Avantage

FPInnovations

NON Réservé aux membres et partenaires de FPInnovations

Vol. 14 No. 3 Septembre 2013

Contenu

Introduction..... 1

Caractéristiques de la biomasse 2

Caractéristiques cruciales de la biomasse pour les applications les plus courantes en bioénergie et biocarburants..... 4

Sommaire..... 11

Remerciements..... 12

Références 12

Caractéristiques cruciales de la biomasse pour les applications les plus courantes en bioénergie et biocarburants

Mots clés

Biomasse, biocarburant, bioénergie, teneur en humidité, densité apparente, teneur en écorce, contamination, cendres, lignine, hydrate de carbone, produits d'extraction.

Résumé

Le présent document décrit les caractéristiques cruciales de la biomasse comme le format et la taille, la teneur en humidité, la densité apparente, la teneur en feuillage/écorce, la contamination, la teneur en cendres, en lignine, en hydrates de carbone et en produits d'extraction ainsi que la valeur calorifique pour les applications les plus courantes de production de bioénergie et de biocarburants : combustion directe, gazéification, pyrolyse, torréfaction, fermentation et densification. Le document est destiné aux professionnels de la foresterie, de la transformation du bois, des pâtes et papiers et de la biomasse qui cherchent de l'information de base sur ces caractéristiques essentielles.

Auteur

Marian Marinescu

Région de l'Ouest

Introduction

La biomasse comprend les organismes morts depuis peu et leurs sous-produits métaboliques (p. ex., le fumier). Lorsqu'on l'utilise pour produire de la bioénergie et des biocarburants, la biomasse est considérée comme une source d'énergie renouvelable, contrairement aux autres ressources naturelles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel et les combustibles nucléaires, qui sont considérées comme non renouvelables. La biomasse ligneuse ou forestière comprend principalement des arbres et arbustes. Actuellement, une grande part de la biomasse ligneuse/forestière sert à fabriquer des produits courants de grande valeur comme du bois de sciage, des planchers, des meubles et du papier. Ainsi, les installations de production de bioénergie et de biocarburants utilisent la biomasse ligneuse provenant d'arbres de petit diamètre, d'essences sous-utilisées, d'arbustes et de résidus de coupe et de façonnage.

Récemment, une demande accrue pour la biomasse ligneuse a fait ressortir un certain nombre de problèmes d'allocation des ressources, découlant d'une mauvaise combinaison entre les caractéristiques de la biomasse et les caractéristiques souhaitées de la matière première pour divers procédés de production de bioénergie ou de biocarburants. Même dans les applications de combustion directe, comme les chaudières ou appareils de chauffage à la biomasse, les caractéristiques de la matière première jouent un rôle crucial au chapitre de l'efficacité, de la faisabilité et du respect de l'environnement. Compte tenu de la mise au point de nouvelles applications en bioénergie et biocarburants, les entreprises forestières qui fournissent la biomasse ligneuse et les producteurs de bioénergie et de biocarburants doivent connaître les caractéristiques les plus importantes de cette ressource.

Cette introduction fournit de l'information de base aux professionnels de la

foresterie, de la transformation du bois, des pâtes et papiers et de la biomasse qui s'intéressent aux caractéristiques cruciales de la biomasse ligneuse pour les applications les plus courantes en bioénergie et biocarburants. Les valeurs critiques présentées sont données à titre indicatif seulement; en pratique, elles devront être confirmées par les fabricants de chacun des procédés de combustion ou de conversion.

Caractéristiques de la biomasse

Format et taille

La biomasse servant de matière première à la production de bioénergie et de biocarburants se présente sous une multitude de formes, comme les billes courtes ou longues, les fragments, le bois de chauffage, les résidus ligneux broyés, les copeaux, les déchets de construction et de démolition, les résidus de transformation et la sciure (figure 1). Alors que le bois de chauffage, les copeaux et la sciure peuvent servir directement à la combustion ou à la production de biocarburants, il faut fragmenter les autres formes de biomasse, comme les billes, les branches et les tronçons.

On a recours aux méthodes traditionnelles de tri pour estimer la distribution des tailles de la biomasse. Pour les pièces de grandes dimensions comme les billes et les branches, la distribution est évaluée par un mesurage et une détermination volumétrique habituels. Ces dernières années, des normes sur la mesure et la classification des dimensions ont été élaborées. La taille de la biomasse influence directement le temps de traitement, c'est-à-dire le temps nécessaire pour la combustion ou la conversion. Les exigences en termes de taille dépendent principalement des systèmes d'alimentation et de la capacité des technologies de combustion ou de bioconversion.

Figure 1.
Format et taille de la biomasse.

Teneur en humidité

La teneur en humidité (TH) est le rapport, en pourcentage, entre le poids de l'eau contenue dans la biomasse et le poids total de la biomasse humide (TH à l'état humide) ou de la biomasse sèche (TH à l'état sec). La TH à l'état humide est plus couramment utilisée par les professionnels de la foresterie et de l'énergie alors que la TH à l'état sec sert généralement aux professionnels du secteur du sciage. Une teneur en humidité élevée augmente le temps de traitement et l'énergie requise pour éliminer l'humidité. Elle influence aussi le stockage de la biomasse en contribuant à l'échauffement et à l'ignition spontanés. L'humidité augmente les coûts de transport, car le bois est plus lourd et prend plus de volume lorsqu'il est humide. La teneur en humidité à l'état humide des résidus forestiers varie entre 40 et 60 % et peut s'abaisser jusqu'à 10 % dans le cas des résidus de sciage, comme les copeaux de rabotage (Badger, 2002).

Densité apparente

La densité apparente est liée à la taille de la biomasse et se définit comme la masse totale des particules de biomasse divisée par le volume occupé par les particules. La densité apparente est un facteur limitant pour le transport de la biomasse, en particulier en ce qui a trait à la taille des chargements. On peut augmenter la densité apparente en réduisant la taille des particules de biomasse par déchiquetage ou broyage, ou encore en les comprimant en ballots, en granules ou en briquettes plus faciles à transporter et à utiliser. Par exemple, la densité apparente des granules de bois est de 600 kg/m^3, celle des copeaux de feuillus est de 320 kg/m^3, celle des copeaux de résineux est de 250 kg/m^3, celle de l'écorce est de 320 kg/m^3 et celle de la sciure est de 240 kg/ m^3 (Van Loo et Koppejan, 2007).

Teneur en feuillage/écorce

La teneur en feuillage/écorce est le pourcentage de feuillage / d'écorce dans la biomasse. Le feuillage des conifères contient de grandes quantités d'azote qui peuvent produire des émissions nocives d'oxyde d'azote (NOx) pendant la combustion. De plus, en raison de sa forte composante minérale, le feuillage peut accroître la teneur en cendres de la biomasse. On peut réduire la teneur en feuillage et en écorce en les laissant sécher et tomber sur le parterre de coupe, où ils fourniront des nutriments au sol forestier.

Contamination

La contamination fait référence au pourcentage, en volume ou en poids, de

contaminants dans la biomasse. Les contaminants les plus courants sont la terre, le sable et les roches (figure 2), le métal, d'autres matières inorganiques et des produits chimiques provenant de produits de préservation du bois ou de peinture à base de plomb. Par exemple, lorsqu'elle est empilée sur le sol, la biomasse (écorce, résidus broyés) peut se mêler à d'importantes quantités de contaminants comme de la terre et des roches. On peut aussi trouver des objets métalliques ou de plastique provenant des opérations forestières, comme des maillons de chaîne d'écorceur ou de scie à chaîne, des emballages de plastique ou des câbles d'acier. La terre, le sable et le gravier peuvent produire des dépôts minéraux dans les tuyaux des chaudières; les roches et les débris métalliques peuvent endommager l'équipement de déchiquetage et la contamination chimique de la biomasse peut causer des émissions nocives. Les billes submergées dans l'eau salée et les arbres poussant près de la mer peuvent contenir des sels susceptibles de corroder l'équipement et d'émettre des dioxines pendant la combustion. Le sel de voirie et les abat-poussière peuvent aussi contaminer les piles de résidus. La contamination peut mener à une teneur en cendres et à des dépôts minéraux plus importants que la normale, ce qui peut causer des problèmes dans les chaudières. Pour réduire la présence de contaminants, des pratiques strictes de manutention devraient être instaurées lors de la récolte, de la collecte, du transport et du stockage de la biomasse.

Teneur et composition en cendres

La cendre est la composante inorganique de la biomasse qui demeure après sa combustion complète. La teneur en cendres est plus élevée chez les essences feuillues que chez les essences résineuses et elle varie entre 0,5 % dans le bois blanc propre et 8 % dans l'écorce. Des éléments comme le Si, le Ca, le Mg, le K et le Na composent la majeure partie des cendres de la biomasse (Van Loo et Koppejan, 2007). Les cendres de bois contiennent souvent de 40 à 70 % d'oxyde de calcium, de 10 à 30 % d'oxyde de potassium et de 5 à 10 % d'oxyde de magnésium, ainsi que des oxydes d'autres éléments. Les essences feuillues ont tendance à contenir plus de potassium que les résineux (Ragland et coll., 1987). Ces éléments forment des minéraux à faible point de fusion, qui peuvent condenser en dépôts sur les surfaces de transfert de chaleur des chaudières et entraîner l'agglomération des particules de combustibles et de cendres, un phénomène appelé scorification (Stanford University, 2005). De plus, la composition des cendres influence leur température de fusion; une température de fusion faible peut occasionner des problèmes pour le matériel de combustion. Plusieurs problèmes de fonctionnement des usines de biomasse sont liés aux cendres, car un contenu élevé en cendres peut réduire la production de la chaudière, diminuer l'efficacité du chauffage et accroître les coûts d'élimination des cendres.

Teneur en hydrates de carbone

La teneur en hydrates de carbone de la biomasse ligneuse est une caractéristique particulière du processus de distillation dans la production de bioéthanol. Environ les deux tiers de la matière sèche du bois sont composés de polysaccharides (cellulose et hémicelluloses). La cellulose est le biopolymère le plus abondant et le plus important sur terre; ses molécules se regroupent en microfibrilles. La cellulose, qui est formée de chaînes linéaires de glucose, est relativement inerte pendant les traitements chimiques et n'est soluble que dans quelques solvants. Les hémicelluloses comprennent des chaînes d'hydrates de carbone ramifiées; les feuillus et les résineux sont différents non seulement en termes de teneur en hémicellulose totale, mais aussi en termes de constituants de l'hémicellulose (Stenius, 2000). Ainsi, le processus de distillation doit être optimisé en fonction de la teneur en cellulose et en hémicellulose (hydrates de carbone) de la biomasse, car elle varie selon les essences. Par exemple, le pin lodgepole contient 68 % d'hydrates de carbone, alors que le peuplier faux-tremble en contient 78 % en poids (Pettersen, 1984).

Teneur en lignine

La lignine est un biopolymère complexe amorphe, partie intégrante des parois cellulaires des arbres qui, avec les hydrates de carbone polymériques, donne aux arbres leur résistance structurale. La lignine est la partie de la végétation morte qui se décompose le plus lentement. La teneur en lignine du bois dépend de l'espèce d'arbre (McKnight et

Figure 2.
Contamination de la biomasse.

Mullins, 1981) et est généralement plus élevée chez les résineux que chez les feuillus (32 % pour le cèdre de l'Ouest, 23 % pour l'érable rouge). Lorsqu'on la brûle, la lignine produit plus d'énergie que la cellulose; une teneur élevée en lignine dans la biomasse est donc un bon attribut pour la combustion. Par ailleurs, la lignine joue un rôle important comme liant naturel dans la production de granules.

Teneur en produits d'extraction

Les produits d'extraction sont des mélanges complexes de matière organique de faible poids moléculaire : sucres, inositols, acides aminés, corps gras simples, acides carboxyliques, terpènes et composés phénoliques (Di Blasi et coll., 2001). Ils n'ont pas d'effet structural et sont solubles dans des solvants organiques neutres ou dans l'eau (Stenius, 2000). Pendant le séchage, certains de ces produits (p. ex., les terpènes) sont rejetés comme composés organiques volatils (COV). Ils font augmenter la valeur énergétique de la biomasse, mais peuvent corroder le matériel de transport ou de combustion et causer des problèmes majeurs au cours du stockage (dégazement, échauffement, autooxydation). Pour limiter leur effet négatif, on peut stocker la biomasse dans des zones bien aérées jusqu'à ce qu'une partie des COV soit rejetée. Cependant, cette pratique réduit la valeur calorifique et la quantité de matière disponible pour la production de tallöl et de térébenthine (Stenius, 2000).

Valeur calorifique

La valeur calorifique est la quantité totale de chaleur produite par la combustion complète d'une unité de masse de combustible (MJ/kg, GJ/tonne). On l'exprime par la valeur calorifique supérieure et la valeur calorifique inférieure. La valeur calorifique supérieure suppose que toute la vapeur d'eau formée durant le processus se condense en liquide, ce qui fait qu'il n'y a pas de perte de chaleur par évaporation. La valeur calorifique inférieure suppose que toute l'eau contenue dans le combustible s'évapore. Il s'agit donc d'une description plus réaliste du contenu énergétique de la biomasse que la valeur calorifique supérieure. Toutefois, on retrouve les valeurs calorifiques supérieures plus fréquemment dans la littérature et elles varient entre 18 et 23 MJ/kg, selon l'essence de bois. En général, les résineux présentent une valeur calorifique supérieure plus élevée (21 MJ/kg pour le Douglas) que les feuillus (19 MJ/kg pour l'érable), surtout en raison de leur teneur plus élevée en résine et en lignine (Nielson et coll., 1985). Cependant, grâce à leur densité plus élevée par volume, les feuillus constituent généralement une meilleure source de combustible (Röser et coll., 2008).

Figure 3.
Poêle à bois.

Caractéristiques cruciales de la biomasse pour les applications les plus courantes en bioénergie et biocarburants

Combustion directe

La combustion directe se produit lorsqu'on convertit la biomasse ligneuse en chaleur dans une chambre de combustion où l'entrée d'oxygène est contrôlée par des évents et/ou des ventilateurs. Les caractéristiques cruciales de la biomasse varient selon l'échelle de la technique de combustion directe : de la petite échelle de type domestique au chauffage centralisé et aux applications industrielles.

Les paragraphes qui suivent présentent les techniques de combustion directe les plus courantes ainsi que les caractéristiques cruciales de la biomasse qui les influencent pour ce qui est de la combustion.

Poêles et chaudières à bois

Les poêles à bois brûlent du bois de chauffage qui est placé manuellement dans une chambre de combustion (figure 3). Les cendres sont retirées à la main vers un bac à cendres. L'efficacité de la combustion dépend surtout de la qualité du bois de chauffage, mais aussi de la conception du poêle. Les vieux poêles, qu'on trouve dans les régions rurales du Canada, montrent une efficacité inférieure à 50 % et peuvent rejeter une grande quantité de petites particules. Les poêles plus modernes sont plus efficaces et peuvent comporter une unité de contrôle des émissions, ce qui fait qu'ils conviennent mieux aux milieux urbains.

Les chaudières à bois de chauffage servent à chauffer de l'eau dans des systèmes centralisés

de chauffage résidentiels ou commerciaux. Le bois est chargé manuellement dans la chambre de combustion plusieurs fois par jour. Des ventilateurs électriques contrôlent le brûlage. Certaines chaudières à bois (p. ex., les GARN) sont dotées de chambres de combustion conçues spécialement pour assurer une combustion plus complète et ainsi réduire la quantité de cendres et de goudron. Les chaudières à bois de chauffage équipées de réservoirs d'eau entourant les chambres de combustion peuvent stocker de l'eau chaude pendant plusieurs heures et n'être alimentées que deux fois par jour.

La caractéristique la plus critique du bois de chauffage est sa teneur en humidité. On atteindra une teneur en humidité souhaitable de moins de 25 % (à l'état humide) (Kofman et Kent, 2009) en fendant les billes et en stockant le bois fendu dans des hangars ouverts pour profiter des courants d'air. Fendre le bois manuellement demande beaucoup de main-d'œuvre; on utilise donc des fendeuses électriques ou hydrauliques. Le bois est souvent empilé manuellement et on doit chercher à optimiser l'aire de stockage, à exposer le plus possible la matière aux courants d'air et à faciliter l'accès pour le chargement et le déchargement. En Europe, les espaces clôturés cylindriques ou cubiques deviennent de plus en plus populaires. L'utilisation d'un séchoir à bois est aussi possible si une source de chaleur abordable est disponible ou si le client est disposé à payer.

Comme les différentes essences de bois voient leur teneur en humidité diminuer à des vitesses différentes, elles doivent être stockées séparément. Les piles de bois de chauffage doivent être disposées de 20 à 30 cm du sol et on doit laisser une distance de plusieurs pieds entre les rangées pour faciliter l'accès (Folkema, 1984). Si possible, les deux extrémités des pièces de bois doivent être exposées au vent. En été, le bois sèche rapidement; un été est généralement suffisant pour amener le bois à une teneur en humidité d'environ 30 % (Röser, 2012). Pour le bois séché pendant l'hiver, le processus peut prendre beaucoup plus de temps, parfois jusqu'à l'automne suivant. Sous les climats humides, un séchage adéquat peut prendre plus d'un an. Pour réduire la teneur en humidité, un entreposage approprié est essentiel, car le soleil, le vent et le temps sont les moyens les plus économiques d'y parvenir.

La densité du bois est aussi une caractéristique importante du bois de chauffage; les essences de bois de densité élevée (feuillus) sont privilégiées afin de réduire la fréquence d'alimentation des chaudières et des poêles. La teneur en sel est une autre caractéristique importante du bois de chauffage, bien que moins critique. Lorsqu'il brûle, le sel qui s'est accumulé dans le bois produira des dioxines, des substances gazeuses toxiques lorsqu'elles sont inhalées. Il n'est donc pas recommandé de brûler du bois de chauffage fait de billes qui ont été submergées dans l'eau de mer (p. ex., billes submergées, bois de grève).

Poêles et chaudières à granules

Les granules de bois sont de petites « pépites » cylindriques de fibres de bois (de la taille de la sciure) comprimées, dont le diamètre standard est de 6 et 8 (± 0,5) mm et dont la longueur peut atteindre quatre fois le diamètre. Leur dimension compacte et leur facilité de manutention, leur forte densité énergétique, leur faible teneur en humidité (inférieure à 10 %) et une production nette de carbone minimale les rendent très attrayantes comme source de bioénergie (Marinescu et Bush, 2009). Les poêles à granules sont des systèmes automatisés qui brûlent sans résidus et qui requièrent un entretien minimal (retirer les cendres, principalement); ils peuvent être alimentés en granules à partir d'un stockage interne ou externe à l'aide d'une vis sans fin. La plupart des poêles à granules disposent d'un thermostat pour contrôler la température; ils sont utilisés dans des applications résidentielles, pour chauffer une pièce ou un étage d'une maison ou d'un appartement. Les poêles à granules peuvent atteindre des valeurs d'efficacité élevées en raison de la grande qualité et du contenu énergétique des granules. Des règlements municipaux peuvent interdire le chauffage au bois pour des raisons liées à la qualité de l'air, mais les poêles à granules sont généralement permis.

Les chaudières à granules (figure 4) fonctionnent de façon similaire aux poêles à granules sauf que la combustion des granules chauffe l'eau d'une chaudière, qui circule dans un circuit fermé de chauffage. Les chaudières à granules sont offertes dans une variété de dimensions allant des applications domestiques au chauffage centralisé. Il faut s'assurer de

la faisabilité et de la fiabilité de la matière première et prévoir des zones de stockage adéquates, en particulier pour les grandes installations.

Les caractéristiques critiques des granules sont la teneur en cendres et en humidité. La teneur en cendres est le paramètre qui distingue les catégories de granules. Par exemple, les granules de classe A1 doivent contenir moins de 0,7 % de cendres (Obernberger et Thek, 2010). Une faible teneur en cendres améliore l'efficacité de la combustion, diminue les coûts de collecte et d'élimination des cendres et réduit les émissions de poussières. La teneur en humidité des granules doit normalement être inférieure à 10 % (à l'état humide) pour réduire le risque d'échauffement et de dégradation pendant le stockage (Obernberger et Thek, 2010).

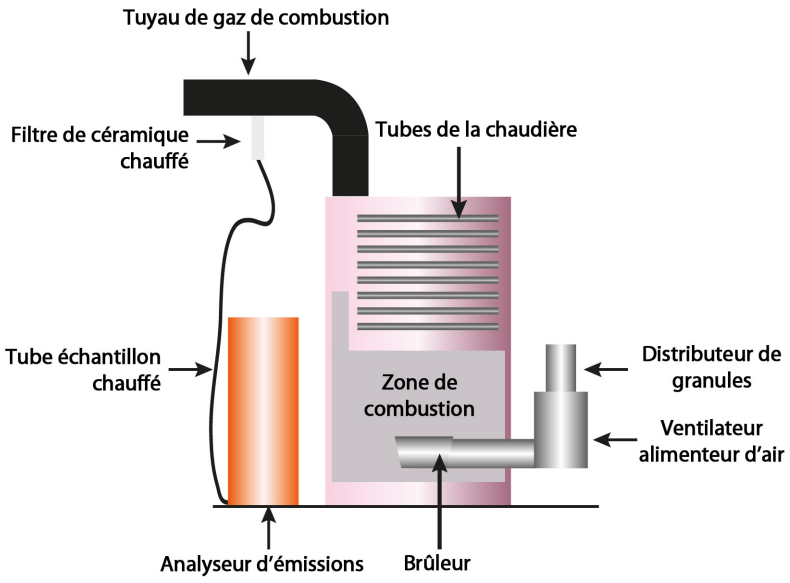
Chaudières à alimentation mécanique, à lit fluidisé bouillonnant et à lit fluidisé entraîné

Les chaudières à biomasse représentent des techniques de combustion directe conçues pour le chauffage central et les applications industrielles (production de chaleur, de vapeur et d'électricité); elles utilisent des copeaux de bois, des résidus ligneux broyés ou des granules. Les chaudières à biomasse sont automatisées et leur capacité peut dépasser 300 MWe (EPA, 2008). La cendre est généralement éliminée automatiquement dans ces systèmes. La biomasse est habituellement stockée dans des bâtiments distincts, puis amenée par convoyeur et dosée au brûleur. Il existe une variété de systèmes de combustion (p. ex., grilles fixes et mobiles, lits fluidisés) selon la dimension de la chaudière. Les chaudières à copeaux constituent la technologie de chauffage la plus courante pour le chauffage centralisé à toutes les échelles en Europe. La plupart des chaudières à copeaux européennes de petite et moyenne taille n'ont pas de personnel et sont contrôlées à distance par Internet ou par téléphone cellulaire. Le système de distribution de chaleur le plus courant est basé sur la circulation d'eau chaude dans des tuyaux d'acier isolés; chaque consommateur est branché au système par un échangeur de chaleur.

Pour que la combustion soit efficace et continue, la biomasse doit être de taille et de teneur en humidité uniformes. Selon le procédé de combustion et sa capacité, les chaudières peuvent accepter des teneurs en humidité allant jusqu'à 30 % dans le cas des systèmes à alimentation mécanique, bien que les plus grosses chaudières puissent s'accommoder de biomasse plus humide. Les systèmes à lit fluidisé peuvent accepter une teneur en humidité de 60 % (Badger, 2002). Certains systèmes peuvent utiliser la chaleur résiduelle pour sécher la matière première située dans la zone de chargement. La taille de particules la plus courante pour les chaudières à distributeur automatique est de « 4 po et moins » (c.-à-d. jusqu'à 4 po ou 10 cm). Les systèmes à lit fluidisé sont moins sensibles à la taille des particules et peuvent aller jusqu'à 6 po (15 cm) et plus (McKenzie et Stirgwolt, 2010).

L'uniformité de la dimension des particules est aussi une caractéristique importante qui peut contribuer à améliorer l'efficacité de la chaudière et le contrôle de la combustion. La norme européenne EN 14961-1:2010 donne des lignes directrices sur les pourcentages de particules fines (<3 mm ou <0,1 po) et de particules de gros calibre (>16 mm ou >0,6 po). L'importance de la teneur en contaminants est aussi très importante pour le rendement de la chaudière, car la terre, le sable et le gravier peuvent causer une vitrification des tuyaux de la chaudière; les roches et le métal peuvent endommager l'équipement de broyage secondaire et la contamination chimique de la biomasse peut entraîner des émissions nocives.

Figure 4.
Brûleur de granules.



Chaudières à cocuisson et à combustion mixte

Les chaudières à cocuisson et à combustion mixte sont des systèmes à combustion directe où la biomasse broyée en fine poudre de bois est soufflée dans la chambre de combustion en parallèle ou mêlée avec d'autres combustibles comme le charbon. La taille des particules et la teneur en humidité sont donc critiques. Ces systèmes demandent des particules fines de 1,5 mm ou 1/16 po ou moins (McKenzie et Stirgwolt, 2010). L'uniformité des tailles est aussi importante pour contrôler la combustion (temps de traitement) et pour fournir un mélange de combustibles uniforme; il est donc généralement nécessaire d'avoir recours à un broyeur à marteaux. Il faut aussi des teneurs en humidité faibles, autour de 10 %, pour permettre une fragmentation (broyage à marteaux) et une combustion idéales. Aucune contamination de terre, de roches ou de métal n'est permise (Badger, 2002). Les granules de bois respectent toutes ces contraintes et constituent actuellement le combustible privilégié pour la cocuisson avec le charbon.

Gazéification

La gazéification est un processus qui convertit la matière organique ou la matière carbonée d'origine fossile en monoxyde de carbone, en hydrogène, en dioxyde de carbone et en méthane. Pour ce faire, on fait réagir la matière à haute température (>700 C), sans combustion, avec une quantité contrôlée d'oxygène et/ou de vapeur. Le mélange gazeux obtenu est appelé gaz de gazogène, ou gaz synthétique (syngas), et présente une valeur calorifique d'environ 5 MJ/m^3, soit une valeur similaire à celle du bois, mais beaucoup plus faible que celle du gaz naturel (39 MJ/m^3). Pour qu'on puisse l'utiliser dans les processus de combustion, ce gaz doit être nettoyé et traité. Après le nettoyage, il peut brûler directement dans des moteurs à combustion interne, être utilisé dans les piles à combustible, servir à produire du méthanol et de l'hydrogène ou être converti, par le processus de Fischer-Tropsch, en carburant synthétique. Il existe plusieurs types de gazogènes commerciaux : à lit fixe à contre-courant ou équi-courant, à lit fluidisé, à lit entraîné ou à plasma.

La taille des particules de biomasse est une caractéristique cruciale qui contribue à l'uniformité du lit de gazéification dans le cas des gazogènes à lit fixe. Des particules de combustibles de taille uniforme contribuent à la distribution de la chaleur en réduisant au minimum les zones chaudes et froides dans le lit, en particulier pour les gazogènes des applications de production combinée de chaleur et d'énergie à petite échelle (50-150 kWe). De plus, la taille des particules de combustible influence la fiabilité de l'alimentation dans le gazogène, car les vis d'alimentation peuvent se coincer si les particules sont trop grosses. La taille et le format idéaux sont ceux des copeaux de bois de 3 po et moins. Les granules de bois dont le diamètre varie entre 6 et 8 mm et dont la longueur maximale est de 12 mm fonctionnent également bien dans les gazogènes.[1] Comme dans les systèmes à combustion directe, les gazogènes à lit fluidisé peuvent accepter une plus grande variabilité de taille que les gazogènes à lit fixe.

La teneur en humidité a aussi un effet important sur l'efficacité de la gazéification et sur la qualité du gaz synthétique. Une teneur en humidité élevée peut diminuer la température de gazéification et le gaz synthétique ne pourra être produit efficacement. La teneur en humidité optimale s'établit généralement entre 10 et 15 %[2] , mais les unités de gazéification plus grandes, comme celle de Nexterra[3], déclarent accepter des teneurs en humidité variant entre 6 et 60 %.

Pyrolyse

La pyrolyse est la décomposition thermochimique de la matière organique à haute température en l'absence d'oxygène. Par rapport à la gazéification, la pyrolyse recourt à des températures relativement basses (<700 °C). La pyrolyse du bois détruit les liaisons et produit des fragments de polymères d'origine (cellulose, hémicelluloses et lignine). Les produits de la pyrolyse de la biomasse sont le gaz synthétique, l'huile de pyrolyse et des résidus carbonés. Le rendement de ces produits est directement lié

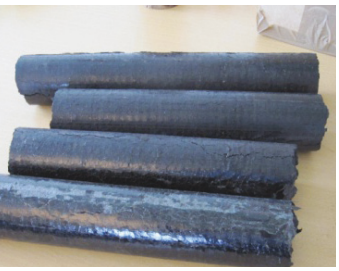
[1] Les Groom, chef de projet, Service forestier américain, communication personnelle, septembre 2008
[2] Stéphanie Trottier, chercheure, Alberta Innovates, communication personnelle, janvier 2012
[3] Tyler Abrams, chargé de compte principal, Nexterra, communication personnelle, mars 2012

à la composition de la biomasse. L'huile de pyrolyse se forme quand on chauffe rapidement la biomasse pour en éliminer les composés organiques volatils, puis qu'on condense les vapeurs. L'huile de pyrolyse est un fluide épais, noir et goudronneux qui contient jusqu'à 20 % d'eau en poids; elle a la viscosité du pétrole lourd et une valeur calorifique légèrement supérieure (18-26 MJ/kg) à celle du bois (Demirbas, 2009). On classe les procédés de pyrolyse en grandes catégories : carbonisation (très lente), traditionnelle (lente), rapide et éclair, selon les conditions de fonctionnement. Les temps de traitement de la carbonisation, de la pyrolyse traditionnelle, rapide et éclair sont respectivement les suivants : jours, 5-30 min, 0,5-5 s et moins de 1 s (Demirbas, 2009). La pyrolyse extrême, qui laisse principalement un résidu carboné, est appelée carbonisation, alors que la pyrolyse douce, effectuée à des températures plus faibles, est appelée torréfaction (voir la section *Torréfaction*).

La teneur en produits d'extraction de la biomasse est une caractéristique cruciale du processus de pyrolyse. Selon l'essence de bois, on obtiendra de grandes variations du rendement en huile de pyrolyse, qui entraîneront des variations de la production optimale de liquide allant jusqu'à 10 % de la masse sèche initiale du bois. Les variations du rendement en gaz synthétique selon la variété de bois sont plus faibles que pour les résidus carbonés et l'huile. Les espèces contenant beaucoup de produits d'extraction (p. ex., le thuya géant) produisent généralement moins d'huile de pyrolyse que celles qui en contiennent moins, comme le Douglas ou le hêtre (Di Blasi et coll., 2001).

Les processus de pyrolyse rapide exigent généralement des particules uniformes de petite taille. Selon Dynamotive, la taille souhaitable se situe entre 1 et 2 mm.[4] Toutefois, la technique de pyrolyse ablative de Pytec a donné de bons résultats dans un test mené avec des copeaux de bois ordinaires.[5] Comme la gazéification, la pyrolyse demande une teneur en humidité optimale dans la biomasse. Par exemple, les procédés de Pytec exigent une teneur en humidité de 10 % (Meier et coll., 2007). Une teneur élevée en lignine produit plus de résidus carbonés; les essences résineuses en produiront donc plus que les feuillues. De plus, en raison de leur forte teneur en lignine, les résineux peuvent nécessiter des temps de conversion plus longs que les feuillus. On s'attend à une production d'huile de pyrolyse plus élevée des variétés à forte teneur en lignine comme les résineux (Demirbas, 2009). Cependant, un contenu élevé en écorce dans la biomasse peut réduire le rendement en huile de pyrolyse. Selon le producteur d'huile de pyrolyse Envergent, les rendements en huile de pyrolyse sont de 70 à 75 % pour les feuillus, de 70 à 80 % pour les résineux, de 60 à 65 % pour l'écorce de feuillus et de 55 à 65 % pour l'écorce de résineux, en poids.[6]

Figure 5.
Briquettes torréfiées.



Torréfaction

On peut décrire la torréfaction de la biomasse comme une forme douce de pyrolyse, effectuée à des températures variant généralement entre 200 °C et 400 °C. La torréfaction de la biomasse, combinée à une densification (figure 5), produit un combustible solide de texture similaire au charbon, qui montre une valeur calorifique élevée, entre 19,8 GJ/t et 25,5 GJ/t.[7] De plus, les combustibles torréfiés sont hydrophobes, stériles et plus faciles à mettre en poudre que le bois. Ces propriétés permettent de stocker la biomasse torréfiée dans des espaces ouverts sans avoir à s'inquiéter de l'augmentation de la teneur en humidité, de la décomposition biologique et de l'autocombustion. En outre, on peut facilement mélanger, broyer, souffler et brûler la biomasse torréfiée avec du charbon. Les caractéristiques critiques de la biomasse pour le processus de torréfaction sont similaires à celles de la pyrolyse (voir la section *Pyrolyse*).

Fermentation aux fins de la production de bioéthanol

Deux réactions chimiques décrivent la conversion de la biomasse ligneuse en éthanol (figure 6) : l'hydrolyse, qui utilise des acides et des enzymes pour convertir la biomasse en sucres simples, et la fermentation, qui convertit les sucres en éthanol à l'aide de levures ou de bactéries qui se nourrissent des sucres.[8] La fermentation des sucres produit de l'éthanol, du dioxyde de carbone et de la

[4] www.dynamotive.com/technology/fast-pyrolysis/
[5] www.pytecsite.de
[6] www.envergenttech.com/rtp.php
[7] http://www.torrefuels.com/technology.html
[8] http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/ethanol.html

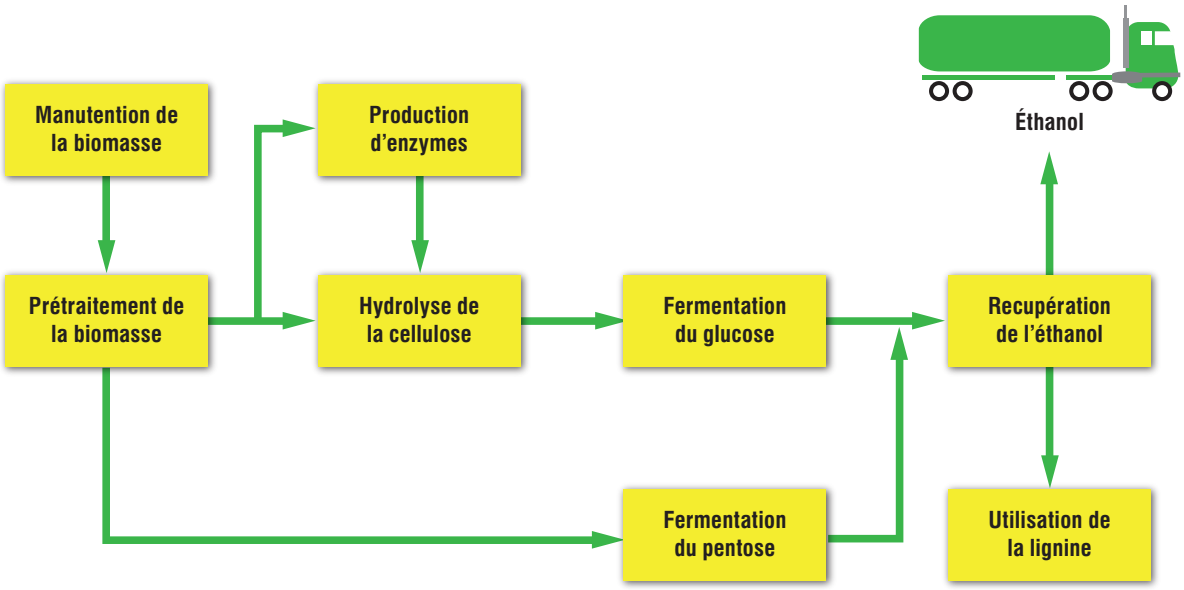


Figure 6. Processus de production de bioéthanol.

biomasse cellulaire. Le processus de production d'éthanol commence par la fragmentation de la biomasse (déchiquetage en particules de taille uniforme), suivie d'un prétraitement et de l'hydrolyse, où les sucres sont libérés et font l'objet d'une fermentation. On récupère ensuite l'éthanol du bouillon de fermentation, généralement par distillation.

La qualité de la matière première influence toutes les étapes du processus de production d'éthanol, mais elle touche particulièrement l'hydrolyse, qui est aussi l'étape la plus coûteuse. Les chercheurs ont amélioré l'efficacité de la production en mettant au point de nouveaux enzymes et de nouveaux procédés chimiques et mécaniques (p. ex., le vapocraquage)[9], ainsi qu'en convertissant la cellulose en monosaccharide fermentescible.

L'une des caractéristiques les plus critiques de la biomasse pour ce processus est la teneur en cellulose, qui a un effet direct sur le rendement en éthanol. Les espèces feuillues, comme les peupliers et les saules, sont à privilégier par rapport aux espèces résineuses, en raison de leur teneur élevée en cellulose et faible en lignine. Toutefois, ces espèces peuvent aussi présenter des niveaux élevés de xylanes, qui sont difficiles à faire fermenter. De plus, la présence d'écorce et de lignine diminue l'efficacité de la réaction d'hydrolyse; il est donc souhaitable d'utiliser des copeaux « blancs » propres (avec peu ou pas d'écorce) (Sannigrahi et Ragauskas, 2010). Comme pour la mise en pâte chimique, il est très important que la taille des copeaux soit uniforme pour accroître l'efficacité de l'hydrolyse. Il faut éviter les matières contaminées par la terre, les roches et autres corps étrangers qui réduisent considérablement l'efficacité de la réaction.

Densification

La densification est un processus qui consiste à augmenter la densité apparente des matières. Il existe deux produits de biomasse ligneuse densifiée sur le marché actuellement : les granules et les briquettes de bois. Les granules sont de petites « pépites » cylindriques de fibres de bois (de la taille de la sciure) comprimées, qu'on brûle dans des poêles ou des chaudières pour produire de la chaleur (voir la section *Poêles et chaudières à granules*). Plus grosses mais moins denses que les granules, les briquettes sont aussi faites de particules de bois comprimées en une variété de formes, des briques aux cylindres (figure 7). On utilise principalement les briquettes dans des applications industrielles (chaudières à biomasse), bien qu'il existe quelques applications à petite échelle dans des fermes ou des serres.

Les copeaux de bois de feuillus (chêne, bouleau, hêtre, saule, peuplier) et de résineux (pin, sapin, épinette) constituent la matière première pour la production de granules. La plupart des producteurs préfèrent les copeaux de résineux parce qu'ils sont plus faciles à convertir en granules et qu'ils contiennent plus de lignine, l'agent de liaison naturel qui tient ensemble

[9] http://www.iogen.ca/cellulosic_ethanol/what_is_ethanol/process.html

Photos: Thinkstock

Figure 7. Granules et briquettes de bois.

les particules de bois dans les granules et les briquettes. Peu importe l'espèce, le bois de la tige est préférable aux autres parties de l'arbre (écorce, racines, cimes, branches), parce qu'il faut, pour les granules, que la matière soit homogène et que ses caractéristiques de combustion soient prévisibles. Par exemple, les granules de bois faites de branches et de cimes peuvent avoir une teneur élevée en cendres et en écorce, ce qui limite leur accès aux marchés où il existe des normes strictes relatives à ces caractéristiques (marchés européens de granules de qualité supérieure). Il existe toutefois aussi un marché pour les granules de type industriel, qui servent aux producteurs d'énergie à grande échelle.

Au Canada, les résidus de sciage, comme les particules de rabotage et la sciure, sont les sources de matière première les plus courantes pour la production de granules et de briquettes de bois. Comme ce sont des sous-produits de la fabrication du bois de sciage, ces résidus exigent peu ou pas de séchage avant la production.

La biomasse destinée à la fabrication de granules et de briquettes de bois est évaluée selon les critères suivants : taille des particules, teneur en humidité, teneur en produits d'extraction, teneur en lignine, teneur en cendres et teneur en contaminants. Des normes et catégories ont été établies en fonction de ces caractéristiques critiques. Actuellement, il n'existe pas de normes pour les briquettes. L'une des caractéristiques les plus critiques est la taille des particules et la distribution des tailles. Une matière première convenant généralement pour les granules (avant la presse) comprendra des particules dont la taille maximale est de 4 mm (jusqu'à ¼ po) et moins de 50 % de particules de moins de 1 mm (Obernberger et Thek, 2004). Pour respecter ces critères, il faut prétraiter la biomasse par un déchiquetage et un broyage à marteaux subséquent.

Pour accroître l'efficacité des processus de fragmentation et de production de granules, la matière première doit respecter des teneurs en humidité particulières. La teneur en humidité (à l'état humide) souhaitée pour la biomasse (avant la presse) varie entre 8 et 12 % (Obernberger et Thek, 2004). Il faudra sécher les copeaux de bois à teneur en humidité plus élevée dans un séchoir rotatif ou à bande avant de les broyer. Les coûts de séchage peuvent être substantiels, pouvant atteindre plus de 20 % du coût total de production des granules (Mani et coll., 2006). Pour maintenir ou réduire la teneur en humidité de la biomasse, il est bon de la stocker dans des silos ou des entrepôts plutôt que dans des piles à l'extérieur. De plus, si les granules sont fabriquées à partir de résidus de coupe, il est recommandé d'entreposer les branches, les cimes et les petites billes dans des andains bien formés pour réduire leur teneur en humidité et en contaminants. Bien que la teneur en humidité et la taille des particules soient considérées comme des caractéristiques critiques pour la fabrication de briquettes, il n'existe pas de données rigoureuses ni de normes à ce jour. Des données non scientifiques provenant de producteurs de briquettes laissent entendre que des particules plus grandes et des teneurs en humidité plus élevées pourraient être acceptables, ce qui pourrait réduire le coût de fabrication.

Les produits d'extraction, comme les terpènes, qui sont rejetés comme COV pendant le séchage et l'entreposage, ont un effet corrosif sur l'équipement métallique (couvercles de convoyeur, séchoirs à copeaux, broyeurs à marteaux, presses à granules, silos). Les produits d'extraction (p. ex., les résines) ont aussi tendance à encrasser les broyeurs à marteaux. Par un processus d'autooxydation, les acides gras insaturés et d'autres produits d'extraction pourraient contribuer à l'échauffement des granules de bois pendant le transport et le stockage (Arshadi et Gref, 2005).

Une forte teneur en cendres dans les granules de bois réduit la valeur calorifique et donc l'efficacité de la combustion (Lehtikangas, 2001). De plus, cela augmente l'usure du matériel de fabrication et réduit l'efficacité de l'équipement de combustion. Des proportions élevées d'écorce dans la matière première entraîneront une plus grande teneur en cendres dans les granules. Bien qu'une teneur en cendres inférieure à 1 % soit requise pour les granules de qualité supérieure (pour usage résidentiel dans les poêles à granules), une proportion inférieure à 0,5 % est souhaitable pour réduire davantage la nécessité de retirer les cendres. Par opposition, la teneur en cendres souhaitée pour les granules industrielles est de moins de 3 % (Obernberger et Thek, 2004). Une teneur accrue en cendres peut aussi indiquer la présence d'impuretés de nature minérale comme du sable et de la terre dans la biomasse, ou une teneur élevée en composés inorganiques (p. ex., composés de calcium dans

certains feuillus). La présence d'impuretés dans la biomasse varie considérablement selon la méthode et la saison de manutention.

La contamination de la biomasse est une question critique dans la fabrication des granules de bois. La contamination par la terre, le sable et le gravier augmente l'usure des matrices de granules et la teneur en cendres des granules résultantes. De plus, la présence de gravier et de métal peut endommager l'équipement de fragmentation secondaire comme les déchiqueteuses et les broyeurs à marteaux (Ohmann et coll., 2004). La contamination est plus fréquente dans la matière première provenant de résidus de coupe ou de matériaux enfouis récupérés; il faut éviter la contamination de la biomasse à tout prix, de la forêt à la chaîne d'approvisionnemen t en produits.

La teneur en lignine de la biomasse est l'une des caractéristiques les plus critiques pour les granules de bois, car la lignine est un liant naturel dans le processus de fabrication. En raison de la friction entre les rouleaux et les matrices de la presse à granules, on atteint des températures élevées qui font fondre la lignine du bois. La lignine fondue pénètre dans les fibres de bois, ce qui accroît la durabilité des granules et leur donne une surface brillante. Les résineux ont généralement une teneur en lignine plus élevée que les feuillus. C'est pourquoi on ajoute de la biomasse résineuse pour accroître la cohésion des granules de feuillus. En Europe, on utilise couramment des additifs biologiques (p. ex., maïs et seigle) jusqu'à une proportion de 2 % pour accroître la cohésion des granules et réduire les coûts de fonctionnement (Obernberger et Thek, 2004). Par exemple, on peut ajouter du lignosulphonate à la biomasse pour améliorer la cohésion, mais cela peut faire augmenter la teneur en soufre et entraîner des émissions plus grandes de SOx.

Sommaire

L'objectif principal de cette introduction était de donner de l'information générale sur les caractéristiques de la biomasse qui sont cruciales pour les procédés les plus courants de production de bioénergie et de biocarburants. Le tableau 1 présente un sommaire des caractéristiques cruciales de la biomasse étudiées dans le présent document.

Tableau 1. Sommaire des caractéristiques cruciales de la biomasse[a]

	Procédés de combustion directe					Procédés thermochimiques de production de biocarburants				Procédés de densification
Caractéristiques critiques de la biomasse	Poêles / chaudières à bois de chauffage	Poêles / chaudières à granules	Chaudières à alimentation mécanique	Chaudières à lit fluidisé	Chaudières à cocuisson / cocombustion	Gazéification	Pyrolyse	Torréfaction	Fermentation	Mise en granules et en briquettes
Taille			Taille uniforme	Taille uniforme <10–15 cm	Taille uniforme <1,5 mm	Taille uniforme 2,5 cm × 2,5 cm × 0,6 cm	Taille uniforme 1–2 mm	Taille uniforme 1–2 mm	Taille uniforme	<4 mm, <50% de fines (<1 mm)
Teneur en humidité	15–20%	<10%	<30%	<60%	<10%	10–15%	<10%	<10%		8–12%
Proportion d'écorce/ de feuillage/de bois		F					F		F	F
Degré de contamination	L (sel)		F	F	F				F	F
Valeur calorifique	E	E	E	E	E					E
Teneur en cendres		<0.5%[b]								<0.5%[b]
Teneur en hydrates de carbone									E	
Teneur en lignine							F[c]		F	E
Teneur en produits d'extraction							F	F		F

[a] F= valeur aussi faible que possible souhaitée; E = valeur aussi élevée que possible souhaitée
[b] <0,5 % pour les granules de qualité supérieure; <1 % pour les granules industrielles
[c] À moins que les résidus carbonés et la lignine soient les produits cibles.

Remerciements

Ce travail a été rendu possible grâce à la réalisation de travaux de recherche intégrés portant sur l'ensemble de la chaîne de valeur du secteur forestier chez FPInnovations, en partenariat avec Ressources naturelles Canada. L'auteur aimerait remercier les collaborateurs suivants, qui lui ont fourni de précieuses informations et révisions : Shahab Sokhansanj, professeur, Groupe de recherche en biomasse et bioénergie, Université de Colombie-Britannique; Paul Bicho, chercheur principal, Canfor Pulp Innovations, Burnaby (C.-B.), et Joni Tanskanen, étudiant invité, Université des sciences appliquées de Carélie du Nord, Finlande.

Références

Arshadi, M.; Gref, R. 2005. *Emission of volatile organic compounds from softwood pellets during storage.* For. Prod. J. 55:132–5.

Badger, P.C. 2002. *Processing cost analysis for biomass feedstocks*. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Biomass Program. home.mtholyoke.edu/courses/tmillett/course/geog_304B/ornltm-2002199.pdf (consultation la plus récente en juillet 2013)

Demirbas, A. 2009. *Fuel properties of pyrolysis oil from biomass.* Energy Sources 31:412–419.

Di Blasi, C.; Brabca, C.; Santoro, A.; Hernandez, E.G. 2001. *Pyrolytic behavior and products of some wood varieties*. Combustion and Flame 124:165–177.

EPA 2008. *Catalogue of CHP technologies*. epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_full.pdf (consultation la plus récente en juillet 2013)

Folkema, M.P. 1984. *Manuel à l'intention des petits et moyens producteurs de copeaux d'énergie*. Inst. can. de rech. en gén. for. (FERIC), Pointe-Claire, QC, Manuel No. 6.

Kofman, P.D.; Kent, T. 2009. *Producing firewood from conifer first thinnings*, woodenergy.ie/media/coford/content/publications/projectreports/cofordconnects/ccn09-ht14.pdf (consultation la plus récente en juillet 2013)

Lehtikangas, P. 2001. *Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark*. Biomass and Bioenergy 20:351–360.

Mani, S.; Sokhansanj, S.; Bi, X.; Turhollow, A. 2006. *Economics of producing fuel pellets from biomass*. Applied Engineering in Agriculture 22(3):421–426.

Marinescu, M.V.; Bush, T.C. 2009. *Wood to energy: use of the forest biomass for wood pellets*. University of Florida EDIS Publication. edis.ifas.ufl.edu/fr269 (consultation la plus récente en juillet 2013)

McKenzie, P.; Stirgwolt, B. 2010. *Biomass conversions: not so cut and dried*. renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/10/biomass-conversions-not-so-cut-and-dried (last accessed in July 2013)

McKnight, T.E.; Mullins, E.J. 1981. *Les bois du Canada: Leurs propriétés et leurs usages*. Éditions du Pélican (Québec) en collaboration avec le Service canadien des forêts et le Centre d'édition du gouvernement du Canada, Approvisionnements et Services Canada. cfs.nrcan.gc.ca/publications/?id=18338 (consultation la plus récente en juillet 2013)

Meier, D.; Scholl, S.; Klaubert, H.; Markgraf, J. 2007. *Practical results from PYTEC's biomass-to-oil (BTO) process with ablative pyrolyser and diesel CHP plant: Success and visions for Bioenergy*. pytecsite.de/pytec_eng/download.php?what=6 (consultation la plus récente en juillet 2013)

Nielson, R.W.; Dobie, J.; Wright, D.M. 1985. *Conversion factors for the forest products industry in western Canada*. Forintek Special Publication No. SP-24R.

Obernberger, I.; Thek, G. 2004. *Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior*. Biomass and Bioenergy 27:653–669.

Obernberger, I.; Thek, G. 2010. *The pellet handbook: The production and thermal utilization of pellets*. Earthscan LLC.

Ohmann, M.; Nordin, A.; Hedman, H., Jirjis, R. 2004. *Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures of prevention*. Biomass and Bioenergy 27(6):597–605.

Pettersen, R.C. 1984. *The chemical composition of wood*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1984/pette84a.pdf (consultation la plus récente en juillet 2013)

Ragland, K.W.; Baker, A.J. 1987. *Mineral matter in coal and wood – replications for solid fueled gas turbines, combustion fundamentals and applications: 1987 spring technical meeting of the central 117 states section of The Combustion Institute*;1987 May 11–12; Argonne, IL. Argonne National Laboratory; Argonne, IL. 1987:117–122. fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1987/ragla87a.pdf (consultation la plus récente en juillet 2013)

Röser, D.; Asikainen, A.; Raulund-Rasmussen, K.; Stupak, I. 2008. *Sustainable use of forest biomass for bioenergy – a synthesis with focus on the Baltic and Nordic region*. Managing Forest Ecosystems, Vol. 12. Springer, Dordrecht, The Netherlands.

Röser, D. 2012. *Operational efficiency of forest energy supply chains in different operational environments*. Dissertationes Forestales No. 146.

Sannigrahi, P.; Ragauskas, A.J. 2010. *Poplar as a feedstock for biofuels: A review of compositional characteristics*. Biofuels, Bioproducts, and Biorefining 4:209–226.

Stanford University. 2005. *An assessment of biomass feedstock and conversion research opportunities*. gcep.stanford.edu/pdfs/assessments/biomass_assessment.pdf (consultation la plus récente en juillet 2013)

Stenius, P. 2000. *Forest products chemistry. Book 3 in the series: Papermaking science and technology*. Finnish Paper Engineers' Association, Helsinki, Fapet Oy.

Van Loo, S.; Koppejan, J. 2007. *Handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan, London, UK.

FPInnovations

Région Est
570, boul. Saint-Jean
Pointe-Claire, QC, H9R 3J9
514 630-4100
514 694-4351
publications@fpinnovations.ca

Région Ouest
2665 East Mall
Vancouver, BC, V6T 1Z4
604 224-3221
604 228-0999
publications@fpinnovations.ca

Mise en garde
Ce rapport est publié uniquement à titre d'information à l'intention des membres de FPInnovations. Il ne doit pas être considéré comme une approbation par FPInnovations d'un produit ou d'un service à l'exclusion d'autres qui pourraient être adéquats.

This publication is also available in English.

© Copyright FPInnovations 2013.
Imprimé au Canada sur du papier recyclé fabriqué par une compagnie membre de FPInnovations.

ISSN 2290-2325