu'elle apporterait en matière de réduction des émissions de GES, la biomasse forestière a le potentiel de contribuer à l'atteinte d'autres objectifs sur le plan social ou économique, tels que l'autonomie énergétique québécoise, la réduction des frais liés au chauffage institutionnel, la création ou le maintien d'emplois en région, l'augmentation de la viabilité du secteur forestier par la création d'un nouveau produit et la récupération accrue des déchets. À lui seul, ce groupe de bénéfices pourrait justifier la mise en œuvre de projets sur la bioénergie forestière. Néanmoins, si on désire justifier ces projets sur la base de la réduction des émissions de CO₂, ils devront toujours être appuyés par une analyse rigoureuse de leur contribution à la lutte contre les changements climatiques.

Bibliographie

- AGENCE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE (2009). *Facteurs d'émission et de conversion – Calcul des émissions de GES*, [Québec], gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 1 p.
- AIR RESOURCE BOARD (2009). *Detailed California-Modified GREET Pathway for Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD) from Average Crude Refined in California*, Stationary Source Division, Air Resources Board, 48 p.
- BERNIER, P., et D. PARÉ (2012). "Using Ecosystem CO₂ Measurements to Estimate the Timing and Magnitude of Greenhouse Gas Mitigation Potential of Forest Bioenergy", *GCB Bioenergy*, [En ligne].
[<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1757-1707.2012.01197.x/full>].
- BIRD, D. N., et autres (2011) "Zero, One, Or In Between: Evaluation of Alternative National and Entity-Level Accounting for Bioenergy", *GCB Bioenergy*, vol. 4, n° 5, p. 576–587.
- CHERUBINI, F. (2010). "GHG Balances of Bioenergy Systems – Overview of Key Steps in the Production Chain and Methodological Concerns", *Renewable Energy*, vol. 35, n° 7, p. 1565-1573.
- CHERUBINI, F., A. H. STRØMMAN et E. HERTWICH (2011). "Effects of Boreal Forest Management Practices on the Climate Impact of CO₂ Emissions from Bioenergy", *Ecological Modelling*, vol. 223, n° 1, p. 59-66
- CHUM, H., et autres (2011). "Sustainability Indicators – A Review of the Literature", dans AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS, *2011 Spring Meeting and 7th Global Congress on Process Safety, Conference Proceedings, Chicago, Illinois, 13-17 March 2011*, p. 3.
- DESJARLAIS, C., et autres (2010). *Ouranos – Savoir s'adapter aux changements climatiques*, Montréal, 128 p.
- DYMOND, C. C., et autres (2010). "Future Quantities and Spatial Distribution of Harvesting Residue and Dead Wood from Natural Disturbances in Canada", *Forest Ecology and Management*, vol. 260, n° 2, p. 181-192.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2010). *EN20 Combined Heat and Power (CHP)*, [En ligne]. [www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en-20-combined-heat-and-nbsp-en20] (Consulté le 14 février 2012).
- GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (2011). *Qui sommes-nous?*, [En ligne]. [http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml] (Consulté le 25 septembre 2011).
- GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (2007). *Climate Change 2007 – Synthesis Report*, Geneva, Switzerland, 104 p.

- HABERL, H., et autres (2012). "Correcting a Fundamental Error in Greenhouse Gas Accounting Related to Bioenergy", *Energy Policy*, vol. 45, n° 1, p. 18–23.
- HOLTSMARK, B. (2012). "Harvesting in Boreal Forests and the Biofuel Carbon Debt", *Climatic Change*, vol.112, n° 2, p. 415–428
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2011). *World Energy Outlook*, OCDE/IEA, France, 664 p.
- KERR CASPER, J. (2010). *Fossil Fuels and Pollution: The Future of Air Quality*, New-York, USA Facts-On-File publishers, 268 p.
- MANOMET CENTER FOR CONSERVATION SCIENCES (2010). *Biomass Sustainability and Carbon Policy Study*, Report to the Commonwealth of Massachusetts Department of Energy Resources, Walker, T. (Éd.), Brunswick, Maine, 182 p. (Natural Capital Initiative Report; NCI-2010-03).
- MANUILOVA, A., et M. JOHNSTON (2011). *Greenhouse Gas Emissions Assessment. The Substitution of Fossil Fuels with Woody Biomass in the Northwest Territories*, Saskatoon, Saskatchewan Research Council, Environment and Forestry, 90 p. (SRC Publication; 13069-1C11).
- MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES (2011). *Woody Biomass Eligibility – Summary of Regulatory Changes, MA Renewable Energy Portfolio Standard (RPS), 225 CMR 14.00, Draft Regulation filed on May 3, 2011*, [Boston], 5 p.
- MCKECHNIE, J., et autres (2011). "Forest Bioenergy or Forest Carbon ? Assessing Trade-Offs in Greenhouse Gas Mitigation with Wood-Based Fuels", *Environmental Science & Technology*, vol. 45, n° 2, p. 789-795.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (2010). *Stratégie d'aménagement durable des forêts – Proposition pour la consultation publique*, Québec, gouvernement du Québec, 90 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (2009). *Vers la valorisation de la biomasse forestière – Un plan d'action*, Québec, gouvernement du Québec, 23 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (2008). *La forêt, pour construire le Québec de demain – Document synthèse*, Québec, gouvernement du Québec, 13 p.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (2011). *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles – Plan d'action 2011-2015 – Allier économie et environnement*, Québec, gouvernement du Québec, 34 p.
- MOOMAW, W., et autres (2011). "Introduction", dans EDENHOFER, O., et autres (éd.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, New-York, USA, Cambridge University Press.
- NABUURS, G. J., et autres (2007) "Forestry", dans METZ, B., et autres (éd.), *Climate Change 2007: Mitigation – Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [En ligne], New York, NY, USA. Cambridge University Press. [www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch9.html].

- PARÉ, D., et autres (2011). « Le potentiel de la biomasse forestière comme source d'énergie pour le Canada », *The Forestry Chronicle*, vol. 87, n° 3, p. 345-350.
- REPO, A., M. TUOMI et J. LISKI (2010). "Indirect Carbon Dioxide Emissions from Producing Bioenergy from Forest Harvest Residues", *Global Change Biology Bioenergy*, vol. 3, n° 2, p. 107-115.
- RÉSEAU LIGNICULTURE QUÉBEC (2008). *Mémoire du Réseau Ligniculture Québec – Présenté au ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec – Consultation publique « La forêt, pour construire le Québec de demain »*, Québec, 15 p.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (2010a). *Is Forest Bioenergy Good for the Environment ?*, Canadian Forest Service Science, 3 p.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (2010b). « Les plantations d'arbres à croissance rapide comme cultures de remplacement », *Nouvelles Express*, Bulletin 37, Sault-Sainte-Marie, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, 2 p.
- RIGHELATO, R., et D. V. SPRACKLEN (2007). "Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests ?", *Science*, vol. 317, n° 5840, p. 902.
- SCARLAT, N., et J.-F. DALLEMAND (2011). "Recent Developments of Biofuels/Bioenergy Sustainability Certification: A Global Overview", *Energy Policy*, vol. 39, n° 3, p. 1630-1646.
- SEARCHINGER, T. D., et autres (2009). "Fixing a Critical Climate Accounting Error", *Science*, vol. 326, n° 5952, p. 527-528.
- THIFFAULT, E., et autres (2011). "Effects of Forest Biomass Harvesting on Soil Productivity in Boreal and Temperate Forests – A Review", *Environmental Reviews*, vol. 19, p. 278-309.
- VAN DAM, J., M. JUNGINGER et A. P. C. FAAIJ (2010). "From the Global Efforts on Certification of Bioenergy Towards an Integrated Approach Based on Sustainable Land Use Planning", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 9, p. 2445-2472