

FICHE 1



Lutte contre
les changements
climatiques

BIOMASSE AGRICOLE QUALITÉ DE L'AIR

La production de chaleur grâce à l'utilisation de biomasse agricole repose sur une série d'étapes, de la production jusqu'à l'utilisation de la ressource. Chacune de ces étapes est liée à différents enjeux et impacts sociaux, économiques et environnementaux. À cet effet, l'une des principales préoccupations liées à l'utilisation de la biomasse agricole à des fins énergétiques demeure sans contredit les conséquences sur la santé humaine des rejets gazeux et particulaires dans l'atmosphère. La présente fiche s'attarde spécifiquement aux impacts de la filière de la biomasse agricole sur la qualité de l'air et propose un éventail de bonnes pratiques qui contribuent à assurer une utilisation de la biomasse respectueuse de la santé humaine.

Le fait de pouvoir respirer un air propre et sain est considéré comme une condition fondamentale à la santé humaine. Malheureusement, la pollution atmosphérique demeure une menace sérieuse pour le bien-être des communautés, particulièrement pour les habitants des milieux urbains. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), chaque année, à travers le monde, plus de deux millions de décès prématurés peuvent être attribués aux effets néfastes de la pollution de l'air.^[43]

Ci-dessous, en pictogrammes, les principales étapes de la filière de production et d'utilisation de la biomasse agricole. Les pictogrammes en noir représentent les étapes concernées par l'enjeu de la qualité de l'air.



Remise en culture



Implantation



Production



Récolte



Transport



Densification



Conditionnement



Distribution



Combustion



Gestion cendres

1. LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE AGRICOLE



Les polluants atmosphériques liés à l'activité humaine proviennent principalement du transport routier et de la combustion de charbon, d'hydrocarbures et de différents types de biomasses utilisés pour la production de chaleur ou d'électricité. La combustion de la biomasse agricole, en elle-même, est en lien direct avec cette problématique (voir la section **1. La combustion de la biomasse agricole**, page 2). Or, les étapes d'approvisionnement de la biomasse, c'est-à-dire la remise en culture, l'implantation, la production, la récolte, le transport, l'entreposage, le conditionnement, ainsi que la distribution, peuvent aussi jouer un rôle significatif sur la qualité de l'air (voir la section **2. Autres étapes de la filière et qualité de l'air**, page 10).

La filière de la biomasse agricole en Europe

En Europe, la biomasse agricole est utilisée depuis déjà plus de vingt ans^[40] notamment pour produire de la chaleur en remplacement des énergies fossiles.^[6] Un pays comme le Danemark, par exemple, utilise de la paille de céréales comme combustible dans plus de 120 réseaux de chaleur urbains ainsi que dans près de 9 000 chaudières résidentielles.^[12] Ces installations répondent à des normes très strictes d'émissions (40 mg/m³)^[13] Tableau 3 et sont en mesure de limiter de façon importante les impacts sur la qualité de l'air qui sont présentés dans cette fiche. Bien que la réalité québécoise ne soit pas la même, le modèle européen demeure inspirant et prometteur pour l'avancement de la filière dans la province. Pour cette raison, les activités de recherches et de développement devraient être soutenues et encouragées afin de permettre à la filière d'atteindre, notamment au niveau technologique, une maturité similaire à celle de plusieurs pays d'Europe.

Constituant une filière déjà éprouvée dans certains pays européens (voir l'encadré **La filière de la biomasse agricole en Europe**, ci-contre), l'utilisation de la biomasse agricole en remplacement des combustibles fossiles pour la production de chaleur constitue une solution de rechange intéressante dans une perspective de lutte aux changements climatiques. En effet, ses émissions de gaz à effet de serre (GES) sur l'ensemble de son cycle de vie sont nettement inférieures à celles des hydrocarbures (mazout, charbon ou gaz naturel).^[32] Néanmoins, comme toute filière énergétique basée sur la combustion, l'utilisation de la biomasse agricole pour la production de chaleur génère des polluants atmosphériques qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé à l'échelle locale ou régionale. Il faut savoir que les polluants associés à la combustion de ce type de biomasse sont essentiellement les mêmes que pour la combustion des hydrocarbures. La qualité et la quantité des rejets émis par cette filière dépendent essentiellement de l'équipement de combustion mis en place et des caractéristiques du combustible utilisé.

Afin de respecter le *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère* (RAA; c. Q-2, r.4.1) concernant les niveaux limites d'émission de particules prescrits, voire même d'aller au-delà, différentes mesures et bonnes pratiques peuvent être appliquées à cette filière. Elles permettront de réduire la quantité de contaminants générés par la combustion de la biomasse agricole et, par le fait même, ses impacts sur la santé humaine.



Combustion de biomasse.

© www.greenenergyfutures.ca



1.1. LES PRINCIPAUX POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES LIÉS À LA COMBUSTION ET LEURS EFFETS SUR LA SANTÉ

La combustion de la biomasse agricole entraîne le rejet de différents polluants dans l'atmosphère : des particules en suspension (PM : *particulate matter*), du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde d'azote (NO₂), du chlorure d'hydrogène (HCl), du dioxyde de soufre (SO₂), des métaux lourds (Cu, Pb, Cd, Hg), de l'ammoniac (NH₃) et de l'ozone troposphérique (O₃). Leurs risques potentiels pour la santé dépendent de plusieurs modalités, telles leur concentration dans l'atmosphère, la durée d'exposition, ainsi que l'âge ou l'état de santé des individus exposés.^[27]

Bien que les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer avec exactitude les facteurs limite pour chacune de ces modalités, le respect des normes d'émissions du RAA, une utilisation adéquate des systèmes de combustion et l'implantation de bonnes pratiques devraient permettre le maintien d'un air sain et de qualité pour les populations.

Néanmoins, une exposition prolongée à des polluants atmosphériques émis par un système de chauffage à la biomasse agricole associée à une mauvaise utilisation pourrait causer des effets négatifs sur le système respiratoire humain. Ceux-ci sont variables, mais il est possible d'en dégager les principaux : ^{[2] [3] [5] [22] [25] [27] [33] [43]}

- Toux
- Irritation du nez et de la gorge
- Inflammation des poumons
- Réduction des fonctions pulmonaires
- Effets cancérigènes

Certaines personnes vulnérables, comme les enfants, les personnes âgées, les individus souffrant de maladies chroniques et les femmes enceintes, peuvent présenter une sensibilité accrue lorsqu'exposées à un ou plusieurs contaminants atmosphériques issus de la combustion de la biomasse agricole.^[27]

Il est à noter que le chlore, en réagissant avec les composés organiques du combustible, peut générer des éléments traces comme les dioxines et les furanes (PCCD/F).^[42] Ceux-ci sont hautement toxiques^[21] et peuvent avoir des effets cancérigènes.^[34] Heureusement, les émissions de PCCD/F provenant de la combustion de biomasse agricole sont généralement faibles et demeurent à des seuils ne causant pas de problème pour la santé.^[5] La présence de métaux lourds et d'ammoniac dans les émissions est également très faible et ne représente pas un danger direct pour la santé humaine.^[39]



Nuages en haute atmosphère. © Wikimedia Commons, Arun Kulshreshtha

1.2. LES PARAMÈTRES INFLUENÇANT LA COMPOSITION DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS DE LA COMBUSTION

Plusieurs paramètres influencent les émissions de polluants lors de la combustion de la biomasse agricole. En contrôlant ces paramètres, il est possible de diminuer la quantité de polluants rejetés dans l'atmosphère et, ainsi, de réduire leurs impacts sur la qualité de l'air et la santé humaine.

1.1.1. COMPOSITION DE LA BIOMASSE AGRICOLE

Lors de la combustion de la biomasse agricole, le rejet dans l'atmosphère de matières particulaires de CO₂, de NO_x, de HCl et de SO_x peut avoir une incidence néfaste sur la santé humaine. Bien souvent, la concentration de ces produits à la sortie de la cheminée est intimement liée à la composition chimique de la biomasse utilisée lors de la combustion. De fait, le choix du combustible devient primordial.

En effet, de légères variations dans la composition chimique des cultures (voir le **Graphique 1**, ci-contre) peuvent entraîner des différences notables dans la composition des gaz de postcombustion (voir le **Tableau 1**, ci-contre). Les différentes biomasses agricoles ne produisent donc pas toutes les mêmes émissions.

La biomasse agricole se distingue également des hydrocarbures en termes de composition des rejets de polluants. Par exemple, à masse égale, un kilogramme de mazout léger, puisqu'il contient plus de carbone, produira plus de CO qu'un kilogramme de panic érigé, mais beaucoup moins de NO_x étant donné sa plus faible teneur en azote.



Copeaux de saule.

© Wikimedia

Graphique 1. Composition de divers combustibles (inspiré de Clarke et Preto^[11]).

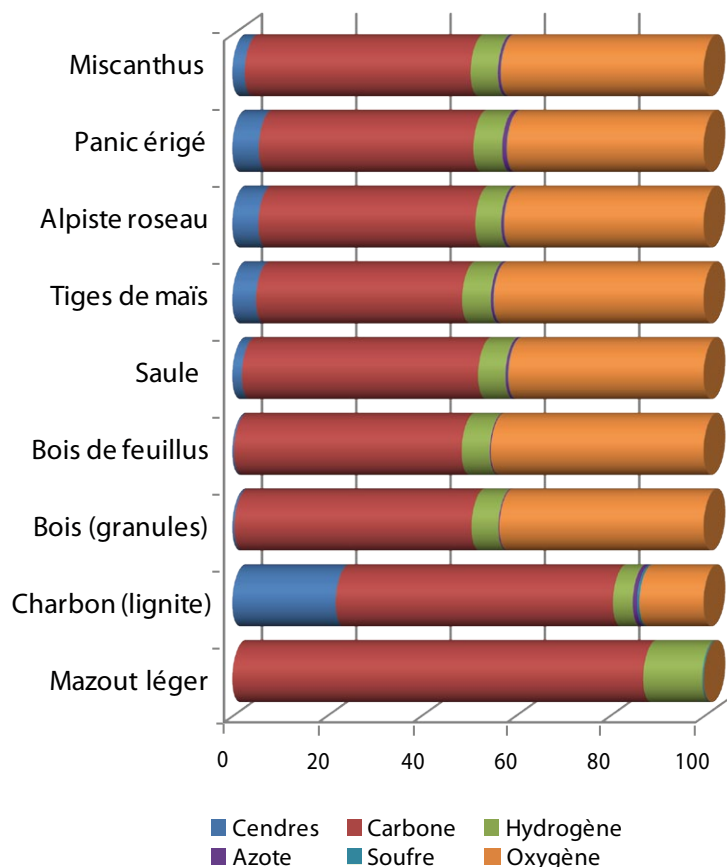
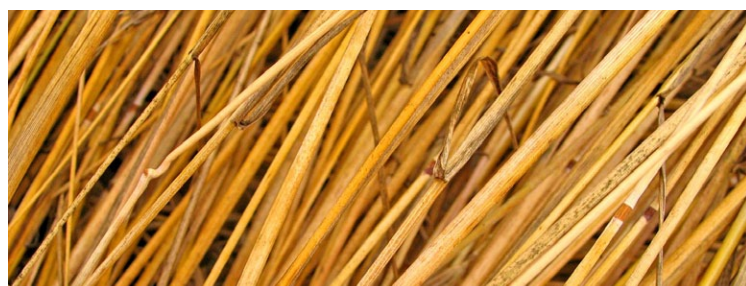


Tableau 1. Polluants émis par la combustion de trois types de biomasses (inspiré de Godbout et coll.^[17]), en g/kg^{biomasse}.

	CO	NO ₂	SO ₂	HCl	NH ₃
Bois	9,5	0,05	0,35	0,01	0,027
Panic érigé	4,6	0,44	1,14	0,01	0,002
Saule	17,8	0,16	0,38	0,00	0,004



Paille.

© www.photo-libre.fr



1.1.2. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE LA BIOMASSE

Pour le moment, peu de recherches se sont penchées sur l'effet des caractéristiques physiques de la biomasse sur ses rejets atmosphériques lors de la combustion.^[14] Ainsi, il est difficile de quantifier les impacts du taux d'humidité ou de la granulométrie, par exemple, sur les émissions de polluants. Néanmoins, il est possible de faire ressortir les tendances générales liées à ces caractéristiques.

Tout d'abord, plus la biomasse présente dans la chambre de combustion d'une chaudière est humide, plus il sera difficile d'atteindre une température de combustion optimale.^[39] L'eau contenue dans le combustible demandera une quantité d'énergie supplémentaire pour être chauffée et transformée en vapeur d'eau. Si la température idéale n'est pas atteinte, la combustion sera incomplète et causera l'émission d'une quantité importante de polluants.

En ce qui concerne la granulométrie du combustible, l'homogénéité doit être recherchée. En effet, la plupart des chaudières sont construites et calibrées pour brûler un type particulier de biomasse agricole, selon une forme et une dimension déterminées (vrac, granules, taille des copeaux, etc.). Toute modification dans l'homogénéité du produit éloignera le processus de combustion de son état optimal et augmentera la quantité de polluants émis.

1.1.3. EFFICACITÉ DU SYSTÈME DE COMBUSTION

L'efficacité de la chaudière est particulièrement importante pour contrôler les émissions de polluants. En effet, les chaudières utilisant la biomasse agricole émettent des quantités plus faibles de polluants atmosphériques lorsque le processus de combustion est optimal. Pour ce faire, une attention particulière doit être portée aux équipements, tant au niveau de la conception, du calibrage, que de l'entretien. Ainsi, pour que le processus de combustion soit optimal, une température élevée dans la chambre de combustion doit être atteinte et conservée, et la quantité d'air disponible pour la combustion doit demeurer à un niveau déterminé et constant. Des fluctuations

au niveau de ces paramètres, causées par des intrants trop volumineux, une granulométrie non uniforme, ou un taux d'humidité trop élevé augmenteront significativement les rejets atmosphériques.^[39]

1.1.4. INTRANTS POUR LA CULTURE DE LA BIOMASSE

La quantité et le type d'intrants utilisés durant la croissance d'une culture auront un impact significatif sur les gaz émis lors de sa combustion. En effet, une plante cultivée sur un sol enrichi d'un ou de plusieurs éléments chimiques en absorbera davantage durant sa croissance et, par conséquent, émettra plus de gaz liés à ces éléments. À titre d'exemple, une culture fertilisée avec des engrais azotés émettra, lors de sa combustion, une quantité plus importante de NO₂ qu'une culture non fertilisée. De plus, puisque les pesticides sont composés majoritairement d'azote, de soufre, de phosphore et de chlore, leur combustion entraînera l'émission d'une plus grande quantité de polluants dans l'atmosphère.^[10]



Jeunes plants de saule.

© Jérôme Lévesque

1.3. LA RÉGLEMENTATION EN PLACE EN MATIÈRE DE COMBUSTION

La réglementation mise en place par le gouvernement du Québec encadre les paramètres de combustion des combustibles (les émissions à la cheminée) et contribue ainsi à protéger la population.



Turbine à vapeur à biomasse.

© Wikimedia Commons

1.3.1. RÈGLEMENT SUR L'ASSAINISSEMENT DE L'ATMOSPHÈRE (RAA)

Au Québec, le *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère* (RAA; c. Q-2, r.4.1) légifère toute émission dans l'atmosphère résultant de l'utilisation de combustible.^[24] Ce règlement découle de la *Loi sur la qualité de l'environnement*. Ses directives touchent toutes les sources d'émissions fixes et de transport qui peuvent avoir un impact sur la qualité de l'air. Tous les projets de chauffage à la biomasse agricole (voir l'encadré **Définition des types de biomasses**, page suivante) mis en place au Québec doivent être conçus de façon à respecter le règlement en tout temps.

Tableau 2.

Valeurs limites d'émissions de particules ($PM_{2,5}$) d'appareils de combustion à la biomasse agricole lignocellulosique, selon quelques législations.

Autorité	Puissance nominale (MW)	Valeurs limites (mg/m^3)	
		Nouvel appareil	Appareil existant
Québec ^[24]	< 3 *	70	100
	≥ 3*	70	100
Regional District of Metro Vancouver ^[23]	< 3	50	100
	≥ 3	35	50
Allemagne ^{[21][8]}	> 0,04	20**	100
Danemark ^{[21][13]}	< 1	300	300
	> 1	30 ***	40

*Densification obligatoire

** À partir du 31 décembre 2014

*** À partir du 1^{er} janvier 2014

Tableau 3.

Valeurs limites d'émissions de particules ($PM_{2,5}$) dans les appareils de combustion de bois ou de cultures ligneuses.

[16] [21]

Puissance nominale (MW)	Valeurs limites de particules (mg/m^3 R de gaz sec)	
	Appareil nouveau	Appareil existant
< 3	150	600
≥ 3 et < 10	150	340
≥ 10	70	100

N.B. En ce qui concerne les cultures ligneuses, comme le saule à croissance rapide, les valeurs limites à prendre en compte sont celles de la biomasse forestière.



— CULTURES LIGNOCELLULOSIQUES

Actuellement, la législation qui encadre la combustion de biomasse agricole diffère selon la capacité de la chaudière et la forme du combustible. Dans le cas d'une chaudière d'une puissance de 3 MW et moins, la biomasse doit être brûlée sous une forme densifiée (ex.: granule) et respecter des limites d'émissions de particules en suspension de 70 mg/m³ pour un nouvel appareil et de 100 mg m⁻³ pour un appareil déjà existant, telles que définies par le RAA (voir le **Tableau 2**, page précédente). Pour des chaudières de plus de 3 MW, les mêmes normes s'appliquent, mais la biomasse peut être brûlée sous forme densifiée ou non. Dans tous les cas, les émissions de la combustion de biomasse agricole ne doivent pas :

- Dépasser 0,15% en poids d'halogènes totaux au point d'alimentation de l'appareil de combustion.
- Avoir une opacité de plus de 20%.
- Rejeter plus de 100kg de composés organiques volatiles (COV) dans l'atmosphère chaque jour.^[24]

Le **Tableau 2** compare les valeurs limites d'émission de particules pour la combustion de la biomasse agricole en vigueur au Québec, à Vancouver et en Allemagne. Le Québec est plus permissif sur la quantité de PM₁₀ autorisée que l'Allemagne. Toutefois, il demeure l'une de seules provinces, avec la Colombie-Britannique, à proposer une législation claire en la matière au Canada.^[17]

— CULTURES LIGNEUSES

L'utilisation de biomasse agricole d'origine ligneuse, comme le saule à croissance rapide ou le peuplier hybride, n'est pas régie par les mêmes limites d'émission que les cultures lignocellulosiques (plantes herbacées). En effet, bien que les techniques de production en champ de ces deux types de cultures soient similaires, leur composition chimique diffère. La composition chimique des cultures ligneuses ressemble à celle des essences forestières. Au Québec, elles sont donc soumises à la même réglementation. Les valeurs limites d'émissions de particules pour la combustion du bois du RAA sont présentées au **Tableau 3**.

— RÉSIDUS DE CULTURE

La combustion de résidus de culture est soumise aux mêmes limitations d'émissions que la biomasse d'origine lignocellulosique.

Définition des types de biomasses

— CULTURES LIGNOCELLULOSIQUES

Cultures de plantes herbacées pérennes dédiées à la production énergétique, implantées sur des terres agricoles marginales (ex.: panic érigé, alpiste roseau, miscanthus, etc.).

— CULTURES LIGNEUSES

Cultures d'arbres se réalisant sur des terres agricoles marginales, dédiées à la combustion (ex.: saule à croissance rapide, peuplier hybride, etc.) et dont la méthode de culture s'apparente plus à l'agriculture qu'à la foresterie (ex.: semées en haute densité, utilisation de machinerie agricole, etc.). Aussi appelées taillis à courte rotation.

— RÉSIDUS DE CULTURE

Résidus végétaux provenant de l'agriculture et constitués de parties de plantes cultivées qui ne sont pas vouées à la consommation alimentaire (ex.: pailles de céréales, tiges de maïs, foin de troisième qualité, etc.).

1.3.2. POUVOIR LÉGISLATIF DES MUNICIPALITÉS

Bien que le RAA permette de limiter les émissions de polluants liés à la combustion de la biomasse agricole au Québec, les municipalités peuvent, si elles le désirent, mettre en place des règlements plus contraignants.^[18] En effet, sur l'ensemble du territoire qui est sous sa juridiction, une ville ou un village peut décider d'imposer une législation plus restrictive que le règlement provincial.

1.4. LES BONNES PRATIQUES POUR LA RÉDUCTION DES IMPACTS DE LA COMBUSTION SUR LA QUALITÉ DE L'AIR

Bien que la législation encadre les émissions particulières provenant de la combustion de la biomasse agricole au Québec, il est possible d'adopter de bonnes pratiques qui contribueront à réduire les émissions de polluants atmosphériques, donc de réduire leurs impacts potentiels sur la santé humaine et l'écosystème.

1.4.1. CHOISIR LE BON COMBUSTIBLE

La production de chaleur à partir de la biomasse agricole est possible avec plusieurs cultures ligneuses et lignocellulosiques. Comme il a été expliqué précédemment, ces dernières possèdent des caractéristiques physicochimiques spécifiques qui auront un impact direct sur les émissions de polluants atmosphériques lors de leur combustion. Bien qu'il soit difficile de privilégier une culture à une autre, et malgré le manque de données dans la littérature scientifique, il est possible de faire ressortir quelques éléments qui permettront d'effectuer un choix éclairé.

D'abord, il est primordial de sélectionner des plantes qui sont adaptées au climat québécois. À cet égard, deux cultures lignocellulosiques, le panic érigé et l'alpiste roseau, se démarquent par leur adaptabilité à l'environnement du Québec.^[15] Le panic érigé se développe bien dans les régions plus chaudes de la province^[1], tandis que la croissance de l'alpiste roseau serait favorisée dans les régions plus froides.^[6] Ensuite, il importe de sélectionner les espèces en fonction de leurs caractéristiques physicochimiques. Par exemple, lors de la combustion, l'alpiste roseau produirait plus de CO et de CO₂, étant donné qu'il contient plus de carbone, alors que le panic érigé émettrait plus de HCl compte tenu de sa teneur plus élevée en chlore.^[7] La combustion de ces deux espèces entraîne donc l'émission de différents polluants.

En ce qui concerne les cultures ligneuses, le saule à croissance rapide et le peuplier hybride sont les deux espèces potentiellement adaptables aux conditions climatiques du Québec. Le peuplier hybride se développe mieux dans des sols loameux ou argileux,

alors que le saule préfère les sols argileux et mal drainés, mais s'adapte tout de même bien à différents types de sols.^[35] Leurs émissions de polluants provenant de leur combustion sont quasiment identiques, la qualité de l'air n'est donc pas le principal critère de sélection de l'une ou l'autre de ces espèces.^{[30] [44]}

Pour ce qui est de l'utilisation des résidus de culture comme combustible, il est difficile de déterminer quelles sont les plantes les plus intéressantes dans une perspective de gestion de la qualité de l'air. Puisqu'il s'agit d'une filière récente, l'information à ce sujet dans la littérature scientifique est rare. Par contre, plusieurs études sont en cours sur le territoire québécois, notamment du côté de la Coop fédérée. Les résultats devraient permettre d'en connaître davantage sur les résidus de cultures et d'orienter le choix vers les plus prometteurs.

1.4.2. OPTIMISER LE PROCESSUS DE COMBUSTION ET LES INSTALLATIONS

Contrairement aux poêles à bois domestiques, les chaudières à la biomasse sont des équipements hautement technologiques qui doivent être exploités avec soin. À ce titre, après l'implantation d'un système de chauffage à la biomasse agricole, il est très important de ne pas négliger l'entretien ni le recalibrage, qui doivent se faire régulièrement, et de faire appel à du personnel qualifié pour le faire. Par exemple, une mauvaise utilisation ou un mauvais calibrage peut entraîner une émission de particules (PM_{2,5}) de 30 à 250 fois supérieure à la normale, et ainsi avoir un impact non négligeable sur la qualité de l'air.^[28]

Il est également important de choisir une chaudière ayant une dimension adéquate pour les besoins prévus, et calibrée en fonction du combustible utilisé et de ses propriétés physicochimiques.

Ces différentes mesures devraient permettre de minimiser les émissions de polluants dans l'atmosphère, assurer une bonne qualité de l'air ambiant et prolonger la durée de vie des équipements (voir l'encadré **Principes d'une combustion de qualité**, page suivante).



1.4.3. FAVORISER L'HOMOGENÉITÉ DE LA BIOMASSE

Assurer le maintien d'une homogénéité dans la biomasse utilisée comme combustible est un défi technique important. Afin d'y parvenir, un grand nombre de facteurs tels que la composition chimique de la biomasse, ses propriétés physiques (humidité, densité, porosité, taille et forme) et son type de conditionnement (compression, séchage) sont à prendre en considération. Lorsque leurs variations sont importantes, l'atteinte d'une combustion de qualité devient difficile. Néanmoins, il est possible d'établir quelques bonnes pratiques afin de minimiser les variations d'homogénéité de la biomasse qui pourraient causer des perturbations dans le processus de combustion.

Il est donc impératif de s'assurer d'un approvisionnement en biomasse constant et qui respecte les caractéristiques établies lors du calibrage du système de chauffage. En effet, les exploitants de chaudières doivent être très exigeants en ce qui concerne la qualité de la biomasse qui leur est fournie, car de grandes fluctuations dans la taille du combustible ou le taux d'humidité peuvent avoir des conséquences importantes sur les émissions de polluants atmosphériques. L'étape du conditionnement et de l'entreposage de la biomasse ne doit pas non plus être négligée. En effet, des entrepôts mal gérés ou mal entretenus peuvent détériorer la biomasse (ex.: humidité, contaminant), ce qui causera des perturbations non désirées lors du processus de combustion.

Principes d'une combustion de qualité

Deux grands principes assurent une combustion de qualité tout en permettant de réduire et de contrôler les émissions de polluants lors de la combustion de la biomasse agricole^[39] :

- 1) Maintenir le processus de combustion et les installations à leurs niveaux de fonctionnement optimaux.
- 2) Favoriser l'homogénéité des caractéristiques physiques et chimiques de la biomasse utilisée.

1.4.4. MINIMISER LES INTRANTS

Bien que les différents types de biomasses agricoles puissent bénéficier légèrement d'un apport en fertilisants de synthèse ou organiques, notamment lors de l'étape d'implantation, il est possible d'obtenir des rendements similaires grâce à des mécanismes naturels de recyclage des éléments nutritifs à partir de la biomasse racinaire et foliaire non récoltée.^[15] Ce cycle naturel devrait être priorisé par rapport à l'utilisation d'engrais de synthèse et d'engrais organiques. Idéalement, l'utilisation de ces derniers ne devrait être considérée qu'après consultation d'un agronome. Le cas échéant, ce dernier pourra valider si l'utilisation de ces engrais est réellement justifiée pour le maintien de la MOS et des éléments nutritifs dans le sol. Par ailleurs, le respect de ce principe (minimisation des intrants) permettrait de réduire les émissions de NO_x et de NH₃ lors de la combustion.

1.4.5. UTILISER DES TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES

Plusieurs technologies permettent de réduire la quantité de particules émises, comme les filtres à manche, les filtres électrostatiques et les multicyclones.^[39] Ceux-ci empêchent une partie des polluants atmosphériques d'être rejetés dans l'atmosphère et d'être possiblement inhalés par les populations avoisinant les systèmes de combustion de la biomasse agricole. Il est donc intéressant d'investir dans des équipements fiables (chaudières, filtres, etc.) et de bonne qualité, afin de réduire les impacts potentiels sur la santé humaine.

L'achat et l'installation de ces équipements entraînent toutefois des coûts importants, notamment pour les fournaies d'une capacité de 100 kW et moins.^[5] Quelques années de recherche seront encore nécessaires pour rendre ces technologies plus abordables, donc plus accessibles aux exploitants de chaudières de petite taille.



Déchiquteuse.



2. AUTRES ÉTAPES DE LA FILIÈRE ET QUALITÉ DE L'AIR

Bien que la combustion soit la principale cause des émissions de polluants de la filière de la biomasse agricole à des fins énergétiques, les étapes qui la précèdent (remise en culture, implantation, production des cultures, récolte, transport, entreposage et conditionnement) engendrent elles aussi des émissions de polluants pouvant affecter la qualité de l'air.

2.1. LES PARAMÈTRES QUI INFLUENCENT LA QUALITÉ DE L'AIR

2.1.1. INTRANTS POUR LA CULTURE DE BIOMASSE

L'utilisation de fertilisants et de pesticides lors des étapes de remise en culture, d'implantation et de production peut avoir une incidence sur la qualité de l'air.

— UTILISATION DE FERTILISANTS

L'utilisation d'engrais organique (fumiers ou lisiers) et d'engrais de synthèse dans certaines cultures à vocation énergétique entraîne l'émission de NH_3 dans l'atmosphère. En effet, l'épandage de lisiers ou d'engrais azoté expose une partie de l'ammonium (NH_{4+}) qu'ils contiennent à l'air libre, favorisant une rapide volatilisation sous forme d'ammoniac. Ces émissions finissent éventuellement par se déposer au sol et contribuent à l'eutrophisation des cours d'eau et à l'acidification des écosystèmes aquatiques, en plus de pouvoir se transformer en N_2O .^{[15][19]}

— UTILISATION DE PESTICIDES

Une partie des pesticides épandus sur une zone cultivée peut, selon les conditions météorologiques (pression atmosphérique, température de l'air, vitesse du vent, humidité, etc.), se retrouver dans l'atmosphère et être diffusée dans l'environnement.^[36] Les pertes peuvent se faire au moment de l'application, mais également à partir des pesticides qui se trouvent à la surface du feuillage de la plante et à la surface du sol.^[38] Les pesticides peuvent

donc être transportés et se déposer dans des endroits où ils ne sont pas désirés, et ainsi affecter la santé humaine et les écosystèmes plus fragiles.^[20]

2.1.2. VÉHICULES MOTEURS ET MACHINERIE

L'utilisation de machineries agricoles dans plusieurs des étapes de la filière, dont les activités de transport et de livraison, a un impact important sur la qualité de l'air. En effet, ces véhicules nécessitent l'utilisation de combustibles fossiles pour leur fonctionnement et rejettent, par le fait même, du CO et du CO_2 et une quantité non négligeable de SO_x dans l'atmosphère.

2.2. LES BONNES PRATIQUES POUR LA RÉDUCTION DES IMPACTS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR

De la même façon que pour l'étape de combustion, il est important de mettre en place de bonnes pratiques afin de minimiser l'impact des autres étapes de la filière sur la qualité de l'air.

2.2.1. INTRANTS POUR LA CULTURE

L'utilisation de fertilisants et de pesticides devrait faire l'objet d'une surveillance étroite et d'une utilisation responsable lors des étapes de remise en culture, d'implantation et de production de la biomasse.

— UTILISATION DE FERTILISANTS

Contrairement aux cultures annuelles, les cultures de biomasse agricole offrent des possibilités d'enfouissement des engrais plus limitées^[15], dues à un travail moins fréquent du sol. Ainsi, l'azote ammoniacal (NH_{4+}) qui se retrouve dans les engrais provenant des fumiers d'animaux ou des boues municipales, mais aussi dans certains engrais azotés de synthèse, ne peut pénétrer profondément dans le sol et a tendance à se volatiliser en plus grande quantité.^[29] Par contre, la partie de l'azote qui s'incorpore dans le sol a moins de risque d'être perdue par la suite, car elle est rapidement captée par le système racinaire étendu de ces cultures. Compte tenu de ces caractéristiques, les fertilisants de synthèse et organiques devraient être utilisés seulement



après consultation auprès d'un agronome dans le but de déterminer si la diminution de la quantité des éléments chimiques essentiels à la croissance de la biomasse peut réellement devenir un facteur limitant pour le rendement.

De plus, les fertilisants devraient être appliqués uniquement lorsque les conditions du sol et la température sont optimales, afin de limiter les pertes vers l'environnement.^[9]

— UTILISATION DE PESTICIDES

Généralement, la quantité de pesticides utilisés pour la culture de la biomasse agricole est moins élevée que pour une culture annuelle. En effet, mis à part des applications d'herbicides occasionnellement utilisés durant la phase d'implantation, l'usage de pesticides est pratiquement nul une fois les plantes bien établies.^[15] Malgré la faible quantité utilisée, l'épandage de ces produits devrait tout de même se faire selon les directives du *Code de gestion des pesticides du Québec*, afin de minimiser les risques sur la santé humaine et l'environnement.

2.2.2. VÉHICULES MOTEURS ET MACHINERIE

Afin de réduire les émissions de polluants provenant de l'utilisation de la machinerie agricole mécanisée et de camions pour le transport, quelques mesures simples peuvent être mises en œuvre. Tout d'abord, il est important d'optimiser les déplacements sur et entre les parcelles exploitées et la ferme.^[16] Chaque utilisation inutile d'un véhicule ou d'une machinerie implique non seulement une dépense énergétique en combustibles fossiles, mais également des coûts supplémentaires pour les producteurs. Également, il est souhaitable que chaque camion transportant de la biomasse maximise l'espace de chargement disponible^[31], tout en respectant les limites imposées par la réglementation sur les normes de charges et dimensions des véhicules du gouvernement du Québec. Chaque transport évité permet de réduire la quantité d'émissions atmosphériques liée à cette étape de la filière. Finalement, un entretien régulier devrait être effectué sur tous les véhicules utilisés, afin de les maintenir en bon état de fonctionnement et éviter le rejet de polluants supplémentaires dans l'atmosphère.^[4]

Lutte contre
les changements
climatiques





CONCLUSION

L'utilisation de la biomasse agricole pour la production de chaleur, tout comme les combustibles fossiles, générera des polluants atmosphériques tels que les PM, le CO, le CO₂, les NO_x et le HCl. Ceux-ci peuvent avoir des effets néfastes pour la santé humaine. La composition chimique de la biomasse sélectionnée, ses caractéristiques physiques, l'efficacité du système de combustion, les intrants (fertilisants et pesticides) utilisés durant sa production et les émissions liées à l'utilisation de véhicules moteurs et de machinerie agricole auront tous un impact significatif sur la quantité de polluants émis.

Une chaudière calibrée, optimisée et ayant une puissance adéquate pour les besoins spécifiques de chaque projet permettra de réduire significativement la quantité totale d'émissions polluantes atmosphériques. Aussi, le maintien de l'homogénéité de la biomasse en termes de taux d'humidité, de taille et de granulométrie contribuera à assurer une combustion optimale et à conserver les émissions de polluants à un faible niveau. Finalement, l'utilisation de pesticides et d'engrais devrait être minimisée, ainsi que les déplacements effectués avec la machinerie agricole et les camions de transport. En plus du respect de la réglementation en place, l'implantation de ces bonnes pratiques contribuera au maintien d'une bonne qualité de l'air et d'un milieu de vie sain.

Voir le [Résumé des bonnes pratiques à adopter dans la filière de la combustion de la biomasse agricole pour la production de chaleur](#), page suivante.

RÉSUMÉ DES BONNES PRATIQUES À ADOPTER DANS LA FILIÈRE DE LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE AGRICOLE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR

<h2>COMBUSTION</h2> 	Choisir le bon combustible.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sélectionner des plantes qui sont adaptées au climat québécois.
	Optimiser le processus de combustion et les installations.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Effectuer un entretien et un calibrage réguliers des systèmes de contrôle automatisés et des pièces mécaniques de la machinerie. Disposer de personnel qualifié pour le faire. ■ Choisir une chaudière ayant une dimension adéquate pour les besoins prévus, et calibrée en fonction des propriétés physicochimiques du combustible utilisé.
	Favoriser l'homogénéité de la biomasse.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Assurer un approvisionnement constant en biomasse et qui respecte les caractéristiques établies lors du calibrage du système de chauffage. ■ Ne pas négliger l'étape du conditionnement et de l'entreposage.
	Minimiser les intrants.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Privilégier le cycle naturel de recyclage des éléments nutritifs. ■ Valider l'utilisation d'engrais de synthèse et d'engrais organiques auprès d'un agronome. Éviter leur utilisation lorsque possible.
	Utiliser des technologies de traitements des émissions atmosphériques.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Investir dans des équipements (chaudières, filtres, etc.) fiables et de bonne qualité.
<h2>AUTRES ÉTAPES</h2> 	Intrants pour la culture : fertilisants.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Valider l'utilisation d'engrais de synthèse et organiques auprès d'un agronome. Éviter leur utilisation lorsque possible. ■ Appliquer les fertilisants uniquement lorsque les conditions du sol et la température sont adéquates.
	Intrants pour la culture : pesticides.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Si un épandage est vraiment nécessaire, respecter les directives du <i>Code de gestion des pesticides</i> du Québec.
	Véhicules moteurs/ machinerie.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Optimiser les déplacements sur et entre les parcelles exploitées et la ferme. ■ Maximiser l'espace de chargement disponible dans chaque camion de transport. ■ Effectuer un entretien régulier de tous les véhicules et de la machinerie utilisés.

La Coop
fédérée

UPA L'Union des
producteurs
agricoles

Biopierre
L'Union des producteurs
agricoles

irda Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

CDR Coopérative de
Développement
Régional
Bas-Saint-Laurent/Côte-Nord
Coopérative de solidarité

BIÉNERGIE
MÉGANTIC

Coopérative agricole
de biomasse de la
Côte-du-Sud

AGRO ÉNERGIE

Partenaire financier principal



**FONDS D'ACTION
QUÉBÉCOIS POUR LE
DÉVELOPPEMENT DURABLE**

Partenaire financier

Québec



Nature Québec
sensible à tous les milieux

Cette fiche fait partie d'une série de quatre fiches publiés dans le cadre du projet *Combustion verte et climat : l'agriculture en renfort!* [en ligne : <http://www.naturequebec.org/combustion-verte-et-climat>], portant sur la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles pour le chauffage dans le domaine institutionnel, municipal, commercial, agricole et industriel, ainsi que sur les différents enjeux qui y sont reliés.

Rédaction : Jérôme Lévesque et Amélie St-Laurent Samuel
Collaborateurs : Sébastien Fournel et Marie-Noëlle Thivierge
Illustration de page couverture (haut) : Corsaire Design
Édition, graphisme et autres illustrations : Marie-Claude Chagnon
ISBN 978-2-89725-044-7 (imprimé) et 978-2-89725-045-4 (PDF)
© Nature Québec, juillet 2014 (2^e édition)

RÉFÉRENCES

FICHE 1



Lutte contre
les changements
climatiques

BIOMASSE AGRICOLE QUALITÉ DE L'AIR

[1] Agrinova, groupe AGÉCO, 2009. *Cultures énergétiques*. Fiche synthèse n° 2 préparée par le groupe de travail sur le milieu rural comme producteur d'énergie. Québec (Québec, Canada). 8 p. [En ligne.] http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/developpement_regional/ruralite/groupe_travail/Cultures_energetiques.pdf

[2] Anzola, M., 2012. *Biomass Boiler Emissions and Chimney Height. A Review of Practice in the UK and other EU countries*. Master Thesis, Sustainable Engineering: Renewable Energy Systems and the Environment. Glasgow (United Kingdom), University of Strathclyde. 94 p. [En ligne.] http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2012/Anzola.pdf

[3] Association pulmonaire du Canada (APC), 2013. «Pollution et qualité de l'air». Section Protégez vos poumons. [En ligne.] http://www.poumon.ca/protect-protégez/pollution-pollution/outdoor-exterior/pollutants-polluants_f.php

[4] Association québécoise pour la maîtrise de l'énergie (AQME), 2013. «L'entretien». Section Efficacité énergétique et GES. [En ligne.] <http://www.mamunicipaliteefficace.ca/61-efficacite-energetique-ges-l-entretien.html>

[5] Brassard, P., 2012. *Étude des émissions gazeuses et particulières de la combustion de biomasses agricoles et forestières*. Mémoire de maîtrise en génie agroalimentaire. Québec (Québec, Canada), Université Laval. 97 p. [En ligne.] <http://www.theses.ulaval.ca/2012/29173/29173.pdf>

[6] Brodeur, C., J. Cloutier, D. Crowley et coll., 2008. *La production de biocombustibles solides à partir de biomasse résiduelle ou de cultures énergétiques*. Québec (Québec, Canada), Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 16 p. [En ligne.] <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC032.pdf>

[7] Burvall, J., 1997. Influence of Harvest Time and Soil Type on Fuel Quality in Reed Canary Grass (*Phalaris arundinacea* L.). *Biomass and Bioenergy* 12 (3): 149-154.

[8] Bulliot, B., O. Decherf, L. Genin et M. Thill, 2010. *Étude des bonnes pratiques d'amélioration de la qualité de l'air dans les grandes métropoles européennes et mondiales*. Paris (France), Conseil régional Île-de-France. 246 p.

[9] Chantigny, M., 2002. «Émissions de protoxyde d'azote (N₂O) en agriculture, contribution des amendements organiques, des fertilisants minéraux et du labour». Extrait d'une conférence présentée au 65^e congrès de l'Ordre des agronomes du Québec. 8 p. [En ligne.] <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/chantigny.pdf>

[10] Chen, K., J. Mackie, E. Kennedy *et al.*, 2012. Determination of Toxic Products Released in Combustion of Pesticides. *Progress in Energy and Combustion Science* 38: 400-418.

[11] Clarke, S., et F. Preto, 2011. *Caractéristiques de combustion de la biomasse*. Fiche technique. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO). 7 p. [En ligne.] <http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/11-034.pdf>

[12] Danish Energy Agency, 2013. *Large and Small Scale District Heating Plants*. [En ligne.] <http://www.ens.dk/en/supply/heat-supply-denmark/large-small-scale-district-heating-plants>

[13] Force Technology, 2009. *Case Study: Straw fired District Heating in Thorsager, Denmark*. [En ligne.] <http://www.forcetechnology.com/NR/rdonlyres/DF717677-138A-49A6-B0D2-2903FBB7679F/4018/strawfiredheatinginthorsagerdenmark.pdf>

[14] Fournel, S., S. Godbout et J.H. Palacios, 2012. *Combustion de biomasses agricoles : prédire les émissions atmosphériques et l'influence des caractéristiques physico-chimiques*. Fiche synthèse. Québec (Québec, Canada), Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 2 p. [En ligne.] <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/combustion%20biomasse%20agricole.pdf>

[15] Gasser, M.-O., M. Bolinder, S. Martel et coll., 2010. *Impacts agroenvironnementaux associés à la culture et au prélèvement de biomasses végétales agricoles pour la production de bioproduits industriels*. Rapport final. Québec (Québec, Canada), Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 200 p. [En ligne.] <http://www.mapaq.gov.qc.ca/fr/Publications/IRDAImpactBiomassefev2012.pdf>

[16] Ginaldi, F., F. Danusco, F. Rosa *et al.*, 2012. Agro-Energy Supply Chain Planning: a Procedure to Evaluate Economic, Energy and Environmental Sustainability. *Italian Journal of Agronomy* 31 (7): 221-228.

[17] Godbout, S., J.H. Palacios, F. Pelletier et coll., 2010. *Combustion de la biomasse agricole : caractérisation des effluents gazeux et particulaires, revue des normes et élaboration d'un protocole de*



Alpiste roseau.

© Bas Kers sur Flickr



mesure. Rapport final au 11 février 2011. Québec (Québec, Canada). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 63 p. [En ligne.] http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/godbout-et-al-2010_rapport_combustion_caracterisation_protocol.pdf

[18] Godbout S., J.H. Palacios, J.P. Larouche et coll., 2012. *Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse agricole à la ferme*. Rapport final. Québec (Québec, Canada), Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 239 p. [En ligne.] <http://www.agrireseau.qc.ca/energie/documents/440.pdf>

[19] Gordon, R., R. Jamieson, V. Rodd et al., 2001. Effects of Surface Manure Application Timing on Ammonia Volatilization. *Canadian Journal of Soil Science* 81 (3): 525-533. [En ligne.] <http://pubs.aic.ca/doi/pdf/10.4141/S00-092>

[20] Hapeman, C.J., C.P. McConnell, A.M. Rice et al., 2003. Current United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service research on Understanding Agrochemical Fate and Transport to Prevent and Mitigate Adverse Environmental Impacts. *Pest Management Science* 59: 681-690. [En ligne.] <http://naldc.nal.usda.gov/download/11048/PDF>

[21] Lavric, E.D., A. Konnov and J. De Ruyck, 2004. Dioxin Levels in Wood Combustion. A review. *Biomass and Bioenergy* 26 (2): 115-145.

[22] Lebel, G., D. Busque, M. Therrien et coll., 2012. *Bilan de la qualité de l'air au Québec en lien avec la santé, 1975-2009*. Rapport final. Québec (Québec, Canada), Institut national de santé publique (INSPQ). 43 p. [En ligne.] http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1432_BilanQualiteAirQcLienSante1975-2009.pdf

[23] Metro Vancouver, 2009. *Greater Vancouver Regional District Agricultural Boilers Emission Regulation Amending Bylaw No. 1109*. Vancouver (British-Columbia, Canada), 9 p. [En ligne.] http://www.metrovancouver.org/boards/bylaws/Amending%20Bylaws/GVRD_Bylaw_1109.pdf

[24] Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), 2013. « Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère, ch. Q-2, r. 4.1 ». *Loi sur la qualité de l'environnement*. [En ligne.] http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/Q_2/Q2R4_1.htm

[25] Ministère du Travail, de l'Emploi, de la Formation professionnelle et du Dialogue social (MTEFPDS), 2012. « Acide chlorhydrique ou Chlorure d'hydrogène. Travailler mieux ». Section Dangers et Risques. [En ligne.] <http://www.travailler-mieux.gouv.fr/Acide-chlorhydrique-ou-Chlorure-d.html>

[26] Obernberger, I., and G. Thek, 2004. Physical Characterisation and Chemical Composition

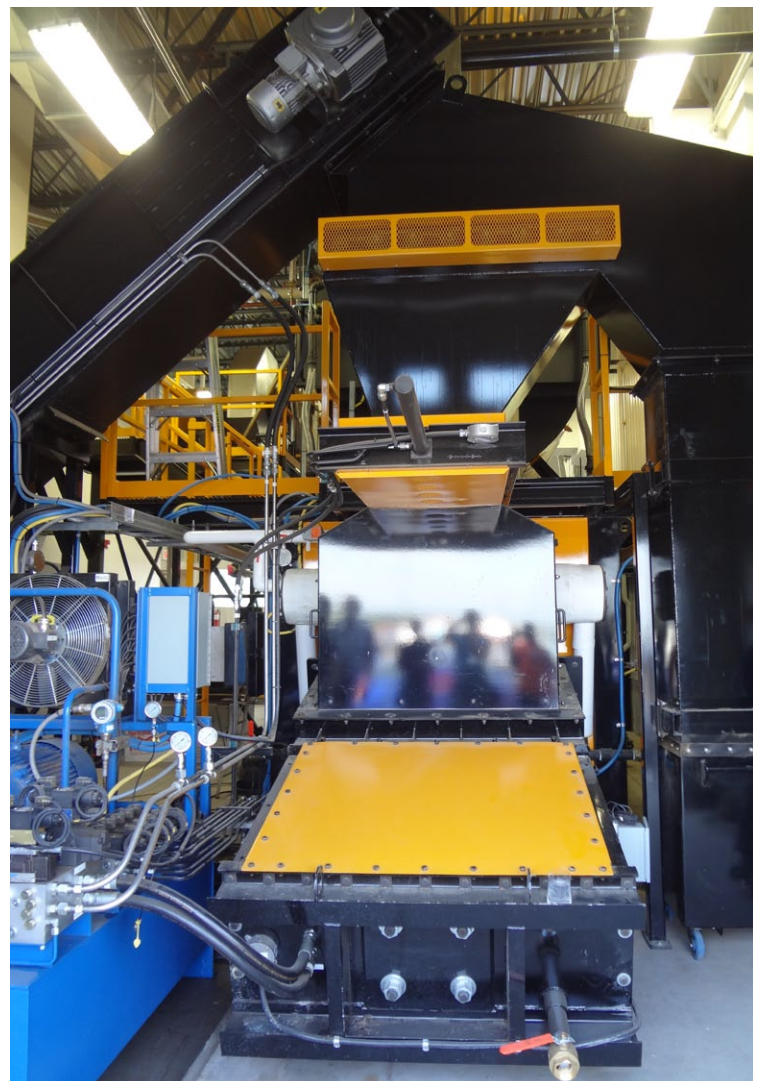
of Densified Biomass Fuels with Regard to their Combustion Behaviour. *Biomass and Bioenergy* 27 (6): 653-669.

[27] Organisation mondiale de la santé (OMS), 2006. *Ligne directrice OMS relatives à la qualité de l'air: particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre*. Mise à jour mondiale 2005. Synthèse de l'évaluation des risques. Genève (Suisse). 21 p. [En ligne.] http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_fre.pdf

[28] Press-Kristensen, K., 2013. Small Chimneys, Big Emissions. *Acid News* 1: 1-5. [En ligne.] http://www.airclim.org/sites/default/files/acidnews_pdf/AN1-2013.pdf

[29] Rochette, P., 2008. *Gestion des engrais minéraux et organiques: volatilisation de l'ammoniac*. Colloque en agroenvironnement. CRAAQ. Drummondville, 27 novembre 2008. [En ligne.] http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/Rochette_Philippe_AR.pdf

[30] Saidur R., E.A. Abdelaziz, A. Demirbas et al., 2011. A Review on Biomass as a Fuel for Boilers. *Renewable and Sustainable*



Chaudière à la biomasse.

© Jérôme Lévesque

Energy Reviews 15 : 2262-2289. [En ligne.] http://www.academia.edu/1211417/A_review_on_biomass_as_a_fuel_for_boilers

[31] Sampson, C., J. Agnew and J. Wassermann, 2012. *Logistics of Agricultural-Based Biomass Feedstock for Saskatchewan*. Research Report prepared by PAMI for ABC Steering Committee, SaskPower and NRCan. Humboldt. 231 p. [En ligne.] <http://pami.ca/wp-content/uploads/2012/06/Research-Report-Logistics-of-Agricultural-Biomass-Feedstock-for-Saskatchewan.pdf>

[32] Samson, R., and S. Bailey Stamler, 2009. *Going Green for Less: Cost-Effective Alternative Energy Sources*. C.D. Howe Institute Commentary 282. Toronto (Ontario, Canada). 25 p. [En ligne.] http://www.cdhowe.org/pdf/commentary_282.pdf

[33] Santé Canada, 2012. « L'ozone ». Section Santé de l'environnement et du milieu du travail. Qualité de l'air. Air intérieur. Les polluants de l'air intérieur. [En ligne.] <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/in/poll/ozone/index-fra.php>

[34] Santé Canada, 2005. « Dioxines et furanes ». Section Votre santé et vous. [En ligne.] <http://www.hc-sc.gc.ca/hl-vs/iyh-vsv/envIRON/dioxin-fra.php>

[35] Sigouin, M.E., et S. Gaussiran, 2006. La culture du peuplier hybride. Centre technologique des résidus industriels. Association forestière de l'Abitibi-Témiscamingue inc. *Le couvert boréal* 2 (1) : 16-17. [En ligne.] http://www.afat.magnummedia.ca/images/file/peup_hybride_maf.pdf

[36] Tellier, S., 2006. *Les pesticides en milieu agricole : état de la situation environnementale et initiatives prometteuses*. Rapport. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques en milieu terrestre, Service des pesticides. 90 p. [En ligne.] <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/pesticides/etat-env/etat-env.pdf>

[37] Union européenne, 2010. Directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution) (refonte), *Journal officiel de l'Union européenne*. [En ligne.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:FR:PDF>

[38] Van Den Berg, F., R. Kubiak, W.G. Benjey *et al.*, 1999. Emission of Pesticides into the Air. *Water, Air and Soil Pollution* 115: 195-218.

[39] Van Loo, S., and J. Koppejan, 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Sterling (VA, United States), S. Van Loo et Jaap Koppejan (eds). 442 p.

[40] Warnant, G., F. Rabier, D. Marchal et Y. Schenkel, 2006. Grains et paille combustibles : une autre voie de valorisation des céréales, dans : *Livre blanc Céréales*. Gembloux. Université de Liège (Belgique), 13 p. [En ligne.] <http://www.gembloux.ulg.ac.be/pt/LIVREBLANC/LBfev2006/PB/Grains%20et%20paille%20combustible.pdf>

[41] Weston, K., 1992. Chapter 3: Fuels and Combustion, pp. 85-132. In: *Energy Conversion*. West Publishing Company, College & School Division. 650 p. [En ligne.] <http://www.personal.utulsa.edu/~kenneth-weston/chapter3.pdf>

[42] Williams, A., J.M. Jones, L.M. and M. Pourkashanian, 2011. Pollutants from the Combustion of Solid Biomass Fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 38 (2): 113-137.

[43] World Health Organization, 2006. *Air Quality Guidelines: Global Update 2005*. Copenhague (Danemark). 484 p. [En ligne.] http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

[44] Xiong, S., Q.G. Zhang, D.Y. Zhang *et al.*, 2008. Influence of Harvest Time on Fuel Characteristics of Five Potential Energy Crops in Northern China. *Bioressource Technology* 99 (3): 479-485.



ISBN 978-2-89725-044-7 (imprimé)
ISBN 978-2-89725-045-4 (PDF)

Nature Québec
sensible à tous les milieux