

Caractérisation des modèles types de chaînes de valeur de la biomasse forestière

Ayaovi Locoh, Évelyn Thiffault, Simon Barnabé et Luc Bouthillier

Volume 22, numéro 1, avril 2022

Varia

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1092283ar>

DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.35194>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Locoh, A., Thiffault, É., Barnabé, S. & Bouthillier, L. (2022). Caractérisation des modèles types de chaînes de valeur de la biomasse forestière. *VertigO*, 22(1), 1-32. <https://doi.org/10.4000/vertigo.35194>

Résumé de l'article

La bioénergie produite à partir de la biomasse forestière est considérée comme un outil essentiel de la transition énergétique et de lutte contre le changement climatique. La filière de la bioénergie forestière est bien implantée dans certaines juridictions à travers le monde, particulièrement pour le chauffage ; elle est cependant encore à un stade précoce de développement dans des régions qui comptent néanmoins un secteur forestier important, dont le Québec. En vue de documenter le développement de la bioénergie forestière en émergence dans ces régions, cette étude analyse les modèles types de chaînes de valeur de la biomasse forestière pour le chauffage des bâtiments institutionnels et commerciaux au Québec. Il a été possible de décrire cinq modèles types de chaîne de valeur en rapport avec leur potentiel de création de valeur économique et leur avantage comparatif. Parmi les produits, les plaquettes forestières sont le combustible le plus utilisé après les granules de bois conventionnels. Les granules de bois torréfiés sont voués à l'exportation. Cela dit, les prix observés actuellement dans la région d'étude sont ceux d'un marché encore très restreint, dans lequel seules les sources de biomasse les plus abordables sont présentement mobilisées ; les coûts d'approvisionnement devraient donc évoluer avec une mobilisation supplémentaire de la matière première, mais également avec l'apprentissage technologique et institutionnel. Cette étude révèle l'importance du comportement et de l'harmonisation des acteurs au sein des chaînes de valeur, mais également l'influence de l'environnement externe, sur l'efficacité des chaînes et la compétitivité des produits de la bioénergie.



Caractérisation des modèles types de chaînes de valeur de la biomasse forestière

Ayaovi Locoh, Évelyne Thiffault, Simon Barnabé et Luc Bouthillier

Introduction

- ¹ Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) signale que l'accroissement anthropique des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère observée au cours des dernières décennies, est très probablement la cause de plus de la moitié de l'augmentation de la température moyenne mondiale (GIEC 2013). Ainsi, le GIEC estime que les émissions nettes mondiales de gaz à effet de serre devraient être réduites de 40 à 70% par rapport à 2010 d'ici 2050, et être proches de zéro d'ici 2100 (GIEC 2013). Le potentiel des forêts et du secteur forestier à contribuer à l'atténuation du changement climatique est reconnu dans la littérature scientifique (Marland et al., 2003 ; Pacala et Socolow, 2004 ; Kurz et al., 2008). Les attentes en matière de forêts et de gestion forestière sont d'autant plus élevées (UNFCCC, 2015). Ces attentes sont basées sur le boisement, la réduction des émissions de la déforestation, et la gestion forestière pour séquestrer le CO₂ atmosphérique. Le stockage du carbone dans les produits ligneux de longue durée et la substitution de combustibles fossiles par la bioénergie à partir de biomasse forestière font également partie des solutions envisagées (Nabuurs et al., 2007).
- ² La biomasse forestière disponible pour la bioénergie provient essentiellement de quatre sources. On compte d'abord la biomasse primaire constituée des sous-produits provenant de l'aménagement des forêts (branches, houppiers, tiges ou sections de tiges sans valeur commerciale, etc.). La deuxième source est la biomasse secondaire, soit les sous-produits provenant de procédés industriels de transformation du bois, à savoir les écorces, sciures de bois, rabotures, copeaux, liqueur noire, etc. La biomasse tertiaire comprend quant à elle les déchets de travaux de construction et de rénovation, les

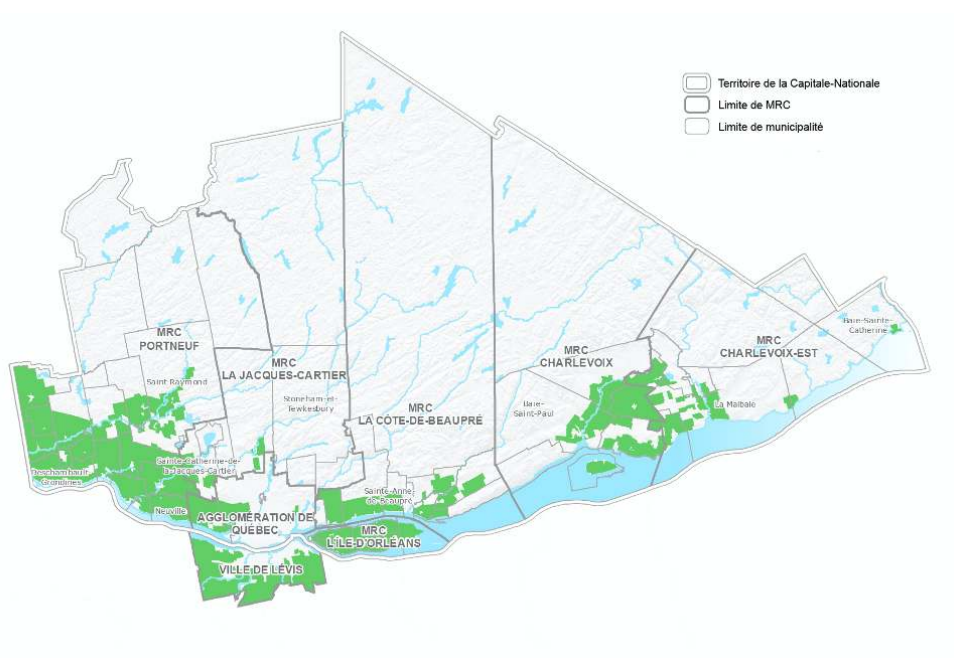
rebutis d'opérations de démolition et ainsi que les autres produits du bois post-consommation). Enfin, on appelle biomasse quaternaire la matière première issue des arbres de plantations en courtes rotations (Röser et al., 2008).

- 3 La récolte et la valorisation de la biomasse forestière sous forme d'énergie sont communes dans plusieurs pays d'Europe (Paré et al., 2016). À l'inverse, au Québec, le développement de chaînes de valeur de la biomasse forestière n'en est qu'au stade embryonnaire (MERN, 2020), malgré la présence d'un secteur forestier mature et de l'abondance élevée de la biomasse (Mansuy et al., 2017). Les estimations montrent que dans la filière du chauffage des bâtiments institutionnels et commerciaux à elle seule, la substitution des énergies fossiles par la biomasse forestière permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 1.7 millions de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) par rapport à 1990, et ce avec l'utilisation d'à peine 20% du potentiel de biomasse forestière disponible (Côté et al., 2008). Aussi, des estimations faites à l'échelle provinciale évaluent à -80,9 Mégatonnes d'équivalent-CO₂ en 2089 le potentiel de réduction d'un scénario d'intensification de l'aménagement forestier et de développement de la bioénergie (Beauregard et al., 2019).
- 4 Cependant, une des barrières principales à l'adoption et au déploiement de la biomasse forestière comme source d'énergie est la complexité, réelle ou perçue, de l'organisation de la chaîne de valeur de la biomasse forestière (Thiffault et al., 2016). Une des principales faiblesses associées à la bioénergie forestière est l'hétérogénéité des sources de biomasse (en termes de quantité et de qualité). De plus, l'approvisionnement en biomasse nécessite une mobilisation locale et régionale importante et la coordination de plusieurs acteurs (Windisch et al., 2013), souvent sur un vaste territoire à la fois rural et urbain, entraînant ainsi de nombreuses interfaces avec le milieu d'accueil, le tout régi par un cadre juridique complexe. Or, cette complexité de la bioénergie offre aussi des opportunités de développement économique et social, notamment en termes de création d'emplois, de richesse et de mobilisation citoyenne autour de chaînes de valeur en tant que projets collectifs de développement durable.
- 5 L'approche « chaîne de valeur » décrit une série d'activités à valeur ajoutée. Cette série comprend les activités principales directement liées à la fabrication, la vente et la distribution, ainsi que les activités telles que la planification, les finances, la recherche et développement, et la gestion des ressources humaines (Porter, 1985). Cette désagrégation des fonctions peut également être appliquée à un système inter-organisationnel, de l'approvisionnement des matières premières à la consommation (Shank et Govindarajan, 1992)
- 6 En vue de documenter le développement de la bioénergie forestière dans des régions d'émergence de cette filière, la présente étude visait à développer une typologie des modèles types de chaînes de valeur de la biomasse forestière au Québec, en s'intéressant particulièrement à la production de chaleur incluant la cogénération et les procédés industriels dans le secteur institutionnel, commercial et industriel. Ces applications sont en effet à un stade de maturité technologique avancée, favorisant leur pénétration dans de nouveaux marchés. L'objet de la recherche était de décrire de façon détaillée les modèles types de chaînes de valeur de biomasse forestière en termes de produits énergétiques, d'acteurs impliqués, de sources de biomasse, de secteurs d'utilisation, de taille de systèmes de bioénergie, de capacité de production et de potentiel de développement.

Matériels et méthodes

- 7 La région de la Capitale-Nationale du Québec a été utilisée comme cadre pour notre étude. L'aire d'étude considérée inclut les territoires des villes de Québec et Lévis, ainsi que ceux des Municipalités régionales de Comté de Charlevoix, Charlevoix-Est, La Côte-de-Beaupré, L'Île-d'Orléans, La Jacques-Cartier et de Portneuf (Figure 1). Cette étude s'inscrit dans une démarche inductive, par une approche qualitative. Contrairement à l'approche quantitative, l'approche qualitative s'appuie généralement sur un échantillon limité en taille, dont chaque unité est analysée plus profondément (Miles et al., 2014). De plus, l'analyse choisie dans le cadre de cette recherche est à caractère exploratoire. En effet, la recherche qualitative de nature exploratoire permet de se familiariser avec les acteurs du milieu d'activité et avec leurs préoccupations. Elle peut aussi servir à déterminer les impasses et les blocages susceptibles d'entraver une recherche à grande échelle. Enfin, elle permet de mieux capter la perception des acteurs des chaînes de valeur et ainsi recueillir leur propos sur les produits (Trudel et al., 2007).
- 8 La recherche documentaire, l'observation participante et les entrevues semi-dirigées ont été utilisées. Afin de s'assurer de leur concordance, une triangulation de l'ensemble des résultats a également été réalisée, en comparant les résultats les uns aux autres (Silverman, 2011). La triangulation des résultats des différentes méthodes constitue une forme d'interactions, de confrontations et de recoupements des points de vue, afin de vérifier dans quelle mesure les différentes analyses de l'étude vont dans le même sens (Denzin et Lincoln, 2007 ; Miles et al., 2014). Elle permet aussi de s'assurer que les résultats obtenus ne sont pas biaisés par les valeurs personnelles (Baribeau, 2019).

Figure 1. Territoires d'étude des chaînes de valeur de la biomasse forestière / Study areas of forest biomass value chains



Communauté métropolitaine du Québec

- 9 Afin de mieux cerner le contexte dans lequel évoluent les chaînes de valeur de la biomasse forestière et d'identifier les acteurs et les segments d'activités qui les relient, un large éventail de documents a été consulté (Grawitz, 2000 ; Morrissette et al., 2014). Divers articles scientifiques (Palosuo et al., 2010 ; Shabani et al., 2013 ; Cambero et Sowlati, 2014 ; Yemshanov et al., 2014 ; Martire et al., 2015 ; Mansuy et al., 2015 ; Dessbesell et al., 2017). Les chaînes d'approvisionnement de la biomasse forestière ainsi que la documentation sur les produits de la biomasse forestière (Chartier et al., 2006 ; Recyc-Québec, 2015 ; Vision Biomasse Québec, 2017 ; Recyc-Québec, 2018) ont été étudiés. De plus, les documents produits par le gouvernement du Québec ainsi que par la Communauté métropolitaine de Québec ont aussi offert une source complémentaire d'information.
- 10 L'observation participante a été réalisée au cours de diverses rencontres avec des représentants des organisations des chaînes de valeur de la biomasse forestière et acteurs de projets sur le chauffage à la biomasse forestière de la zone d'étude. Les représentants ont été choisis en fonction de la zone d'étude et des produits de la biomasse forestière. Cette démarche a été effectuée au cours de la période couvrant l'hiver et l'été 2019. Les différentes rencontres ont permis d'exécuter les étapes de l'observation participante - l'entrée sur le terrain, la collecte des données et la consultation des sources (Gauthier et al., 2016). Elle a également permis de retracer l'enchaînement des actions et des interactions (Hilgers, 2013). Lorsqu'elle est combinée avec la recherche documentaire et les entrevues, l'observation participante permet de comprendre le sens, le processus et la dynamique (Gauthier et al., 2016). De même, l'observation participante est souvent plus appropriée que l'observation directe pour l'étude des organisations qu'à celle des individus (Silverman, 2011 ; Gauthier et al., 2016).
- 11 Bien qu'il existe plusieurs types d'entrevues, qui se distinguent par le degré de liberté laissé aux interlocuteurs et le niveau de profondeur de l'échange, l'entrevue semi-dirigée permet de cerner de façon précise l'expérience, le savoir et l'expertise des participants, de même que leurs perspectives individuelles sur le sujet de la recherche (Savoie-Zajc et Karsenti, 2000). L'entrevue semi-dirigée était constituée de 14 questions subdivisées en trois blocs : i) la nature des informateurs, ii) les perceptions et caractéristiques des différents produits et iii) la validation des processus clés des différentes chaînes (voir annexe). Les questions étaient conçues suivant la logique du *Porter five forces model* (Porter, 1998). Il s'agit d'un modèle qui décrit les cinq facteurs clés de succès d'une chaîne de valeur des produits d'une organisation/entreprise. Il constitue un outil simple pour identifier les facteurs qui déterminent la durabilité d'une chaîne de valeur.
- 12 La plupart des participants sont issus de la zone d'étude. Il s'agit des représentants des organisations du marché et de l'industrie de la bioénergie forestière. Ces participants occupent des postes de directeur, de chef de service ou de professionnel au siège social de leur organisme d'activité. L'échantillon sélectionné est non probabiliste, ce qui signifie que les participants ne sont pas choisis à l'aide d'un tirage aléatoire, mais plutôt par la méthode « boule de neige ». Ainsi, à partir d'un participant sélectionné pour son expertise dans l'industrie de la bioénergie forestière, trente autres ont été invités à participer à l'étude. En fin de compte, vingt participants ont été retenus. Parmi ces vingt participants, dix-sept répondants (soit 85%) ont des connaissances sur tous les aspects des chaînes de valeur de la biomasse forestière et ont répondu au questionnaire

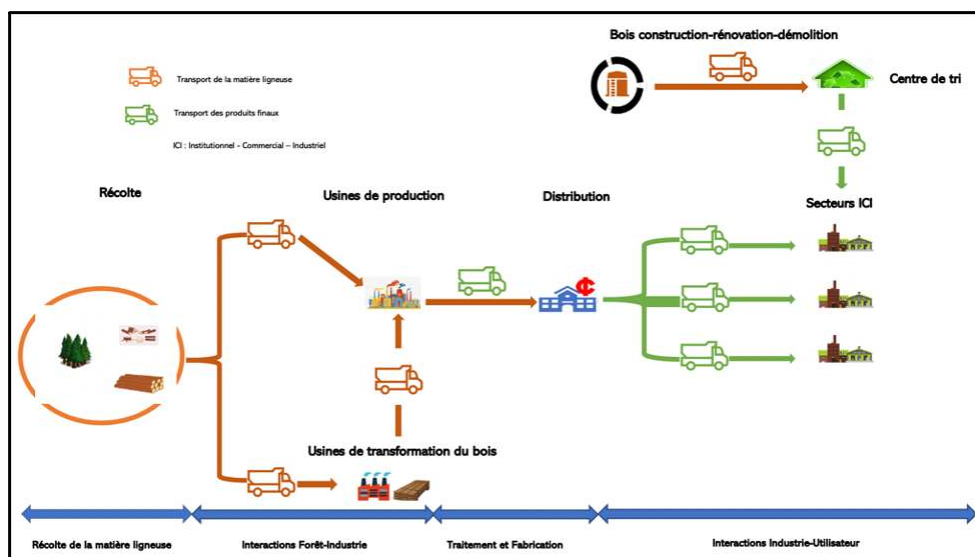
en entier. Les 15% restants ont répondu uniquement aux questions concernant directement leur expertise. Il est important de mentionner que la représentativité statistique n'est pas visée dans cette étude. C'est pourquoi le principe théorique de saturation n'a pas été respecté (Glaser et al., 2010).

- 13 L'analyse de contenu s'applique à des discours diversifiés et fondés sur la déduction et l'inférence (Wanlin, 2007 ; Gauthier et al., 2016). Elle se déroule en trois étapes : la préanalyse, l'exploitation du matériel et le traitement des résultats, et enfin l'inférence et l'interprétation. La préanalyse est l'étape où les idées sont organisées de façon intuitive afin d'aboutir à un plan d'analyse. Elle a permis ici de choisir les documents d'analyse, de formuler des hypothèses et objectifs, et enfin d'élaborer des indicateurs sur lesquels l'interprétation finale doit être basée (Savoie-Zajc et Karsenti, 2000). À cette étape, les documents analysés étaient des verbatim issus des entrevues semi-dirigées. Ensuite, une lecture flottante a été effectuée afin de recueillir les impressions (Savoie-Zajc et Karsenti, 2000). Après plusieurs lectures des verbatim, les entretiens ont été codés et les codes introduits dans un tableur (Microsoft Excel). Ensuite, une synthèse des réponses provenant des discours des acteurs a été effectuée (Wanlin, 2007). Les données ont été découpées puis regroupées afin de mener plus loin l'analyse. Enfin, à l'étape du traitement, de l'interprétation et de l'inférence, les données ont été traitées avec des éléments statistiques simples tels que le calcul des moyennes, des écarts-types et des pourcentages à partir du logiciel R afin d'assurer la validité et la significativité des données. L'interprétation a été faite en s'appuyant sur les éléments de la catégorisation. L'inférence a permis de passer à la validation des résultats escomptés en se basant sur des éléments d'interprétation (Wanlin, 2007).
- 14 La caractérisation des modèles types de chaînes de valeur de la biomasse forestière a été réalisée à partir des résultats des analyses précédentes, en se basant sur le cadre conceptuel de Fearne et al. (2012). Ce cadre propose une théorie des chaînes de valeur qui explicite les dimensions à utiliser afin de s'assurer que les chaînes de valeur contribuent à la création de valeur durable (Fearne et al., 2012). La démarche méthodologique sur l'élaboration de la typologie a permis de distinguer des groupes d'éléments considérés comme homogènes au sein de l'ensemble des informations (Wanlin, 2007).

Résultats et discussions

- 15 La recherche documentaire, l'observation participante et les communications personnelles ont permis d'identifier et de tracer les chaînes de valeur de la biomasse forestière à partir d'impressions structurées. À partir des analyses préliminaires, une chaîne de valeur générique a été bâtie, permettant de montrer les principaux acteurs et les flux de matière (Figure 2). L'analyse des données recueillies lors des entrevues semi-dirigées a permis quant à elle d'apporter plus de précisions sur la structure, la coordination et la performance des chaînes de valeur (voir Figures A1 à A5 à l'Annexe 1).

Figure 2. Structure globale des chaînes de valeur de la biomasse forestière / Overall structure of forest biomass value chains



- 16 Cette recherche étant essentiellement de type exploratoire, les résultats proviennent donc principalement de l'analyse des données des entrevues. C'est pourquoi une présentation détaillée des réponses des 20 participants reliées aux questions a été fournie dans les sections suivantes.

Nature des informateurs et perception des acteurs

- 17 Les participants ont répondu à la question principale suivante : *Quel est votre lien avec le secteur de la bioénergie?* Le degré d'implication des participants dans la bioénergie est un facteur déterminant pour la réalisation de la typologie. En effet, un participant très impliqué aura une plus grande maîtrise du fonctionnement de sa chaîne d'appartenance qu'un participant moins impliqué, avec une fonction un peu plus périphérique par rapport à la chaîne. La plupart des participants à l'étude étaient des représentants des organisations pionnières de l'industrie de la bioénergie forestière au Québec.
- 18 La deuxième question de l'entrevue portait sur les perceptions des chaînes de valeur de la biomasse forestière: « Que pensez-vous des différents schémas que je vous présente ? (Écorces, Bois post-consommation, Plaquettes forestières, Granules de bois conventionnels et les Granules de bois torréfiés) » ? Cette question a été révélatrice de la place des produits en termes d'utilisation de la biomasse forestière pour le chauffage au Québec. Il a été possible d'en déduire les fins d'utilisation, les secteurs et les conditions d'utilisation de ces différents produits. En effet, d'après les participants, les principaux utilisateurs de la biomasse forestière au Québec sont des industriels, en particulier les centrales de cogénération et les industriels de pâtes et papiers et bois de sciage qui s'en servent pour le séchage ou pour produire de la vapeur à des fins d'application industrielle. Le bois de post-consommation s'utilise seulement pour les applications industrielles au Québec : actuellement, il est utilisé pour l'énergie dans les centrales thermiques et industrielles de grandes capacités qui ont obtenu les autorisations environnementales appropriées. Toutefois, les fabricants de panneaux utilisent la qualité premium du bois post-consommation dans la fabrication des

panneaux. À l'heure actuelle, le marché de granules de bois torréfié se limite aux clients industriels qui veulent remplacer le charbon. Comme indiqué par un participant, « il y a une éducation à faire : les utilisateurs sont habitués aux granules de bois traditionnels et ont tendance à percevoir la qualité du granule par la couleur ».

- 19 Un conseiller en bioénergie (entretien réalisé à Québec, mars 2019) perçoit par exemple « les plaquettes forestières comme étant un marché en démarrage. Il prend tranquillement de l'essor et est plus destiné au marché régional. Les écorces sont beaucoup utilisées par les usines elles-mêmes; cela va donc beaucoup plus dans le secteur industriel. Les granules de bois torréfiés constituent un marché à l'état embryonnaire au Québec et sont plus destinés à l'exportation ». Pour sa part un conseiller en développement de la bioénergie (entretien réalisé à Québec, février 2019) mentionne que « les notions d'autorisation du Ministère de l'Environnement par rapport à la chaîne de valeur bois post-consommation viennent influencer la chaîne dans tout son ensemble ». Le participant (Directeur du groupe produits de bois et accès aux marchés d'une organisation spécialisée dans la promotion du bois, entretien réalisé à Québec, février 2019) dans la promotion rajoute qu'« au Québec, pour avoir le droit de brûler du bois post-consommation, il faut avoir un incinérateur de 3 mégawatts et plus ».
- 20 Selon le directeur d'une filière de chauffage à la biomasse forestière (entretien réalisé à Québec, février 2019) « les granules de bois sont issus des produits conjoints de sciage, c'est-à-dire les copeaux, les écorces, les sciures et les rabotures. Le granule torréfié est un produit qui semble être très intéressant et le marché est en développement au Québec. Cependant, le prix des granules de bois torréfiés est très élevé et les utilisateurs, notamment les industriels, ne sont pas prêts à payer la différence avantage/coût de ce produit. Mais l'utilisation augmente de façon graduelle. À l'échelle institutionnelle, l'utilisation est encouragée par des programmes gouvernementaux ». Enfin, un chercheur en bioénergie (entretien réalisé par l'application Zoom, février 2019) pense que « le problème des approvisionnements en biomasse est le même pour tous les produits. En ce qui concerne les applications de bioénergie, il y a encore beaucoup de mythes. De plus, il y a des questions d'image, de coût et de risque technologique qui ne sont pas encore bien maîtrisées ».
- 21 D'une façon générale, plusieurs participants ont affirmé que les granules de bois torréfiés sont très peu utilisés actuellement au Québec compte tenu du prix et du coût de production du produit. Toutefois, ce type de granule est très convoité par les industriels, car il possède presque toutes les qualités du charbon et peut remplacer ce dernier sans occasionner des coûts additionnels d'équipements. Contrairement aux granules de bois torréfiés, les granules de bois conventionnels sont utilisés au Québec dans presque tous les secteurs. Cependant, les plaquettes forestières sont plus en demande par rapport aux granules de bois conventionnels. Les écorces, quant à elles, sont presque exclusivement utilisées dans les centrales thermiques et de cogénération, notamment pour le séchage. Quant à l'utilisation du bois post-consommation au Québec, plusieurs participants ont considéré que les exigences du gouvernement en matière de protection de l'environnement constituent une barrière à l'émergence de cette chaîne. Bien que la matière première soit disponible en quantité, les exigences de qualité du produit entraînent des coûts que la plupart des utilisateurs ne sont pas prêts à payer.

- 22 Afin d'obtenir des informations sur les sources possibles d'approvisionnement en matières premières, la question suivante a été posée aux participants : « Dans la région de la Capitale-Nationale, quelles sont les principales sources de biomasse permettant la production de ces types de produits (Écorces, Bois post-consommation, Plaquettes forestières, Granules de bois conventionnels et Granules de bois torréfiés) » ? La synthèse des résultats est consignée dans le tableau 1. En déduction, un directeur d'une filière de chauffage à la biomasse forestière (entretien réalisé à Québec, février 2019) affirme que « les sources de provenance des matières premières pour la production des granules de bois torréfiés sont les mêmes que les granules de bois conventionnels. Ces matières premières proviennent principalement des sciures et rabotures des usines de sciage et des usines de deuxième et troisième transformation comme des usines de planchers, de portes et fenêtres qui produisent notamment des résidus de très bonne qualité. La biomasse provenant des forêts est quelquefois aussi utilisée, de même que le bois post-consommation de première qualité. Les écorces sont obtenues par le biais des scieries. Les plaquettes forestières proviennent des bois non marchands des forêts publiques et privées du Québec et aussi de l'importation en provenance des États-Unis ». Quant aux bois post-consommation, un conseiller en développement de la bioénergie (entretien réalisé à Québec, février 2019) indique que « les bois post-consommation proviennent principalement des centres de tri. En effet, les flux de bois des secteurs de la construction, de la rénovation et de la démolition (connus sous leur acronyme CRD) sont principalement dirigés vers les centres de tri pour servir par la suite de bois post-consommation ». Toutefois, « le défi quant aux bois issus de ces secteurs est d'effectuer un bon tri » indique un directeur de section d'une institution forestière (entretien réalisé à Québec, février 2020).
- 23 Le résultat des analyses statistiques des coûts moyens approximatifs des matières premières sont regroupées dans le tableau 1 (en annexe). La majorité des acteurs a évoqué le coût de transport lié à la distance entre le site d'approvisionnement (notamment la forêt) et le site de production comme cause principale du coût élevé de certaines matières premières.

Processus clés et interconnexion des acteurs de la chaînes de valeur de la biomasse forestière

- 24 Il s'agit d'un bloc subdivisé en cinq sous-questions se présentant comme suit : « Que pensez-vous des différentes étapes des chaînes de valeur des produits présentées dans les schémas? Sont-elles complètes? Avez-vous des commentaires, révisions, ajouts à formuler » ? Les acteurs consultés étaient d'accord pour dire que les chaînes de valeur de la biomasse forestière peuvent être divisées en quatre modules, à savoir : i) Gestion des ressources forestières, ii) Interactions forêt-industrie, iii) Traitement et fabrication, et enfin iv) Interactions industrie-utilisateur. Cependant, la chaîne de valeur du bois post-consommation n'inclut que les modules « Traitement et fabrication » et « Interactions industrie-utilisateur ». « Pourriez-vous préciser les acteurs impliqués dans chaque module de la chaîne? » Les réponses à cette sous-question sont présentées dans le tableau 2 (en annexe) en lien avec les modules et les différentes chaînes de valeur.
- 25 Les résultats des deux sous-questions sur les usages, les secteurs et sous-secteurs d'utilisation des produits finaux sont consignés dans le tableau 3 (en annexe). Enfin, les

résultats d'analyse des données (moyennes/étendues des valeurs) fournies par les participants portant sur le prix moyen des produits finaux au sein de la région de la Capitale Nationale sont consignés dans le tableau 4 (en annexe). Ce tableau présente également la taille des systèmes de production d'énergie ainsi que les potentiels de production de chacun des produits.

Typologie des chaînes de valeurs

- 26 L'analyse de discours des participants à partir des verbatim des entrevues a permis de produire une typologie des chaînes de valeur de la biomasse forestière. L'analyse de discours a permis d'établir les déterminants des types de rôles et de fonctions que les chaînes de valeur assurent ; ces types sont inspirés par l'étude de Fearne et al. (2012) portant sur les dimensions des chaînes de valeur durables. La première dimension évalue le niveau de la concurrence entre les chaînes de valeur. La deuxième révèle l'étendue des sources de la valeur créée par la chaîne. La troisième s'intéresse à la gouvernance, c'est-à-dire les relations d'autorité et de pouvoir qui déterminent la manière dont les ressources financières, matérielles et humaines sont allouées et circulent dans une chaîne.
- 27 Dans le cadre de la présente étude, afin de faciliter l'analyse du discours des acteurs et d'établir une typologie spécifique aux chaînes de valeur de la biomasse forestière, la première et la troisième dimension ont été regroupées en une seule dimension. Ainsi, cette combinaison a permis d'avoir deux types de dimensions des chaînes de valeur (Figure 3). La première dimension révèle l'étendue des sources de la valeur créée par la chaîne et la deuxième concerne le degré de l'avantage compétitif. Les résultats des entrevues permettent d'établir la typologie des chaînes de valeur de la biomasse forestière au Québec en fonction de ces dimensions : la capacité de production, le coût d'approvisionnement de la matière ligneuse, le prix du produit final, la taille des systèmes de production d'énergie et le potentiel de production de chacun des produits. L'axe vertical (Figure 3) prend en compte la capacité de production, les caractéristiques ainsi que la distribution spatiale et temporelle de la biomasse forestière. Les résultats de l'analyse des entrevues révèlent que la position de la chaîne de valeur d'un produit sur cet axe dépend essentiellement de trois variables : la capacité de production, le coût d'approvisionnement de la matière ligneuse et le prix du produit final de la chaîne considérée. Ainsi, la chaîne de valeur dont l'étendue des sources de la valeur créée est faible est mise à gauche de l'axe; la chaîne de valeur avec une forte étendue des sources de la valeur créée est plutôt classée à droite.
- 28 Les résultats montrent que la disponibilité et le coût de la matière ligneuse sont les déterminants de l'enjeu lié à l'augmentation de la compétition pour l'accès à la matière ligneuse. Cet enjeu constitue un frein pour les fournisseurs de la filière de chauffage à la biomasse forestière. Selon les participants, l'entrée de nouveaux joueurs inquiète les entreprises existantes, puisque l'augmentation du nombre de fournisseurs de biomasse entraîne non seulement une diminution de la taille du bassin de clients potentiels de chaque entreprise, mais aussi une baisse de la probabilité de bénéficier du financement gouvernemental accordé pour les projets de chauffage à la biomasse résiduelle. Cependant, l'augmentation de nouveaux fournisseurs de biomasse sur le marché peut devenir une source d'accroissement de la récupération et de la transformation de la

matière ligneuse par le secteur forestier, générant ainsi une plus grande quantité de résidus pour la bioénergie.

- 29 Par ailleurs, le prix du produit final est aussi au cœur de plusieurs enjeux, dont la réduction des coûts de chauffage, l'apport économique aux municipalités et l'indépendance par rapport aux marchés des combustibles fossiles. Ces enjeux constituent des opportunités pour les municipalités. En revanche, l'enjeu lié à l'approvisionnement de la matière ligneuse en fonction d'appels d'offres est un frein: en effet, le plus bas soumissionnaire diminue considérablement les standards de qualité. L'axe horizontal de la figure 3 regroupe tout ce qui confère à une chaîne donnée un avantage sur les autres chaînes. Ainsi, plus le degré de concurrence d'une des chaînes est jugé faible, plus elle se retrouve au bas de l'axe vertical. L'axe de définition du degré de l'avantage compétitif prend en compte la fonction sociale des acteurs, les besoins énergétiques, le potentiel de production de chacun des produits ainsi que la taille des systèmes de production d'énergie actuels. De l'analyse des données, les résultats montrent que la taille des systèmes de production d'énergie et le potentiel de production de chacun des produits expliquent l'avantage compétitif qu'une chaîne peut détenir sur une autre. Ces deux variables sont interreliées à des enjeux spécifiques rencontrés dans la filière du chauffage à la biomasse forestière au Québec.
- 30 La taille des systèmes de production d'énergie se retrouve au sein des enjeux qui freinent la plupart des acteurs dans le processus du développement de la filière du chauffage à la biomasse. En effet, l'acquisition d'un système de production d'énergie dépend du choix du type de produit final. Or, étant donné que l'industrie de la bioénergie forestière est à l'étape embryonnaire, certains produits ayant une grande puissance énergétique comme les granules de bois torréfiés sont moins demandés. De même, les bois post-consommation sont utilisés en faible proportion compte tenu des réglementations actuelles. La filière de chauffage à la biomasse forestière au Québec fait ainsi face à plusieurs enjeux, alors que la plupart des pays d'Europe et scandinaves ont largement dépassé ces situations (Barreiro et al., 2017). Parmi ces enjeux, on peut citer la mise en place de réglementations ou d'incitatifs économiques par le gouvernement, l'incertitude financière associée à une nouvelle technologie, la normalisation de la biomasse et des chaudières, la compréhension des règlements reliés à l'assainissement de l'atmosphère, le manque de promotion du chauffage à la biomasse forestière et la forte compétition d'autres types d'énergie à faible coût. En considérant les enjeux liés à la création de nouvelles opportunités d'affaires, à la lutte contre le changement climatique et à la meilleure sécurité énergétique, les résultats montrent que les systèmes de production d'énergie constituent une source d'opportunités. En effet, les besoins anticipés d'énergies renouvelables et les normes environnementales en vigueur seraient une source de création de revenus additionnels pour les municipalités et des compagnies industrielles, commerciales et institutionnelles.
- 31 Le croisement des axes permet de caractériser les chaînes de valeur de la biomasse forestière selon quatre quadrants. Ces quadrants permettent de dégager quatre types de chaînes de valeur nommés type I, type II (A et B), type III et type IV.

Figure 3. Typologie des chaînes de valeur de la biomasse forestière / Forest biomass value chain typology



Type I. Chaîne de valeur des plaquettes forestières

- 32 Les plaquettes forestières se démarquent par le fait qu'elles peuvent être produites à partir de bois non écorcé. Dans la région de la Capitale-Nationale, la disponibilité de biomasse forestière a été évaluée pour les territoires de forêt publique et privée. Les volumes facilement récupérables sont majoritairement des sections de tige de moins de 9 centimètres de diamètre, et des branches de plus de 9 centimètres de diamètre. D'après les estimations, ces volumes facilement récupérables s'élevaient à environ 43 400 tonnes métriques anhydres par année pour la forêt publique, 19 200 tonnes métriques anhydres pour les petites propriétés privées de moins de 800 hectares et à 36 500 tonnes métriques anhydres pour les grandes propriétés privées (Communauté métropolitaine de Québec et al., 2017a). Des volumes pourraient aussi être générés par la foresterie urbaine, par exemple à travers les bois affectés par les insectes et maladies (ex. agrile du frêne), et les résidus d'élagage.
- 33 Au Québec, le coût moyen d'approvisionnement de la matière ligneuse est de 27.63 dollars américains par tonne métrique anhydre et le prix moyen d'acquisition du produit final est de 66.34 dollars américains par tonne métrique anhydre. Les données montrent une forte variation du prix des plaquettes forestières, qui s'explique par le taux d'humidité contenu dans la matière ligneuse lors de l'acquisition par l'utilisateur final. Toutefois, le potentiel de production des plaquettes forestières dans la région d'étude est faible (moins de 100 000 tonnes métriques anhydres par année) par rapport à celui des granules de bois conventionnels. Malgré leur faible potentiel de production par rapport aux granules, elles sont mieux adaptées pour la production de chaleur dans

des chaudières ayant une puissance de 70 kilowatts et plus. Au Québec, les plaquettes sont envisagées pour des projets variant entre 80 et 2740 kilowatts.

- 34 Les caractéristiques des plaquettes forestières dépendent essentiellement des fins d'utilisation. Le taux d'humidité des plaquettes varie de 20 à 50% avec une forte variation de la granulométrie. Ainsi, pour un fonctionnement optimal des chaudières de petites et moyennes dimensions, les plaquettes forestières doivent mesurer entre 3 et 63 millimètres (Picchio et al., 2012). Le taux de cendre des plaquettes, quant à lui, varie selon la matière première : le taux de cendre des billes de faible diamètre sans écorces serait inférieur à 0.5%, celui des billes avec l'écorce avoisinerait 1%, tandis que celui des billes avec des branches serait de 1.5% (Elbersen et al., 2016).
- 35 La première étape de production des plaquettes forestières est la récolte. Elle se fait par arbre entier ou par bois tronçonné, mais doit être intégrée aux activités régulières de récolte de bois afin de réduire les coûts. La biomasse est séchée naturellement sur le parterre de coupe ou en bord de chemin afin de réduire sa teneur en eau. Elle est ensuite transportée, préférablement à l'intérieur d'un rayon de 100 kilomètres, soit à l'utilisateur final, soit à un centre de transformation et de conditionnement de la biomasse où elle pourra poursuivre son séchage naturel dans la cour. La biomasse est ensuite fragmentée (il est à noter que la fragmentation pourrait être effectuée en bord de chemin). Elle est ensuite séchée naturellement pendant l'entreposage, puis acheminée aux utilisateurs en fonction de leurs besoins et stockée dans une réserve jusqu'à la combustion.
- 36 Contrairement aux granules, les plaquettes ne sont pas aussi denses en termes d'énergie et elles possèdent un taux d'humidité variable. Par conséquent, leur utilisation est souvent associée à des circuits d'approvisionnement courts, afin de diminuer les coûts de transport. De plus, il est nécessaire de prévoir un espace de stockage de bonnes dimensions afin d'assurer une certaine autonomie au projet. L'utilisation des plaquettes pour le chauffage est recommandée dans les secteurs industriel et institutionnel, notamment dans les églises, les serres, les réseaux de chaleur municipaux, les bâtiments multi-logements ainsi que les usines de transformation alimentaire et de bois. La chaîne de valeur des granules est composée des chaînes de valeur granules torréfiés (type II) et granules conventionnels (Type III).

Type II. Chaîne de valeur des granules conventionnels

- 37 Pour les granules de bois conventionnels, la biomasse utilisable peut être de diverses formes : résidus conjoints du sciage provenant des usines de transformation (écorces, copeaux, planures et sciures), résidus provenant de la récolte de bois dans les forêts publiques et privées (cimes de l'arbre, branches), biomasse de faible qualité provenant d'arbres non commerciaux, et parfois des bois post-consommation de qualité premium provenant des centres de tri. La biomasse est ensuite transportée des usines de transformation du bois vers l'usine de production de granules. Par rapport à la chaîne de valeur des granules de bois torréfiés, la chaîne de granules conventionnels offre un avantage compétitif plus élevé avec une large étendue des sources de la valeur créée. Contrairement aux autres produits finaux qui nécessitent une chaudière à grande puissance, les granules de bois conventionnels sont recommandés pour des chaudières à la biomasse dont la puissance est de 70 kilowatts et plus, dépendamment de l'utilisateur.

- 38 La capacité de production au Québec est de 439 500 tonnes métriques anhydres/année (QWEB, 2018). Plusieurs manufacturiers peuvent alimenter le marché de la région de la Capitale-Nationale. Le prix moyen des granules de bois conventionnels est de 169,53 dollars américains par tonne métrique anhydre. Selon les producteurs, le taux d'humidité de ce type de granule varie entre 4 et 7%. Avec une granulométrie très régulière, son diamètre varie habituellement entre 5 et 7 millimètres et sa longueur maximale est de 10 à 30 millimètres. Le taux de cendre après combustion est habituellement inférieur à 1% (Oberberger et Thek, 2011). La production de ce type de granules compte plusieurs étapes. La matière première est souvent constituée par les résidus conjoints de sciage, de la récolte forestière et des bois non marchands transportés vers l'usine de production de granules. À l'usine, les résidus sont séchés à un taux d'humidité inférieur à 15%, et ce, habituellement dans des séchoirs rotatifs. Ils sont ensuite fragmentés avec un broyeur à marteaux afin de réduire la granulométrie. Il est possible de réaliser l'étape de fragmentation avant le séchage, afin d'adapter la granulométrie des résidus de sciage à l'équipement de séchage. Les granules sont ensuite attendris à la vapeur. Des cylindres sont formés en forçant le passage de la matière ligneuse dans une matrice avec une pression très importante, et ces cylindres sont alors coupés à la longueur désirée. Cette étape de densification entraîne une très forte montée en température, qui liquéfie la lignine du bois et en fait un liant naturel. À la sortie de la presse, les granules sont refroidis sur une surface grillagée qui favorise le passage de l'air frais, ce qui permet de stabiliser leur humidité. Une étape de contrôle de la granulométrie est aussi effectuée, permettant de retirer des pièces de dimensions trop importantes et de fraction fine.
- 39 Les granules sont ensuite mis en sac ou gardés en vrac. Lors de l'ensachage, ils sont mis en petits sacs d'environ 18 kilogrammes, rassemblés sur des palettes de transport. Les palettes sont livrées aux utilisateurs finaux et distributeurs. Les granules peuvent aussi être laissés en vrac, pour des livraisons par camion vers les utilisateurs finaux. Tel que révélé lors des entrevues, la logistique de transport au sein de la chaîne de valeur des granules de bois conventionnels est un facteur déterminant dans la décision de production des granules. En effet, la moitié des dépenses est consacrée au transport, tant en amont qu'en aval de la production. Ainsi, les producteurs tentent d'optimiser le transport en misant beaucoup sur les retours en charge des camions de livraison, afin de diminuer les coûts. On distingue trois types de qualité de granules de bois conventionnels sur le marché : premium, standard et industriel (Belhade, 2016). Au Canada, les principales spécifications des types de granules de bois conventionnels sont le diamètre, la longueur, la teneur en humidité, le taux de cendres, la durabilité, la teneur en fines, le pouvoir calorifique et la masse volumique apparente. Le granule de bois est fréquemment utilisé pour le chauffage dans les églises, les serres, les réseaux de chaleur municipaux, les bâtiments multi-logements, les usines de transformation alimentaire, les usines de transformation de bois, etc. Il est habituellement privilégié en milieu urbain et pour les utilisateurs qui bénéficient de ressources humaines limitées pour l'opération et l'entretien des systèmes de chauffage.

Type III. Chaîne de valeur des granules torréfiés

- 40 Les granules de bois torréfiés sont produits à partir d'une biomasse séchée par torréfaction; ils sont fabriqués à partir des mêmes sources de bois que les conventionnels. À l'usine, deux processus de production sont possibles. Le premier

consiste à fragmenter et conditionner la biomasse selon les caractéristiques de l'équipement de séchage utilisé, puis passer au séchage. À cette étape, la torréfaction est réalisée, suite à quoi la biomasse est conditionnée et densifiée. Les granules produits sont refroidis puis un contrôle de la granulométrie est effectué. Le deuxième processus consiste à fragmenter et conditionner la biomasse. Ensuite, les granules sont séchés, conditionnés, densifiés puis torréfiés. Après cela, ils sont refroidis et un contrôle de la granulométrie est effectué avant que les granules soient livrés à l'utilisateur final par la compagnie de transport ou l'usine de production.

- 41 À l'heure actuelle, le seul producteur présent dans la région de Québec utilise des sous-produits des usines de sciage. Par rapport aux autres produits de la filière du chauffage à la biomasse, l'étendue de la source de la valeur créée par les granules de bois torréfiés est relativement faible. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'un produit moins demandé compte tenu de son prix plus élevé (202.70 dollars américains par tonne métrique anhydre) que celui de tous les autres produits finaux. Bien qu'ils soient très polyvalents, les utilisateurs potentiels de granules de bois torréfiés sont plutôt de grands consommateurs avec des systèmes de production d'énergie dont la taille est au moins 3 mégawatts et souvent supérieure à 10 mégawatts. Toutefois, le potentiel théorique de production de granules de bois torréfiés au sein de l'industrie de la bioénergie forestière est d'environ 600 000 tonnes métriques anhydres par an, donc supérieur à celui des autres produits à l'exception du bois post-consommation (900 000 tonnes métriques anhydres par an).
- 42 Les granules de bois torréfiés ont un taux d'humidité qui varie de 0.3 à 6% avec un taux de cendres de moins de 1% (QWEB, 2018). Ce produit s'apparente au charbon, et pourrait donc le remplacer dans la plupart de ses applications. En effet, il a une haute densité énergétique, il est hydrophobe et présente une bonne broyabilité. À court terme, la principale utilisation de granules de bois torréfiés est le remplacement du charbon dans le secteur industriel. Actuellement, au Québec, les granules de bois torréfiés sont très peu utilisés. Cependant, ce produit pourrait être utile en remplacement de combustibles fossiles dans les centrales industrielles, de cogénération, de fabrication du ciment et de la chaux, et dans les opérations d'extraction minière, d'exploitation de carrières et d'extraction du pétrole et du gaz. Il pourrait également trouver un marché dans le secteur institutionnel.
- 43 Finalement, une diminution du coût au kilowattheure de l'utilisation des granules torréfiés devra être observée afin de pouvoir percer le marché du chauffage des bâtiments. Bien qu'un ensachage puisse être possible, il n'y a actuellement pas de granules torréfiés vendus en sac au Québec, qui sont donc livrés en vrac à l'utilisateur par l'intermédiaire d'un transporteur. Toutefois, ils sont plus demandés en Europe qu'au Québec. Comme pour les granules conventionnels, la logistique de transport est fondamentale dans le cadre de la production de granules torréfiés. Ainsi, les producteurs tentent d'optimiser le transport en misant plus sur les retours en charge des camions de livraison, afin de diminuer les coûts.

Type IV. Chaîne de valeur des écorces

- 44 Les écorces sont vouées à un usage industriel, notamment dans les centrales de cogénération et usines de transformation de bois (Communauté métropolitaine de Québec et al., 2017b), dans des systèmes de plus de 3 mégawatts. En revanche, l'utilisation des écorces pour le chauffage des bâtiments n'est pas appropriée, compte

tenu du fait qu'elles constituent un produit à faible valeur énergétique. Malgré le faible coût moyen d'approvisionnement de la matière brute (9.21 dollars américains par tonne métrique anhydre) et le faible prix d'acquisition du produit final (12.90 dollars américains par tonne métrique anhydre), le coût des équipements (combustion et traitement des fumées) est très élevé. Par exemple, pour être en mesure de respecter les exigences de la réglementation en matière de qualité de l'air, des filtres à manche ou filtres électrostatiques doivent être installés, très dispendieux. En effet, les systèmes conventionnels de filtration des fumées ne sont pas conçus pour obtenir des performances environnementales désirées quand le combustible a des taux de cendres élevés (Communauté métropolitaine de Québec et al., 2017b). La décision d'utiliser les écorces comme combustible repose donc sur l'évaluation de l'option alternative des plaquettes (coût du combustible plus élevé, mais coût des équipements plus bas). De plus, les écorces sont caractérisées par un taux d'humidité d'environ 50 à 60% et un taux de cendres d'environ 5%. Il s'agit d'une matière à granulométrie variable (7 à 10 centimètres). Dans la région de la Capitale-Nationale, on estime la production d'écorces à environ 82 500 tonnes métriques anhydres par an en provenance des usines de sciage (Communauté métropolitaine de Québec et al., 2017a).

Type V. Chaîne de valeur du bois post-consommation

- 45 La composition du bois post-consommation se distingue par la présence de contaminants (plastique, métal, bardeaux d'asphalte, etc.) et de particules fines. Généralement, il est composé de bois vierge, de bois d'ingénierie (structure), de panneaux (particules, contreplaqué, lamelles orientées, fibres), de bois peint, teint, enduit de colle ou traité (créosote, pentachlorophénol, arséniate de cuivre chromé) et de bois plastique. Il contient un taux de cendre généralement élevé, ainsi qu'un taux d'humidité variant entre 20 et 25%. Il peut aussi contenir des métaux lourds (ex.: chlore, arsenic, calcium, chrome, cuivre, fer). Cependant, le recyclage du bois post-consommation réside notamment dans la fabrication de panneaux de particules (ex. mélamine) ou de panneaux de fibre de bois (ex. panneaux insonorisants). Il est également possible de distinguer trois produits différents du bois post-consommation : la qualité premium encore appelée Grade 1 (dépourvue de tout contaminant), la qualité standard ou Grade 2 (faiblement contaminée) et le Grade 3 qui est fortement contaminé. Ainsi, les caractéristiques du bois post-consommation influencent fortement son utilisation. En effet, cette dernière est majoritairement limitée à des chaudières de grande puissance; le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère du Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques du Québec interdit l'utilisation de biomasse contaminée par des matières ou substances autres que de la terre ou du sable dans des chaudières d'une puissance inférieure à 3 mégawatts. Il est possible de brûler la qualité premium de bois post-consommation dans ce genre de chaudières. Il est cependant nécessaire d'obtenir un certificat d'autorisation en vertu de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement et de respecter toutes les exigences en vigueur pour l'utilisation du grade 2. Il est permis de brûler le grade 2 dans une chaudière d'une puissance variant entre 3 et 60 mégawatts.
- 46 Bien qu'ayant un potentiel de production plus élevé que celui de tous les autres produits (900 000 tonnes métriques anhydres par an), la chaîne de valeur bois post-consommation a toutefois un faible avantage compétitif. Dans la région de la Capitale-Nationale, le volume de bois post-consommation disponible est évalué à 50 000 tonnes

métriques anhydres par an, soit environ 12 500 tonnes métriques anhydres de résidus exempts de toute forme de contamination (grade 1) et 37 500 tonnes métriques anhydres de résidus faiblement contaminés (grade 2) (Communauté métropolitaine de Québec et al. 2017a). Les caractéristiques des résidus de bois post-consommation se reflètent sur son coût d'approvisionnement qui est quasi nul. Toutefois, son coût de production (coûts de transport, d'équipements et de main-d'œuvre) est élevé et se reflète notamment sur le prix moyen du combustible, qui est d'environ 8.11 et 4.42 dollars américains par tonne métrique anhydre respectivement pour les qualités premium et standard.

- 47 Les principales sources de matières premières sont les activités de construction, de rénovation ou de démolition, la foresterie urbaine et les écocentres se trouvant dans les centres urbains. Les usines de 2^e et 3^e transformation du bois constituent aussi des sources d'approvisionnement de matières premières (Communauté métropolitaine de Québec et al., 2017b). À partir de ces lieux de récupération, le bois post-consommation est acheminé vers les centres de tri pour le triage, selon leur niveau de contamination. Il est ensuite broyé, trié puis acheminé vers l'utilisateur final. Il est possible qu'un centre de transformation et de conditionnement de la biomasse conclue des ententes avec un centre de tri, afin d'amasser des volumes de résidus pour des utilisations précises (Communauté métropolitaine de Québec et al., 2017b). De même, les usines de 2^e et de 3^e transformation du bois pourraient utiliser leurs propres résidus tout en prévoyant notamment une étape de fragmentation des résidus, si nécessaire. Le bois post-consommation est généralement utilisé dans le secteur industriel, notamment dans les centrales de cogénération et les usines de transformation de bois.

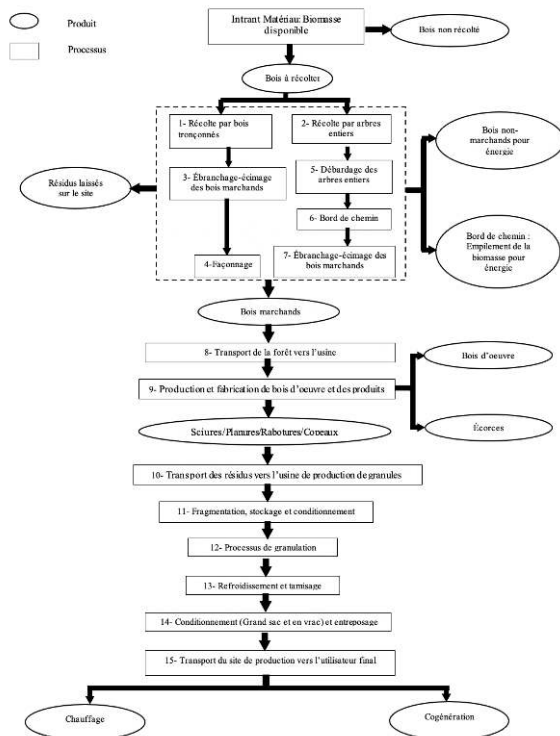
Analyse et comparaison des prix des produits des chaînes de valeur de la biomasse forestière

- 48 Les résultats de l'analyse des données ont permis de caractériser cinq modèles types de chaîne de valeur de la biomasse forestière dans la région de la Capitale-Nationale de Québec. Les caractéristiques des modèles de chaînes de valeur de type IA, type IB, Type II et type III répondent aux besoins actuels en termes de chauffage, de cogénération et de procédés industriels. Ces résultats corroborent ceux de travaux précédents (Martire et al., 2015). Néanmoins, les résultats des entrevues ont révélé que les écorces sont presque exclusivement utilisées pour la cogénération. En effet, le taux de cendres élevé et la faible densité énergétique de l'écorce, ajoutés aux exigences environnementales et au manque de systèmes appropriés pour gérer le taux de cendre et la fumée, constituent des barrières à la demande pour ce combustible. C'est pourquoi il est souvent recommandé d'utiliser les plaquettes forestières comme combustibles plutôt que les écorces. Les granules de bois torréfiés, malgré leurs qualités et leur capacité à remplacer le charbon, demeurent un produit moins demandé pour la bioénergie dans la région de la Capitale-Nationale. Les granules de bois conventionnels, deuxième produit le plus utilisé après les plaquettes forestières, sont quant à eux en plein essor.
- 49 Une compilation des prix des plaquettes forestières et des granules de bois conventionnels dans la région de la Capitale-Nationale, au Canada, dans les pays scandinaves et en Europe de façon générale est présentée dans la figure 4. L'analyse comparative globale montre que les plaquettes forestières sont moins coûteuses que les granules de bois conventionnels dans toutes les régions considérées. La région de la

Capitale-Nationale est une zone où le prix des plaquettes forestières est très abordable (3.69 dollars américains par gigajoule), par rapport au reste du Canada (14.93 dollars américains par gigajoule) et aux États-Unis (18.59 dollars américains par gigajoule). Le prix des granules de bois conventionnels est aussi plus élevé en Finlande (20.05 dollars américains par gigajoule). La région de la Capitale-Nationale est la deuxième région (9.41 dollars américains par gigajoule) où l'approvisionnement des granules de bois conventionnels est moins coûteux après la Suède (9.35 dollars américains par gigajoule). Une des explications possibles des faibles coûts relatifs observés dans la région de la Capitale-Nationale pourrait être que cette région est un tissu de territoires forestiers et urbains, réduisant les distances entre la ressource et les utilisateurs. Cela dit, il est aussi probable que les coûts mentionnés soient propres à un marché encore très restreint dans la région, dans lequel seules les sources de biomasse les plus abordables sont présentement mobilisées. Il n'est pas impossible qu'une mobilisation supplémentaire entraîne une certaine hausse du coût marginal, puisque des sources de matière première moins accessibles devront être utilisées. Par ailleurs, tel qu'observé dans des pays comme la Suède, l'apprentissage technologique et institutionnel et les économies d'échelle pourraient par la suite contribuer à faire diminuer les coûts (Junginger et al., 2005).

- 50 Dans la région de la Capitale-Nationale, les granules de bois conventionnels constituent le deuxième produit principal le plus demandé pour la production de chaleur et la cogénération. Ainsi, tout comme les plaquettes forestières, les granules de bois s'inscrivent dans la dynamique des politiques énergétiques mises en place dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Cependant, le prix des granules de bois conventionnels est plus élevé que celui de plaquettes forestières. Cela s'expliquerait par le fait que les granules de bois ont un pouvoir calorifique beaucoup plus élevé que celui des plaquettes forestières. Aussi, ils répondent mieux aux attentes de plusieurs utilisateurs, notamment les industriels qui déploient moins d'équipements pour son conditionnement et la production d'énergie.
- 51 À l'heure actuelle, les écorces et les granules de bois torréfiés constituent les deux extrêmes du prix des combustibles ligneux au sein de la région de la Capitale-Nationale. Le prix des écorces s'établit à 0.72 dollars américains par gigajoule et celui des granules de bois torréfiés est à 11.26 dollars américains par gigajoule. La plupart des utilisateurs des écorces de la région sont des centrales de cogénération et des usines de transformation du bois pour le séchage. Le faible prix des écorces pourrait être expliqué par le fait que ce produit peut être substitué à d'autres combustibles ligneux tels que les plaquettes forestières, les granules de bois conventionnels et les boues issues de l'industrie des pâtes et papiers. Quant aux granules torréfiés, leur demande est quasi nulle dans la région de la Capitale-Nationale ; toutefois, l'intérêt pour ce produit pourrait augmenter auprès des industriels puisqu'il a la capacité de remplacer le charbon (Kumar et al., 2017). Grâce à la politique énergétique qui interdira l'utilisation du charbon en 2030 et l'augmentation de la taxe de carbone, on pourrait s'attendre à une croissance de la demande. Il est important de noter que les granules de bois torréfiés sont utilisés dans le nord du Québec pour se chauffer, et que le marché est bien développé à l'étranger, notamment en Europe.

Figure 4. Prix des plaquettes forestières et des granules de bois conventionnels, 2019 / Wood chips and conventional wood pellet prices, 2019



- 52 La section précédente souligne les exigences importantes inhérentes aux différentes chaînes de valeur de la biomasse forestière de la région de la Capitale-Nationale. La première de ces exigences veut que la chaîne de valeur fonctionne au niveau managérial : la gestion d'une chaîne de valeur est une approche stratégique adoptée volontairement par les organisations individuelles qui composent la chaîne. Ainsi, le comportement des acteurs d'une chaîne de valeur définit ce qu'elle serait en mesure d'accomplir, ce qui constitue un élément fondamental du rendement et de la compétitivité du produit final. La deuxième exigence porte sur la nécessité de pouvoir compter sur les acteurs de la chaîne afin d'assurer la compétitivité du produit final. Chaque organisation doit avoir la motivation nécessaire pour fonctionner selon les normes préétablies (par exemple le taux d'humidité de la biomasse, la puissance et la qualité du système de production d'énergie, le respect des normes d'utilisation du produit mise en place par l'autorité, etc.). Le non-respect de cette exigence peut avoir une incidence sur le produit final et donc sur sa compétitivité. La troisième exigence précise que l'environnement externe dans lequel le produit évolue doit servir à rehausser la capacité de la chaîne, à acquérir du savoir et le transformer en décision : le cas de la chaîne de valeur des granules bois post-consommation illustre bien l'impact que peut avoir l'environnement externe sur la compétitivité externe. Or, la réglementation sur l'assainissement de l'atmosphère n'a pas favorisé l'utilisation de ce type de biomasse, bien qu'il soit disponible en abondance.
- 53 Par ailleurs, l'analyse de la structure et de la nature des chaînes de valeur de l'étude montre que les acteurs se complètent au sein des chaînes de valeur étudiées. Afin d'assurer la résilience de la filière de la bioénergie forestière pour le chauffage et la cogénération, on remarque le besoin d'une forte collaboration entre les acteurs. Ce constat corrobore les résultats de l'étude de Fearne et al. (2012) qui montre que les

acteurs d'une chaîne de valeur se qualifient par leur capacité à coopérer et à saisir des occasions d'augmenter le flux de partage de l'information. La diversification des chaînes de valeur des produits de la biomasse forestière s'intègre dans un contexte d'innovation et de mises en place des produits ayant un fort potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

Conclusion

- 54 Plusieurs initiatives ont été prises au cours des dernières années afin d'assurer le développement de la bioénergie forestière dans des juridictions du monde où cette filière est encore à un stade précoce. À l'heure actuelle, la filière de la biomasse forestière est en pleine expansion avec le développement des produits répondant aux besoins économiques, environnementaux et sociaux des utilisateurs et décideurs politiques. Cette étude a permis de caractériser cinq modèles types des chaînes de valeur des produits de la biomasse forestière. Ces modèles sont issus de la région de la Capitale-Nationale, mais le contexte de cette région, où se maillent des territoires forestiers et urbains, en fait une étude de cas qui devrait être représentative de ce que l'on peut retrouver ailleurs au Québec. À l'heure actuelle, les plaquettes forestières sont le combustible le plus utilisé dans la région étudiée, compte tenu de son accessibilité en termes de prix d'acquisition et de sa disponibilité; cela devrait également être le cas pour les autres régions comptant sur la présence d'un bon réseau industriel de transformation primaire du bois. Les granules de bois conventionnels arrivent en deuxième position dans la Capitale-Nationale. Ensuite, bien qu'ils aient un fort pouvoir calorifique et pourraient remplacer le charbon dans plusieurs applications, les granules de bois torréfiés sont plus voués à l'exportation, notamment en Europe où la demande est plus forte et où ils sont utilisés de manière conjointe avec le charbon. Cette utilisation conjointe pourrait être envisagée dans des régions à forte concentration d'industries lourdes, telles que les sidérurgies. Enfin, les résultats montrent aussi que les systèmes de production de l'énergie actuellement disponibles ne permettent pas une utilisation rentable des écorces pour le chauffage.
- 55 Par ailleurs, le développement des technologies et des chaînes de valeur liées à l'extraction des coproduits de la biomasse (notamment les huiles pyrolytiques) est en pleine expansion, tant au Québec qu'ailleurs dans le monde (Villemont et al., 2019). Ce développement pourra contribuer à la diversification des options pour le remplacement des produits d'origine fossile, mais également à consolider l'assise financière et économique de la bioénergie forestière grâce à l'intégration de coproduits à plus haute valeur ajoutée. Un tel déploiement s'inscrirait également dans une revitalisation plus large du secteur forestier, au sein duquel les chaînes de valeur des produits conventionnels du bois (sciage, pâte, panneaux) seraient intégrées à celles de la bioénergie et autres bioproduits innovants (Zetterholm et al., 2018). L'harmonisation des acteurs sera d'autant plus importante pour assurer le succès des chaînes de valeur.
- 56 Au cours des entrevues, différents éléments tels que l'historique des chaînes de valeur de la biomasse forestière, le fonctionnement des marchés des produits de la matière ligneuse, ainsi que les innovations futures - le devenir des produits de la biomasse forestière - ont été abordés par les informateurs. Ces éléments ont vraisemblablement joué un rôle dans les réponses formulées, mais n'ont pas été initialement pris en compte dans le questionnaire de recherche : il serait donc pertinent de les intégrer dans

une recherche future. Aussi, une étude approfondie des retombées sociales, économiques et environnementales des chaînes de valeur des produits de la biomasse forestière permettrait de mieux cerner le potentiel de la filière. Cela mettrait à la disposition des décideurs des informations utiles à la prise de décision concernant l'émergence de la filière du chauffage à la biomasse forestière, dans les contextes où elle produira les plus grands bénéfices.

Cette recherche s'inscrit dans le projet intitulé « Mobilisation de la bioénergie forestière au cœur des municipalités » (chercheuse principale : E. Thiffault) qui a reçu le soutien financier du Fonds vert, du Fonds de recherche Québec-Nature et technologie (FRQNT) et du Fonds de recherche – Société et culture (FRQSC) dans le cadre du programme de recherche orientée en partenariat sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre-premier concours. Les auteurs remercient tous ces partenaires financiers ainsi que le partenaire du projet, la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). Nous remercions également l'ensemble des organisations de la filière du chauffage à la biomasse forestière au Québec.

BIBLIOGRAPHIE

Baribeau, C., 2019, Recherches qualitatives: Apport de la revue au développement de la recherche qualitative, *Recherches qualitatives*, 38, 1, pp. 141-161.

Barreiro, S., M.-J. Schelhaas, R. E. McRoberts, et G. Kändler, 2017, Forest Inventory-based Projection Systems for Wood and Biomass Availability, *Managing Forest Ecosystems*, Vol. 29, [En ligne] URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-56201-8>

Beauregard, R., P. Lavoie, E. Thiffault, I. Ménard, L. Moreau, J.-F. Boucher, et F. Robichaud, 2019, Rapport groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques (GTFCC), 59 p., [En ligne] URL : https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/Rapport_final_GTFCC.pdf

Belhadeff, W., 2016, *Développement de granules énergétiques améliorées à base de bouleau blanc et de graines de canola*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 232 p., [En ligne] URL : <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/670/1/Belhadeff%2C%20Williams.pdf>

Camero, C., et T. Sowlati, 2014, Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, pp. 62-73.

Chartier, L., M. D'Aoust, J.-F. L. Vachon, J.-M. Varin, et D. Bossé, 2006, *La gestion des débris de construction et démolition et des autres encombrants dans l'Agglomération de Montréal*, Montréal, TEKNIKA-HBA, 57 p., [En ligne] URL : http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/RES_AGGLO_GMR_FR/MEDIA/DOCUMENTS/GESTIONBRIS_CONSTRUCTIONMOLITION_DAUTRESCOMBRANTS.PDF

Communauté métropolitaine de Québec, Fédération québécoise des coopératives forestières, et Vision biomasse Québec, 2017a, *Cahier du participant: 1re rencontre de travail dans le cadre du Projet de développement de l'utilisation de la biomasse forestière sur le territoire de la région de la Capitale-Nationale et de Lévis*, Québec, 16 p.

Communauté métropolitaine de Québec, Fédération québécoise des coopératives forestières, et Vision biomasse Québec, 2017b, *Cahier du participant: 4e rencontre de travail dans le cadre du Projet de développement de l'utilisation de la biomasse forestière sur le territoire de la région de la Capitale-Nationale et de Lévis*, Québec, 11 p.

Côté, J.-F., 2008, *Vers la valorisation de la biomasse forestière - Plan d'action*, Ministère des ressources naturelles et de la faune, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 28 p., [En ligne] URL : <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/plan-action-biomasse.pdf>

Denzin, N. K., et Y. S. Lincoln, 2007, The discipline and practice of qualitative research, dans Denzin, N. K., et Y. S. Lincoln (dir.) *The discipline and practice of qualitative research*, Thousand Oaks : Sage Publications, pp. 1-44.

Dessbesell, L., C. Xu, R. Pulkki, M. Leitch, et N. Mahmood, 2017, Forest biomass supply chain optimization for a biorefinery aiming to produce high-value bio-based materials and chemicals from lignin and forestry residues: A review of literature, *Canadian Journal of Forest Research*, 47, 3, pp. 277-288.

Elbersen, H. W., E. Alakangas, B. S. Elbersen, E. Annevelinl, J. R. Almeyda, T. Lammenns, 2016, D2.4 *Explanatory note accompanying the database for standardized biomass characterization and minimal biomass quality requirement for each biomass conversion technology*, Research report, BBP Biorefinery and Sustainable Value Chains Earth Observation and Environmental Informatics Biobased Chemistry and Technology, pp. 2-31.

Fearne, A., M. M. Garcia, et B. Dent, 2012, Dimensions of sustainable value chains: Implications for value chain analysis, *Supply Chain Management: An International Journal*, 17, 6, pp. 575-581.

Gauthier, B., I. Bourgeois, B. Gauthier, et J. Crête, 2016, *Recherche sociale: De la problématique à la collecte des données*, 6^e édition, Presses de l'Université du Québec, 767 p.

GIEC., T. F. Stocker, D. Qin et G.-K. Plattner, 2013, *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques : résumé à l'intention des décideurs : rapport du groupe de travail I du GIEC : résumé technique : rapport accepté par le Groupe de travail I du GIEC mais non approuvé dans le détail et foire aux questions : extraits de la contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 222 p.

Glaser, B. G., A. L. Strauss, K. Oeuvray, M.-H. Soulet, P. Paillé, et A. L. Strauss, 2010, *La découverte de la théorie ancrée stratégies pour la recherche qualitative*, Paris : A. Colin.

Grawitz, M., 2000, *Méthodes des sciences sociales*, Collection Précis, 11^e édition, 1040 p.

Hilgers, M., 2013, Observation participante et comparaison: Contribution à un usage interdisciplinaire de l'anthropologie, *Anthropologie et Sociétés*, 37, 1, pp. 97-115.

Junginger, M., A. Faaij, R. Björheden, et W. C. Turkenburg, 2005, Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden, *Biomass and Bioenergy*, 29, 6, pp. 399-418.

Kumar, L., A. A. Koukoulas, S. Mani, et J. Satyavolu, 2017, Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review, *Energy & Fuels*, 31, 1, pp. 37-54.

Kurz, W. A., D. C. Dymond, G. Stinson, G. J. Rampley, E. T. Neilson, A. L. Carroll, T. Ebata, et L. Safranyik, 2008, Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change, *Nature*, 452, 7190, pp. 987-990.

Mansuy, N., D. Paré, E. Thiffault, P. Y. Bernier, G. Cyr, F. Manka, B. Lafleur, et L. Guindon, 2017, Estimating the spatial distribution and locating hotspots of forest biomass from harvest residues and fire-damaged stands in Canada's managed forests, *Biomass and Bioenergy*, 97, pp. 90-99.

- Mansuy, N., E. Thiffault, S. Lemieux, F. Manka, D. Paré, et L. Lebel, 2015, Sustainable biomass supply chains from salvage logging of fire-killed stands: A case study for wood pellet production in eastern Canada, *Applied Energy*, 154, pp. 62–73.
- Marland, G., R. A. Pielke, M. Apps, R. Avissar, R. A. Betts, K. J. Davis, P. C. Frumhoff, S. T. Jackson, L. A. Joyce, P. Kauppi, J. Katzenberger, K. G. MacDicken, R. P. Neilson, J. O. Niles, D. Niyogi, S. Dutta R. J. Norby, N. Pena, N. Sampson, et Y. Xue, 2003, The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy, *Climate Policy*, 3, 2, pp. 149–157.
- Martire, S., D. Tuomasjukka, M. Lindner, J. Fitzgerald, et V. Castellani, 2015, Sustainability impact assessment for local energy supplies' development – The case of the alpine area of Lake Como, Italy, *Biomass and Bioenergy*, 83, pp. 60–76.
- Ministère de l'énergie et des ressources naturelles, 2020, *Consommation d'énergie*, [En ligne] URL : <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation.jsp>
- Miles, M. B., A. M. Huberman, et J. Saldaña, 2014, *Qualitative Data Analysis. A Methods Sourcebook*, ProQuest: Vol. 28, N° 4, 3rd Edition, SAGE Publications: Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC, pp. 485-487, [En ligne] URL : <https://search-proquest-com.acces.bibl.ulaval.ca/docview/1628557074?OpenUrlRefId=info:xri/sid:wcdiscovery&accountid=12008>
- Morrisette, J., D. Demazière, et M. Pepin, 2014, *Vigilance ethnographique et réflexivité méthodologique*, Recherches qualitatives, 33, 1, pp. 9–18, [En ligne] URL : [http://www.recherche-qualitative.qc.ca/documents/files/revue/edition_reguliere/numero33\(1\)/rq-33-1-intro.pdf](http://www.recherche-qualitative.qc.ca/documents/files/revue/edition_reguliere/numero33(1)/rq-33-1-intro.pdf)
- Nabuurs, G. J., K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, J. Ford-Robertson, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, F. Achard, C. Anaya, S. Brinkman, N. Higuchi, M. Hoogwijk, F. Lecocq, S. Rose, B. Schlamadinger, B. S. S. Filho, B. Sohngen, et E. Calvo, 2007, Forestry, In *Climate Change 2007: Mitigation*, dans Metz, B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave et L.A. Meyer (dir.), *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, University Press, United Kingdom, pp. 541-584.
- Obernberger, I., et G. Thek, 2011, The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilisation of Biomass Pellets, *Fuel*, 90, 10, 592 p.
- Pacala, S. P., R. P. Socolow, 2004, Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, *Science*, 305, 5686, pp. 968–972.
- Palosuo, T., T. Suominen, W. Werhahn-Mees, J. Garcia-Gonzalo, et M. Lindner, 2010, Assigning results of the Tool for Sustainability Impact Assessment (ToSIA) to products of a forest-wood-chain, *Ecological Modelling*, 221, 18, pp. 2215–2225.
- Paré, D., E. Thiffault, G. Cyr, et L. Guindon, 2016, Chapter 3- Quantifying Forest Biomass Mobilisation Potential in the Boreal and Temperate Biomes, In: E. Thiffault, C. T. Smith, M. Junginger, J. N. Saddler et C. T. Smith, *Mobilisation of Forest Bioenergy in the Boreal and Temperate Biomes*, Academic Press, 2016, pp. 36-49.
- Picchio, R., R. Spina, A. Sirna, A. L. Monaco, V. Civitarese, A. D. Giudice, A. Suardi, et L. Pari, 2012, Characterization of Woodchips for Energy from Forestry and Agroforestry Production, *Energies*, 5, 10, pp. 3803–3816.
- Porter, M. E., 1985, *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*, London, Ontario, 557 p.

- Porter, M. E., 1998, *Competitive strategy: Techniques for analyzing industries and competitors*, Free Press, 421 p.
- Quebec wood export bureau, 2018, *Quebec Wood Export Bureau*, Quebec Wood Export Bureau, [En ligne] URL : <https://quebecwoodexport.com/>
- Recyc-Québec, 2018, *Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec*, Recyc-Québec, 52 p, [En ligne] URL : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2018-complet.pdf>
- Recyc-Québec, 2015, *Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec*, Recyc-Québec, 39 p, [En ligne] URL : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2015.pdf>
- Röser, D., A. Asikainen, I. Stupak et K. Pasanen, 2008, Forest Energy Resources And Potentials, dans D. Röser, A. Asikainen, K. Raulund-Rasmussen, et I. Stupak (dir.), *Sustainable Use of Forest Biomass for Energy: A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region*, Springer Netherlands, pp. 9–28.
- Savoie-Zajc, L., T. Karsenti, 2000, *Introduction à la recherche en éducation*, Éditions du CRP.
- Shabani, N., S. Akhtari, et T. Sowlati, 2013, Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, pp. 299–311.
- Shank, J. K., et V. Govindarajan, 1992, Strategic Cost Management: The Value Chain Perspective, *Journal of Management Accounting Research*, 4, pp. 179–197.
- Silverman, D., 2011, *Interpreting qualitative data: A guide to the principles of qualitative research*, Sage Publications, London, Ontario, 520 p.
- Thiffault, E., C. T. Smith, M. Junginger, et G. Berndes, 2016, *Mobilisation of Forest Bioenergy in the Boreal and Temperate Biomes: Challenges, Opportunities and Case Studies*, Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 239 p.
- Trudel, L., C. Simard et N. Vonarx, 2007, La recherche qualitative est-elle nécessairement exploratoire?, *Recherche Qualitative*, Hors Série 5, pp. 38–45.
- Villemont, C., O. Rezazgui, B. Delcroix, S. Barnabé, D. Montplaisir, et P. Mangin, 2019, Testing a Novel, Mechanically Fluidized Bed Pilot Unit Intended for the Production of Bio-Oil and Biochar from Forest Biomass, *Industrial Biotechnology*, 15, 3, pp. 179–187.
- Vision Biomasse Québec, 2017, *Le chauffage à la biomasse forestière résiduelle : Pour une filière qui participe activement à la transition énergétique du Québec*, 27 p., [En ligne] URL : <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/consultation/memoires/VBQ-08dec2017.pdf>
- Wanlin, P., 2007, L'analyse de contenu comme méthode d'analyse qualitative d'entretiens: Une comparaison entre les traitements manuels et l'utilisation de logiciels, *Recherches Qualitatives*, Hors Série n°3, pp. 243–272.
- Windisch, J., D. Röser, B. Mola-Yudego, L. Sikanen, et A. Asikainen, 2013, Business process mapping and discrete-event simulation of two forest biomass supply chains, *Biomass and Bioenergy*, 56, pp. 370–381.
- Yemshanov, D., D. W. McKenney, S. Fraleigh, B. McConkey, T. Huffman, et S. Smith, 2014, Cost estimates of post-harvest forest biomass supply for Canada, *Biomass and Bioenergy*, 69, pp. 80–94.

Zetterholm, J., E. Wetterlund, K. Pettersson, J. Lundgren, 2018, Evaluation of value chain configurations for fast pyrolysis of lignocellulosic biomass—Integration, feedstock, and product choice, *Energy*, 144, pp. 564–575.

ANNEXES

Figure A3. Schéma simplifié de la chaîne de valeur des granules de bois torréfiés dans l'étude de cas de la Capitale-Nationale du Québec / Simplified scheme of the torrefied wood pellets value chain in National Capital of Quebec case study

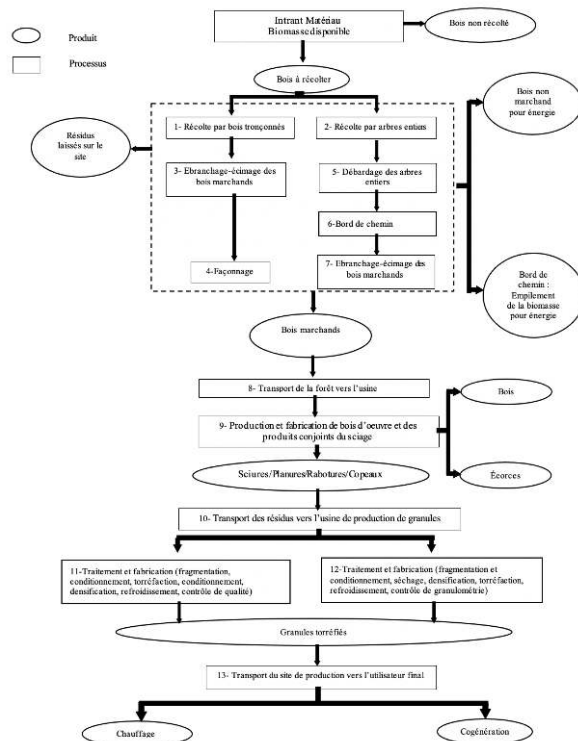


Figure A4. Schéma simplifié de la chaîne de valeur des écorces dans l'étude de cas de la Capitale-Nationale du Québec/Simplified scheme of the bark value chain in National Capital of Quebec case study

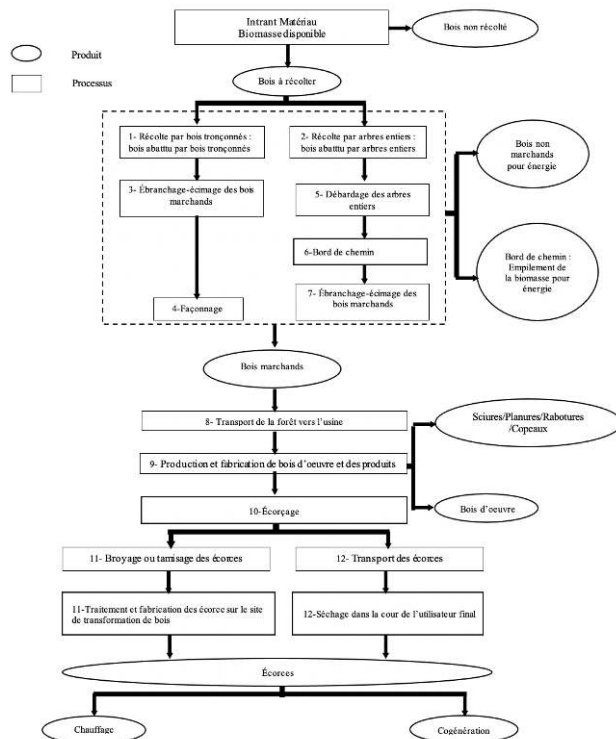


Figure A5. Schéma simplifié de la chaîne de valeur de bois post-consommation dans l'étude de cas de la Capitale-Nationale du Québec/Simplified scheme of the post-consumer wood value chain in National Capital of Quebec case study

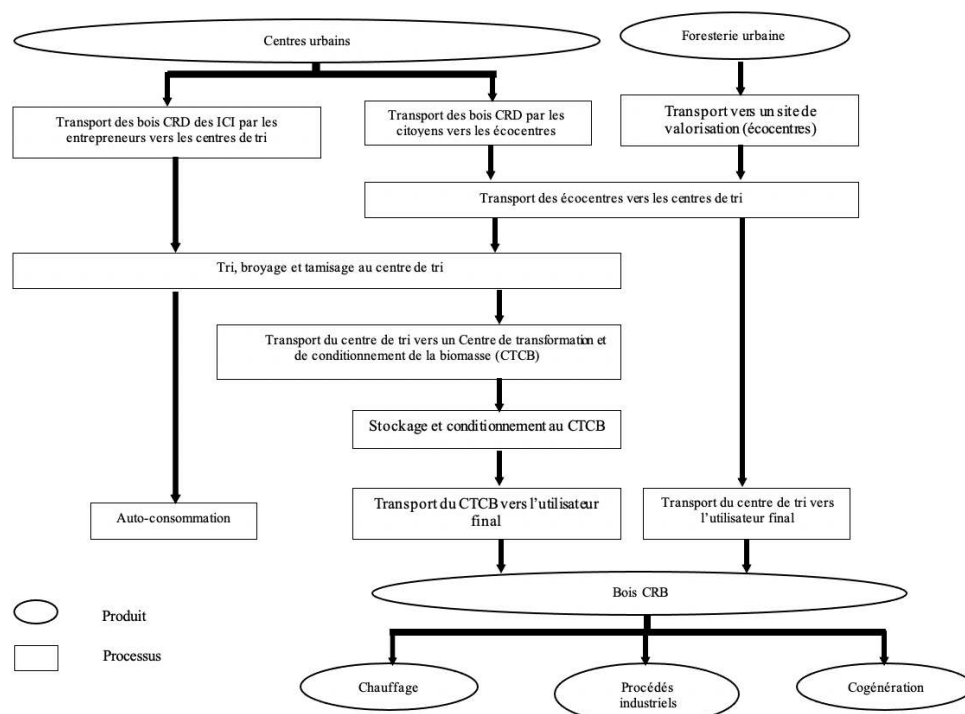


Figure 8. Typologie des chaînes de valeur de la biomasse forestière/Forest biomass value chain typology

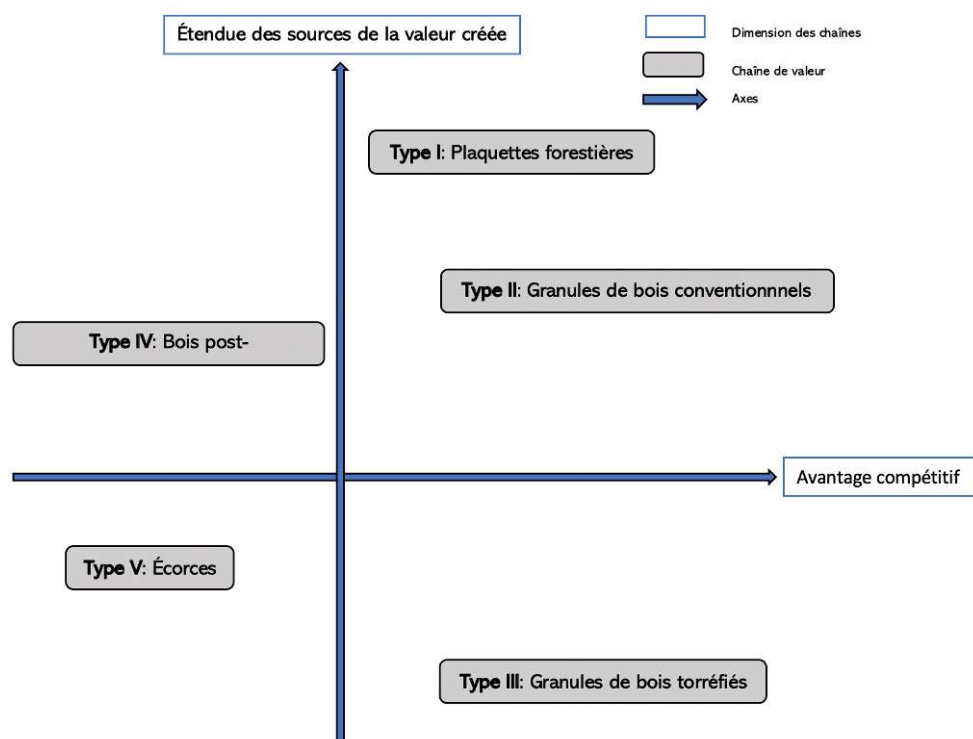
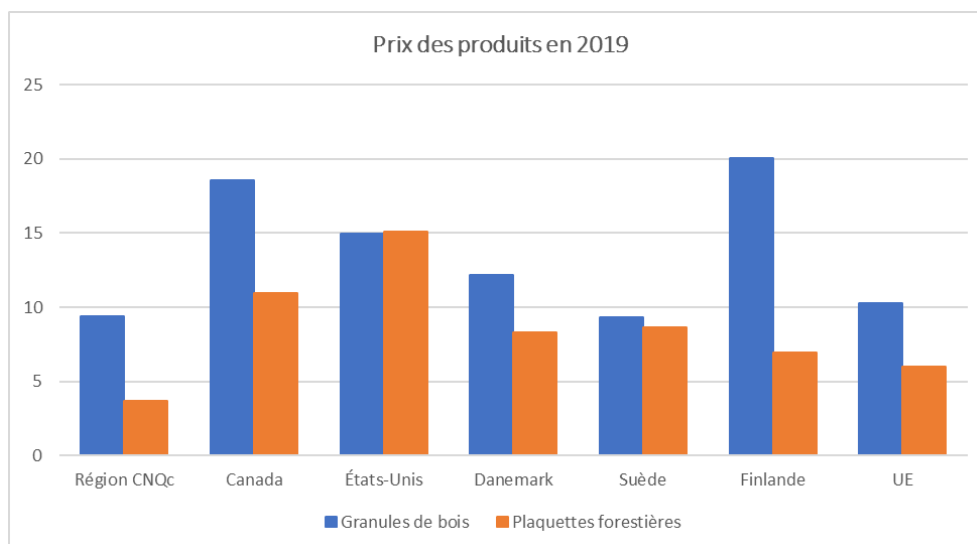


Figure 9. Prix des plaquettes forestières et des granules de bois conventionnels, 2019/
Wood chips and conventional wood pellets prices, 2019



Région CNQc : Région de la Capitale-Nationale du Québec

Québec : Entrevues avec les acteurs de la filière de chauffage à la biomasse forestière, 2019; Canada et États-Unis : Communications personnelles avec le Bureau de promotion des produits du bois du Québec (QWEB), 2019; Danemark : Adapté de (Bang et al., 2013) ; Suède : (Eriksson et al., 2012) & Adapté de (Bang et al., 2013); Finlande: Adapté de (Wanhatalo, 2020) ; Union européenne (UE): (IEA, 2013)

Tableau1. Sources, capacité de production et coûts moyens des produits des CVBF dans la région de la Capitale-Nationale / Sources, production capacity and average costs of forest biomass value chain products in the National Capital region

Produits	Sources	Capacité de production régionale (tma/an)	Coûts moyens (USD/tma)
Plaquettes forestières	Forêts publiques et privées	99 150	27.63 ^a
Granules conventionnels	Usines de transformation (scieries), bois non marchands des forêts publiques et privées et bois CRD de Grade 1*	439 500	Scierie : 58.94 ^b Bois non-marchands >51.60 ^c Bois CRD de Grade 1 : 8.11 ^d
Granules torréfiés	Usines de transformation (scieries), bois non marchands des forêts publiques et privées et bois CRD de Grade 1	15 000	Scierie : 58.94 ^b Bois non-marchands > 51.60 ^c Bois CRD de Grade 1 : 8.11 ^d
Écorces	Usines de sciage	82 450	9.21 ^e
Bois post-consommation	Centres de tri, Centres urbains, Écocentres, foresterie urbaine	50 000	0

*Grade indique la qualité du produit final provenant du bois CRD. Grade 1 = Première qualité ou qualité premium et Grade 2 = Deuxième qualité ou standard

^a Coût moyen d'approvisionnement du bois non-marchands des forêts publiques et privées pour la production de plaquettes forestières au sein de la région Capitale-Nationale. Ce coût est converti en dollars américains (USD) en utilisant : <https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises/>

^b Coût moyen d'approvisionnement des résidus conjoints de sciage obtenus dans les usines de transformation du bois pour la production des granules de bois conventionnels et torréfiés au sein de la région de la Capitale-Nationale. Ces coûts sont convertis en dollars américains (USD) en utilisant : <https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises/>

^c Coût moyen d'approvisionnement des résidus conjoints de sciage obtenus dans les usines de transformation du bois pour la production des granules de bois conventionnels et torréfiés au sein de la région de la Capitale-Nationale. Ces coûts sont convertis en dollars américains (USD) en utilisant : <https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises/>

^d Coût moyen d'approvisionnement de bois non-marchands destinés à la production des granules de bois conventionnels et torréfiés au sein de la région de la Capitale-Nationale. Ces coûts sont convertis en dollars américains (USD) en utilisant : <https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises/>

^e Coût moyen d'approvisionnement du bois CRD de première qualité pour la production des granules de bois conventionnels et torréfiés au sein de la région de la Capitale-Nationale. Ces coûts sont convertis en dollars américains (USD) en utilisant : <https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises/>

Tableau 2. Parties prenantes des chaînes de valeur de la biomasse forestière dans la région de la Capitale-Nationale / Forest biomass value chains stakeholders in the National Capital region

	Acteurs			
Produits	Gestion des ressources forestières (M₁)	Interactions forêt-industrie (M₂)	Traitement et fabrication (M₃)	Interactions industrie-utilisateur (M₄)
Plaquettes forestières	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers	Usines de transformation du bois, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers, manufacturiers de papier d'emballage (bâchage)	Groupements et coopératives de production des plaquettes forestières, centres de transformation et de conditionnement de la biomasse (CTCB), compagnies de transport	Églises, serres, réseaux de chaleur municipal, usines de transformation alimentaire, usines de transformation de bois, compagnies de transport ou transport par la coopérative ou groupement forestier
Granules conventionnels	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers	Usines de transformation du bois, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers, manufacturiers de papier d'emballage (bâchage)	Usines de transformation du bois ou usines de sciage, usines de production de granules de bois conventionnels, compagnies de transport	Hôpitaux, écoles, églises, bâtiments municipaux, garages, serres, usines de transformation alimentaire, acériculture, compagnies de transport ou transport par l'usine de production

Granules torréfiés	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers	Usines de transformation du bois, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers, manufacturiers de papier d'emballage (bâchage)	Usines de transformation du bois ou usines de sciage, usines de production de granules de bois torréfiés, compagnies de transport	Cimenteries, centrales de cogénération, usines de transformation de bois, compagnies de transport ou transport par l'usine de production
Écorces	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers	Usines de transformation du bois, coopératives forestières, groupements forestiers, bureaux de génie-conseil, entrepreneurs forestiers, manufacturiers de papier d'emballage (bâchage)	Usines de transformation du bois ou du sciage (scieries)	Centrales de cogénération, usines de transformation de bois
Bois post-consommation			Entrepreneurs de construction, écocentres, centres de tri, compagnies de transport	Usines de pâtes et papiers, cimenteries, centrales de cogénération, Compagnie de transport ou parfois le centre de tri, CTCB

Tableau 3. Utilisations, secteurs et sous-secteurs d'utilisation des produits dans la région de la Capitale-Nationale / Uses, sectors and sub-sectors of product use in the National Capital region

Produits	Utilisations	Secteurs	Sous-secteurs
Plaquettes forestières	Chauffage et cogénération	Industriel et institutionnel	Églises, serres, réseau de chaleur municipal, bâtiments multilogements, usines de transformation alimentaire, usines de transformation de bois

Granules torréfiés	Chauffage, cogénération, procédés industriels	Industriel et institutionnel	Cimenteries, centrales de cogénération et industriels de bois de sciage et de pâtes et papiers
Granules conventionnels	Chauffage, cogénération et procédés industriels	Institutionnel, commercial et industriel	Églises, serres, réseau de chaleur municipal, bâtiments multilogements, usines de transformation alimentaire, usines de transformation de bois
Écorces	Cogénération et procédés industriels	Industriel	Centrales de cogénération, usines de transformation de bois
Bois post-consommation	Chauffage, cogénération et procédés industriels	Industriel	Usines de pâtes et papiers, cimenteries, centrales de cogénération, industrie de construction

Tableau 4. Prix moyen et potentiels des produits, taille des systèmes de production d'énergie / Average price and products potential, size of energy production systems

Produits	Taille des systèmes (MW)	Prix moyens des produits (USD/tma)	Potentiel des produits (tma)
Plaquettes forestières	> 0.07	66.34 ^f	>100 000
Granules conventionnels	0.07 - 0.08	169.53 ^f	> 500 000
Granules torréfiés	> 3	202.70 ^f	> 600 000
Écorces	3 - 4	12.90 ^f	>80 000
Bois post-consommation	Grade 1 : < 3	8.11 ^f	> 900 000
	Grade 2 : > 3 - 60	4.42 ^f	

^fPrix moyens d'acquisition respectivement des plaquettes forestières, granules de bois conventionnels, granules de bois torréfiés, écorces et bois post-consommation (grade 1 et 2) au sein de la région Capitale-Nationale. Ces prix sont convertis en dollars américains (USD) en utilisant : <https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises/>

RÉSUMÉS

La bioénergie produite à partir de la biomasse forestière est considérée comme un outil essentiel de la transition énergétique et de lutte contre le changement climatique. La filière de la bioénergie forestière est bien implantée dans certaines juridictions à travers le monde, particulièrement pour le chauffage ; elle est cependant encore à un stade précoce de développement dans des régions qui comptent néanmoins un secteur forestier important, dont le Québec. En vue de documenter le développement de la bioénergie forestière en émergence dans ces régions, cette étude analyse les modèles types de chaînes de valeur de la biomasse forestière pour le chauffage des bâtiments institutionnels et commerciaux au Québec. Il a été possible de décrire cinq modèles types de chaîne de valeur en rapport avec leur potentiel de création de valeur économique et leur avantage comparatif. Parmi les produits, les plaquettes forestières sont le combustible le plus utilisé après les granules de bois conventionnels. Les granules de bois torréfiés sont voués à l'exportation. Cela dit, les prix observés actuellement dans la région d'étude sont ceux d'un marché encore très restreint, dans lequel seules les sources de biomasse les plus abordables sont présentement mobilisées ; les coûts d'approvisionnement devraient donc évoluer avec une mobilisation supplémentaire de la matière première, mais également avec l'apprentissage technologique et institutionnel. Cette étude révèle l'importance du comportement et de l'harmonisation des acteurs au sein des chaînes de valeur, mais également l'influence de l'environnement externe, sur l'efficacité des chaînes et la compétitivité des produits de la bioénergie.

Bioenergy produced from forest biomass is considered as a critical tool for energy transition and the fight against climate change. The forest bioenergy sector has very strong positions in some jurisdictions across the world, especially for heating; However, it is still at an early stage of development in regions that nevertheless have an important forest sector, including Quebec. In order to document the development of forest bioenergy in these emerging regions, this study analyzes typical models of forest biomass value chains for the heating of institutional and commercial buildings in Quebec. It has been possible to discover five typical value of chain models. Currently, within the region, wood chips are the most widely used fuel after conventional wood pellets. Despite their calorific value, torrefied wood pellets are little used and rather destined for export. That said, the prices currently observed in the study area are those of a still very limited market, in which only the most affordable sources of biomass are currently being mobilized. Supply costs should therefore evolve with additional mobilization of the raw material, but also with technological and institutional learning. This study reveals the importance of the behaviour and harmonization of the actors within the value chains, but also the influence of the external environment on the efficiency of the chains and the competitiveness of bioenergy products.

INDEX

Keywords : forest bioenergy, bioenergy, value chain, heating, cogeneration, typical models, buildings

Mots-clés : biomasse forestière, bioénergie, chaîne de valeur, chauffage, cogénération, modèles types, bâtiments

AUTEURS

AYAОВI LOCOH

Candidat au doctorat, Département des sciences du bois et de la forêt; Université Laval, Québec, Canada, adresse courriel : ayaovi.locoh.1@ulaval.ca

ÉVELYNE THIFFAULT

Professeure agrégée, Département des sciences du bois et de la forêt; Université Laval, Québec, Canada, adresse courriel : evelyne.thiffault@sbf.ulaval.ca

SIMON BARNABÉ

Professeur titulaire, Département de chimie, biochimie et physique; Université du Québec à Trois-Rivières Québec, Canada, adresse courriel : simon.barnabe@uqtr.ca

LUC BOUTHILLIER

Professeur titulaire, Département des sciences du bois et de la forêt; Université Laval, Québec, Canada, adresse courriel : luc.bouthillier@sbf.ulaval.ca