

**Combustion de la biomasse agricole :
caractérisation des effluents gazeux et
particulaires, revue de normes et
élaboration d'un protocole de mesure**

Rapport final

Rapport présenté à :
Direction de l'agroenvironnement et du
développement durable
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de
l'Alimentation du Québec



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Projet IRDA # : 100037

Par :

Stéphane Godbout, ing., P.Eng., Ph.D., agr.
Joahnn Palacios, étudiant gradué
Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.
Jean-Pierre Larouche, chimiste

23 mars 2010

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).



Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités d'acquisition de connaissances, de recherche, de développement et de transfert visant à favoriser le développement durable de l'agriculture.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

**Combustion de la biomasse agricole :
caractérisation des effluents gazeux et
particulaires, revue de normes et élaboration
d'un protocole de mesure**

Rapport final

Présenté à :

Direction de l'agroenvironnement et du développement durable
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
200, chemin Sainte-Foy, 9^e étage
Québec, Qc, G1R 4X6

Préparé par :

Copie originale signée

Stéphane Godbout, ing., P.Eng., Ph.D. et agr.
IRDA

Copie originale signée

Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.
IRDA

Copie originale signée

Joahnn Palacios, étudiant gradué
IRDA

Copie originale signée

Jean-Pierre Larouche, chimiste
IRDA

23 mars 2010

Équipe de réalisation du projet :

Répondant et responsable scientifique : Stéphane Godbout ing. P.Eng, agr., Ph.D., IRDA
Chargé de projet : Joahnn Palacios, étudiant gradué
Collaborateurs : Frédéric Pelletier, ing. M.Sc. IRDA
Stéphane P. Lemay, ing. P.Eng, Ph.D., IRDA
Jean-Pierre Larouche, chimiste, IRDA
Dan Zegan, ing., M.Sc., IRDA
Martin Belzile, ing. jr., M.Sc., IRDA

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Stéphane Godbout
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 646-1075
Télécopie : 418 644-6855
Courriel : stephane.godbout@irda.qc.ca

Remerciements :

Les auteurs remercient le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec pour sa contribution financière à ce projet de recherche. Des remerciements sont également adressés à l'IRDA pour avoir fourni les ressources humaines nécessaires à la réalisation de l'étude.

Résumé

Le Gouvernement du Québec souhaite favoriser et encadrer adéquatement l'émergence de projets locaux de combustion de la biomasse agricole. Actuellement, il existe un intérêt réel pour l'utilisation de certaines biomasses agricoles à titre de combustible dans les chaudières à biomasse. Le présent projet visait à faire l'inventaire et la caractérisation des composantes des effluents gazeux et particulaires issues de la combustion de la biomasse agricole, de faire un survol des normes en place et d'établir un protocole simplifié de mesure de ces émissions à partir d'un processus de révision de littérature rigoureux.

L'étude de la littérature démontre que la biomasse a de fortes chances de contenir du chlore et de l'azote qui entraîneraient des émissions de HCl et NO_x. Également, la composition des émissions dépend de multiples facteurs tels le type de combustible, l'efficacité de la combustion (combustion complète ou incomplète) ou les caractéristiques du combustible. Selon cette littérature, les principaux composés issus d'une combustion incomplète seraient le monoxyde de carbone (CO), le matériel particulaire comme la suie, le char ou les hydrocarbonés lourds condensés (goudron), l'ozone (O₃), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatils non méthaniques (COV_{nM}), le méthane (CH₄), l'ammoniac (NH₃), les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzo-furanes (PCDF). Les principaux produits issus d'une combustion complète seraient le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (NO_x) principalement le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂), les oxydes de soufre (SO_x) comme le monoxyde de soufre (SO) et le dioxyde de soufre (SO₂), l'acide chlorhydrique (HCl), les métaux lourds et le matériel particulaire issu de la combustion complète (P₁₀ et P_{2.5}).

Le survol des différentes normes démontre qu'il y a peu de pays qui disposent d'une normalisation spécifique pour la combustion de la biomasse à des fins énergétiques. Même si la réglementation portant sur le bois comme élément de combustion est bien déterminée, largement documentée et normalisée, il n'existe peu, ou pas de législation officielle en matière de combustion des biomasses agricoles. Il en est de même pour les méthodes de vérification de leurs émissions. Cependant, différents pays ont entrepris des démarches afin de mettre en place des procédures de certification des biomasses et des méthodes d'évaluation d'équipements de combustion.

Afin de réduire les coûts et d'aiguiller les promoteurs ou les intervenants du milieu, un protocole simplifié est proposé dans le rapport. Dans un contexte d'étude préliminaire, cette approche simplifiée vise à, alléger le nombre de composés à mesurer afin de déterminer le potentiel de la biomasse ou de la chaudière avant d'entreprendre des études plus complètes des émissions en conformité avec le cahier 4 (MDDEP, 2009).

Finalement les auteurs émettent des recommandations afin de faciliter et d'encadrer le développement de cette filière. Il est recommandé de mettre sur pied un système de certification de la biomasse et de produire un guide permettant de déterminer le potentiel d'une biomasse spécifique.

Table des matières

| | |
|--|------|
| Résumé..... | v |
| Table des matières..... | vi |
| Liste des tableaux..... | viii |
| Liste des figures..... | viii |
| 1 Introduction..... | 9 |
| 1.1 Contexte..... | 9 |
| 1.2 Problématique..... | 11 |
| 1.3 Objectifs du projet..... | 11 |
| 2 Inventaire et caractérisation des émissions de gaz et de particules issues de la combustion de la biomasse agricole et forestière..... | 13 |
| 2.1 Stratégie et démarche de recherche..... | 13 |
| 2.2 Résultats..... | 19 |
| 2.2.1 Description générale du processus effectué lors de la revue de littérature systématique..... | 19 |
| 2.2.2 Analyse de la littérature retenue et réponse à la question de recherche..... | 19 |
| 2.2.3 Caractérisation des émissions issues d'une combustion complète..... | 21 |
| 2.2.4 Caractérisation des émissions issues d'une combustion incomplète..... | 24 |
| 2.3 Discussion..... | 27 |
| 3 Revue des normes et des méthodes standardisées de mesure..... | 28 |
| 3.1 Introduction et méthodologie..... | 28 |
| 3.2 Révision des normes liées à la combustion de biomasses et les méthodes de mesure des émissions..... | 28 |
| 3.3 Comparaison de normes et guides de combustion de biomasses adoptées dans différents pays..... | 34 |
| 3.3.1 Allemagne..... | 34 |
| 3.3.2 Australie et Nouvelle-Zélande..... | 34 |
| 3.3.3 Autriche..... | 35 |
| 3.3.4 Canada..... | 35 |
| 3.3.5 Danemark..... | 36 |
| 3.3.6 États-Unis..... | 36 |
| 3.3.7 Finlande..... | 37 |
| 3.3.8 France..... | 37 |
| 3.3.9 Norvège..... | 37 |
| 3.3.10 Suède..... | 38 |
| 3.3.11 Organisation internationale de normalisation (ISO)..... | 39 |
| 3.4 Discussion sur la revue des normes et des méthodes standardisées de mesure..... | 39 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4 | Protocole simplifié de mesure des émissions atmosphériques issues de la combustion de biomasses..... | 40 |
| 4.1 | Introduction et méthodologie | 40 |
| 4.2 | Pré-échantillonnage..... | 40 |
| 4.3 | Échantillonnage..... | 42 |
| 4.3.1 | Contrôle et assurance de la qualité de l'échantillonnage | 42 |
| 4.3.2 | Principes méthodologiques | 43 |
| 4.4 | Post-échantillonnage | 45 |
| 5 | Conclusion..... | 46 |
| 6 | Recommandations | 47 |
| 7 | Références | 48 |
| | Annexe 1. Évaluation des critères d'inclusion et de pertinence lors de l'étape 4 de la revue systématique de la littérature..... | 53 |
| | Annexe 2. Résultats de l'évaluation de la validité des écrits à l'étape 5 de la revue systématique de la littérature..... | 57 |
| | Annexe 3. Liste des articles scientifiques résultant du processus de revue systématique de la littérature..... | 58 |
| | Annexe 4. Émissions types relevées dans la littérature..... | 60 |
| | Annexe 5. Normes ou guides européens et américains pour biocombustibles solides et leur analyse..... | 62 |

Liste des tableaux

| | | |
|------------|---|----|
| Tableau 1. | Bases de données retenues pour la revue systématique | 14 |
| Tableau 2. | Mots clés et expressions utilisés lors de la revue systématique | 15 |
| Tableau 3. | Liste des critères d'inclusion pour la sélection des articles scientifiques lors de l'étape 2 de la revue systématique..... | 16 |
| Tableau 4. | Liste des critères de pertinence pour la sélection des articles scientifiques lors de l'étape 3 de la revue systématique..... | 17 |
| Tableau 5. | Évaluation de la validité des articles scientifiques retenus pour l'étape 5 de la revue systématique | 18 |
| Tableau 6. | Comparaison de la structure normative du secteur de la combustion de biomasses d'Europe et des États-Unis | 29 |
| Tableau 7. | Méthodes de détermination de composants issus d'un équipement combustion | 44 |

Liste des figures

| | | |
|-----------|---|----|
| Figure 1. | Méthodes d'échantillonnage et analyse..... | 31 |
| Figure 2. | Système de conditionnement des échantillons par tunnel de dilution..... | 33 |
| Figure 3. | Symboles de certification de chaudières en Allemagne..... | 34 |
| Figure 4. | Étiquette "P" du système de balisage d'équipements de combustion en Suède | 38 |

1 Introduction

1.1 Contexte

Actuellement au Québec, la réglementation de la combustion de la biomasse agricole est en fonction de la puissance de l'équipement utilisé. Les chaudières traditionnelles de moins de 3 MW à chambre de combustion unique ne peuvent pas être utilisées pour brûler de la biomasse agricole. En fait, ce sont les principes d'incinération qui s'applique lorsque la capacité de l'équipement est inférieure ou égale à 1 t/h – ce qui est généralement le cas pour un équipement de moins de 3 MW. Par exemple, l'appareil doit avoir au minimum une chambre de combustion additionnelle pour brûler les gaz issus de la première chambre de combustion. C'est le Règlement sur la qualité de l'atmosphère (RQA) qui régit les spécifications techniques et les normes d'émissions de tels équipements (Talluto, 2009).

Quant aux chaudières traditionnelles d'une puissance supérieure ou égale à 3 MW, elles peuvent servir à brûler des biocombustibles. Toutefois, il faut obtenir un certificat d'autorisation (Loi sur la qualité de l'environnement) pour cet équipement et respecter les normes d'émissions applicables aux incinérateurs du RQA (Talluto, 2009).

En Europe, deux types de normes s'appliquent par rapport à la combustion de biomasse. Le premier type est en fait composé de guides et de normes visant à déterminer les propriétés physico-chimiques des biomasses et les valeurs limites afin d'assurer la qualité (voir annexe 5). Les biomasses permis pour la combustion sont définis dans la norme EN 14961, à savoir :

- Des produits de l'agriculture et de la forêt;
- Des déchets végétaux de l'agriculture et de la forêt;
- Déchets végétaux de l'industrie agroalimentaire;
- Des déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds résultant d'un traitement à base de conservateurs du bois ou d'application d'un revêtement, y compris en particulier les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition;
- Des déchets végétaux fibreux issus de la production de pulpe vierge et de la production de papier de pulpe;
- Des déchets de liège.

Le deuxième type concerne les normes applicables aux équipements de combustion utilisant les biomasses réglementées. Ces normes sont divisées par équipement visé (par

exemple, la « EN 303-5 » encadrant les chaudières est la « EN 15270 » pour les brûleurs). Elles définissent les émissions limites et classifient la qualité de l'appareil.

Dans tous les pays membres du Comité de Standardisation Européen (CEN), il est permis de brûler de la biomasse agricole définie dans la norme « EN 14961 ». Au total, 30 pays sont adjoints au CEN, à savoir :

- | | | |
|--------------|---------------|-----------------------|
| – Allemagne; | – Grèce; | – Pays-Bas; |
| – Autriche; | – Hongrie; | – Pologne; |
| – Belgique; | – Irlande; | – Portugal; |
| – Bulgarie; | – Islande; | – République Tchèque; |
| – Chypre; | – Italie; | – Roumanie; |
| – Danemark; | – Lettonie; | – Royaume Unis; |
| – Espagne; | – Lituanie; | – Slovaquie; |
| – Estonie; | – Luxembourg; | – Slovénie; |
| – Finlande; | – Malta; | – Suède; |
| – France; | – Norvège; | – Suisse. |

Le gouvernement canadien intervient uniquement au niveau de la pollution atmosphérique selon les dispositions de l'article 166 de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement. La réglementation spécifique sur les normes d'émissions atmosphériques est de juridiction provinciale et il en revient à elles de légiférer dans ce domaine (Villeneuve, 2010). Cet ainsi que chaque province stipule leur émissions de gaz et matériel particulaire limites. Cependant, seulement l'Ontario et la Colombie Britannique (plus spécifiquement la Ville de Vancouver) ont une législation encadrant la combustion de biomasse agricole. Dans les provinces où il n'y a pas de réglementation en vigueur sur les limites d'émission, les accords pancanadiens sur la pollution atmosphérique sont applicables.

Aux États-Unis, les législations pour la combustion de biomasse ont une portée limitée pour la biomasse agricole. La législation concernant la combustion de biomasse font partie des standards dictant le niveau de pollution qu'une source stationnaire peut produire. Ils sont publiés dans le 40 CFR Part 60 et encadré par le « *New Source Performance Standard (NSPS)* » de la US-EPA dans la loi fédérale « *Clean Air Act (CAA)* ». Donc, compte-tenu que les régulations se présentent en fonction du type d'appareil, de la puissance et du combustible, cette approche crée des lacunes dans la législation. Par exemple, il n'existe pas de législation sur les chaudières à biomasse de taille petite et moyenne (CONEG Policy Research Center, Inc., 2009).

Les règlements d'état peuvent réglementer aussi les dispositifs non couverts au niveau fédéral ou mettre des normes d'émissions plus rigoureuses que les règlements fédéraux, mais les équipements résidentiels à biomasse autre que le bois demeurent exempts d'encadrement législatif (fédérales et d'état) malgré son utilisation sans cesse croissante. D'ailleurs plusieurs états présentent différentes réglementations spécifiques sur la combustion du bois (Oregon, Colorado, Washington, Alaska, Michigan, Nouvelle-Angleterre, Utah et Montana), mais dans le cas de la biomasse agricole, elle est exempte

de législations concrètes, ce qui par conséquent, n'interdit pas son utilisation pour la combustion aux États-Unis.

1.2 Problématique

Le Gouvernement du Québec souhaite favoriser et encadrer adéquatement l'émergence de projets locaux de combustion de la biomasse agricole. Actuellement, il existe un intérêt réel pour l'utilisation de certaines biomasses agricoles à titre de combustible dans les chaudières à biomasse. Cette avenue permet de produire de l'énergie utilisable à la ferme pour remplacer l'énergie fossile, réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et assurer une certaine autosuffisance en énergie renouvelable.

Cette filière émergente nécessite d'être bien documentée et encadrée afin de profiter pleinement des gains escomptés en ce qui a trait à la substitution des carburants fossiles et à la protection de la qualité de l'air.

L'aspect majeur qui limite le développement de cette filière est la méconnaissance des caractéristiques des émissions gazeuses et particulaires issues de la combustion de biomasses agricoles (résidus de culture, plante, fumier, etc.). Selon la réglementation en vigueur, la combustion de la biomasse agricole n'est pas permise. Il est donc incontournable de caractériser et quantifier les émissions gazeuses et particulaires provenant de la combustion de la biomasse agricole pour adapter la réglementation, s'il y a lieu. L'établissement d'un nouveau protocole spécifique standardisé d'échantillonnage et d'analyse des émissions issues de la combustion de la biomasse agricole permettrait de pallier cette problématique.

La volonté des intervenants du milieu agricole est de caractériser adéquatement les effluents gazeux et les cendres afin de les comparer à ceux de la combustion du bois dans des conditions similaires. Les résultats de cette comparaison permettraient, le cas échéant, de mettre en place un argumentaire visant à amender la réglementation actuelle de façon à permettre la combustion de la biomasse agricole au même titre que la combustion du bois.

1.3 Objectifs du projet

Le projet vise donc à faire l'inventaire et la caractérisation des composantes des effluents gazeux et particulaires issues de la combustion de la biomasse agricole et à établir un protocole de mesure de ces émissions à partir d'un processus rigoureux de révision de la littérature. Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Recenser les gaz et les particules produits par la combustion de la biomasse agricole à partir d'une méthode de recherche uniforme et rigoureuse;
- Réviser et résumer les méthodes standardisées reliées à la combustion de biomasses;
- Élaborer un protocole simplifié de mesure des gaz et particules issus de la combustion de biomasses d'une fournaise.

Afin de bien cerner les livrables, le projet a été divisé en trois phases distinctes, soit :

- Phase 1 : Inventaire et caractérisation des émissions gazeuses et particulaires issues de la combustion de la biomasse agricole et forestière;
- Phase 2 : Revue des normes et des méthodes standardisées de mesure;
- Phase 3 : Élaboration d'un protocole de mesure adapté à la combustion de la biomasse à l'échelle de la ferme.

Le document reflète cette division et est donc rédigé et présenté en trois volets distincts.

2 Inventaire et caractérisation des émissions de gaz et de particules issues de la combustion de la biomasse agricole et forestière

2.1 Stratégie et démarche de recherche

La démarche de recherche du présent projet a été divisée en trois phases. Dans la première phase, un processus de revue de littérature systématique a été suivi afin de recenser et caractériser les particules gazeuses et solides originaires de la combustion de la biomasse agricole et forestière. Ce type de revue est une procédure où l'information est, dans un premier temps identifiée et sélectionnée en accord avec une stratégie de recherche explicite impliquant des critères d'inclusion et de pertinence et, dans un second temps, évaluée conforme à des normes méthodologiques consistantes.

La méthodologie adoptée, inspirée de l'approche développée par le *National Institute for Health and Clinical Excellence du Royaume-Uni* (NICE, 2007), a déjà fait partie de la stratégie de recherche de plusieurs projets réalisés par l'IRDA. Ainsi, la démarche utilisée dans le présent projet est séparée en six étapes.

Étape 1 : Établir la question de recherche

La première étape consiste à établir une question de recherche concise et précise qui permettrait d'orienter la recherche vers un sujet fixe. La littérature sélectionnée lors de la recherche devrait conduire à l'obtention de l'information permettant d'y répondre. Dans le contexte de la présente revue, la question retenue est la suivante :

« Quels sont les gaz et particules produits par la combustion de la biomasse agricole et la biomasse forestière dans des équipements de combustion de moins de 3 MW? »

Étape 2 : Recherche bibliographique et évaluation des critères d'inclusion

La recherche de littérature s'amorce ensuite à partir des bases de données électroniques d'articles scientifiques. Afin qu'elle soit associée à la question de recherche la plus pertinente possible, certains paramètres doivent être préalablement fixés. Les plus importants sont :

- Les bases de recherche utilisées;
- Les mots-clés et expressions de recherche à employer;
- La langue des articles;
- Le type d'information retrouvée (résumés et/ou articles complets);
- La provenance des articles;
- L'année de publication des articles.

Les ressources et bases de recherche utilisées devaient être pertinentes pour traiter la question de recherche. La démarche a considéré différentes bases de données d'articles scientifiques. Une liste complète des bases retenues pour la revue systématique est présentée au tableau 1.

Dans le contexte de la présente revue systématique, les mots clés et les expressions employés devaient être en lien avec la question de recherche. Les versions anglaises, françaises et espagnoles des mots clés et expressions employés dans chacune des bases de données sont répertoriées au tableau 2. Enfin, tout article scientifique écrit dans l'une de ces trois langues, avec résumé et publié dans les quinze dernières années a été sélectionné lors de cette étape.

Ensuite, l'information disponible dans les résumés et les mots clés des articles scientifiques retenus avec les paramètres précédemment décrits a été passé en revue par un évaluateur pour juger si l'article devait demeurer inclus ou être rejeté de l'étude selon la liste des critères d'inclusion présentés au tableau 3. Ces critères ont pour but de définir les limites de la revue. À cette étape, aucun article complet n'a été évalué. Les études qui rencontraient au moins un des critères de la liste sont demeurées dans le processus d'évaluation alors que celles qui ne rencontraient aucun des critères d'inclusion ont été exclues.

Tableau 1. Bases de données retenues pour la revue systématique

| Bases de données | Site web |
|-----------------------|--|
| Science Direct | www.sciencedirect.com/ |
| Springer Link | www.springerlink.com/home/main.mpx |
| Cab Abstracts | www.ovid.com/site/catalog/DataBase/31.jsp |
| Engineering Village 2 | www.engineeringvillage.org/ |
| Agricola | http://agricola.nal.usda.gov/ |
| Agris | http://www.fao.org/agris/ |
| Google Scholar | http://scholar.google.ca/ |
| PubMed | http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/ |

Tableau 2. Mots clés et expressions utilisés lors de la revue systématique

| Anglais | Français | Espagnol |
|---|--|---|
| Agricultural biomass or Agro-biomass and combustion | Combustion de biomasses agricoles | Combustión de biomasa agrícola |
| Gas emission and biomass combustion | Émission de gaz et combustion de biomasses | Emisión de gas and combustión de biomasa |
| Ash emission and biomass combustion | Émission de cendre et combustion de biomasses | Emisión de ceniza and combustión de biomasa |
| Biomass combustion and emissions characterization | Combustion de biomasses et caractérisation des émissions | Combustión de biomasa and Caracterización de emisiones |
| Biomass and smoke | Biomasse et fumée | Biomasa and humo |
| Particulate matter emission and biomass combustion | Particules en suspension et combustion de biomasses | Partículas en suspensión and Combustión de biomasa |
| Combustion and biomass and soot | Combustion et biomasse et suies | Combustión and Biomasa and Hollín |
| Biomass and gas and pollutant and combustion | Biomasse et gaz et polluant et combustion | Biomasa and gas and contaminante |
| Combustion or incineration and poultry manure | Combustion ou incinération et fumier volaille | Combustión or incineración and Gallinaza |
| Combustion or incineration and solid swine manure | Combustion ou incinération et solide du lisier de porcs | Combustión or incineración and Porquinaza (porcinaza) sólida |
| Combustion or incineration and sludge | Combustion ou incinération et boue d'abattoir ou d'abattage | Combustión or incineración and desecho de matadero |
| | Combustion ou incinération et boues d'industries agro-alimentaires | |
| Combustion or incineration and emission and wood | Combustion ou incinération et bois ou résidus de bois | Combustión or incineración and Madera |
| Combustion and emission and energy crop | Combustion et émission et culture énergétique | Combustión and emisión and cultivo energético |
| Combustion or incineration and emission and willow tree | Combustion ou émission et incinération et saule | Combustión or incineración and Sauce (salix) |
| Combustion or incineration and emission Switchgrass (Panicum) | Combustion ou incinération et panic érigé | Combustión or incineración and Pasto varilla |
| Combustion or incineration and emission and by-product | Combustion ou incinération et sous-produit agricole | Combustión or incineración and Subproducto agrícola |
| Combustion or incineration and crop waste | Combustion ou incinération et résidus agricoles | Combustión or incineración and residuos agrícolas |
| Biomass furnace or heater or kiln and emission | Fournaise ou chaudières à biomasse et émission | Caldera or calentador or incinerador de biomasa and emisión |
| Biomass and combustion and gaz inventory or characterisation | Biomasse et combustion et gaz inventaire et caractérisation | Biomasa and combustión and gas inventario and caracterización |
| Gas emission biomass burning | | |

Tableau 3. Liste des critères d'inclusion pour la sélection des articles scientifiques lors de l'étape 2 de la revue systématique

| Numéro | Critère | Réponse (Oui/Non) |
|--------|---|-------------------|
| 11 | Étude de la combustion d'une biomasse agricole ou forestière | |
| 12 | Caractérisation des émissions gazeuses produites par la combustion de la biomasse | |
| 13 | Caractérisation des particules dégagées à partir de la combustion de la biomasse | |
| 14 | Utilisation d'un équipement de combustion de biomasses | |

Étape 3 : Évaluation de la pertinence des titres, des résumés et des mots-clés des articles scientifiques

Les titres, les résumés et les mots-clés des articles scientifiques sélectionnés lors de l'étape 2 sont ensuite repris et repassés en revue par un évaluateur afin d'évaluer leur pertinence à répondre à la question de recherche. À cette étape, aucun article complet n'a été évalué. L'information disponible a été révisée selon les critères de pertinence du tableau 4. Ainsi, seuls les articles dont tous les critères ont été qualifiés comme excellents ou acceptables sont conservés pour être analysés à l'étape suivante. Autrement dit, si l'article est qualifié comme inacceptable dans au moins un des critères, il est rejeté. Les duplicatas ont aussi été rejetés lors de cette étape.

Tableau 4. Liste des critères de pertinence pour la sélection des articles scientifiques lors de l'étape 3 de la revue systématique

| # | Critère | Description | Cote de pertinence et sa définition | | |
|----|--|--|--|---|---|
| | | | Excellent (++) | Acceptable (+) | Inacceptable (-) |
| P1 | Caractérisation du biocombustible | Le combustible doit être une biomasse agricole ou forestière | Le produit analysé est une biomasse ciblée dans le projet* | Le combustible est une biomasse agricole ou forestière différente aux produits ciblés | La biomasse est combinée avec un combustible autre qu'une biomasse agricole ou forestière |
| P2 | Caractérisation des émissions de gaz et des particules | L'étude doit cibler l'analyse de gaz et de particules dégagés à partir de la combustion de la biomasse | Des gaz et des particules sont analysés | Des gaz ou des particules sont analysés | Les gaz et les particules ne sont pas analysés |
| P3 | Disponibilité de la biomasse | La biomasse doit être un produit disponible au Québec | La biomasse est un produit facilement disponible au Québec | La biomasse est un produit assez disponible au Québec | La biomasse n'est pas disponible au Québec |
| P4 | Puissance de l'équipement de combustion | La puissance de l'équipement de combustion doit être inférieure à 3 MW | Équipement de combustion industrielle de moins de 3 MW | Équipement de combustion de laboratoire (<3 MW) | Équipement de plus de 3 MW, performances non précisées ou il s'agit d'une étude de combustion à l'air libre |

* Biomasses ciblées par le projet : fumier de bovins, fumier de volailles, le solide de lisier de porcs, boues d'abattoirs et les cultures énergétiques telles que le saule et le panic érigé

Étape 4 : Évaluation du contenu des articles scientifiques à partir des critères d'inclusion et de pertinence

À cette étape, les versions complètes des articles retenus lors de l'étape 3 ont été récupérées et évaluées par au moins deux évaluateurs en utilisant les mêmes critères d'inclusion (tableau 3) établis lors de l'étape 2 et les mêmes critères de pertinence (tableau 4) établis lors de l'étape 3. Seuls les écrits répondant à tous les critères de pertinence ont été conservés pour l'étape suivante.

Étape 5 : Évaluation de la rigueur méthodologique des articles scientifiques

Le matériel retenu lors de l'étape 4 a ensuite été évalué selon une liste de contrôle systématique (tableau 5) afin d'assurer sa validité. Afin de réduire le biais qui porte les jugements subjectifs à cette étape, au moins deux réviseurs devaient indépendamment réviser tout le matériel et remplir l'évaluation de la liste de contrôle pour chaque publication.

Puisque les critères d'évaluation pouvaient différer selon le type d'étude, une liste de contrôle a été développée pour fournir une approche cohérente et similaire à l'évaluation du NICE (2007). L'évaluation globale de chaque étude a été effectuée en utilisant une cote (++, + ou -), basée sur la façon dont les biais potentiels ont été réduits au minimum (tableau 5; Section 2). Ceci a nécessité l'intervention d'une équipe de cinq critiques et une attribution aléatoire des articles. En outre, l'évaluateur devait s'assurer qu'il y avait une relation de cause à effet entre les traitements et les données obtenues.

Tableau 5. Évaluation de la validité des articles scientifiques retenus pour l'étape 5 de la revue systématique

| Numéro | Paramètres | Évaluation du paramètre | |
|--|--|-------------------------|----------------|
| SECTION 1 : VALIDITÉ SCIENTIFIQUE | | | |
| 5.1.1 | L'étude répond à une question claire et précise | Bien traité | Non traité* |
| | | Adéquatement traité | Non rapporté** |
| | | Insuffisamment traité | Non applicable |
| 5.1.2 | Une description de la méthodologie est incluse | Bien traité | Non traité* |
| | | Adéquatement traité | Non rapporté** |
| | | Insuffisamment traité | Non applicable |
| 5.1.3 | La revue de littérature est suffisamment rigoureuse | Bien traité | Non traité* |
| | | Adéquatement traité | Non rapporté** |
| | | Insuffisamment traité | Non applicable |
| 5.1.4 | Il existe assez de similarités entre l'étude évaluée et l'ensemble d'études sélectionnées permettant de les comparer légitimement | Bien traité | Non traité* |
| | | Adéquatement traité | Non rapporté** |
| | | Insuffisamment traité | Non applicable |
| 5.1.5 | La seule différence entre les unités expérimentales est le traitement évalué | Bien traité | Non traité* |
| | | Adéquatement traité | Non rapporté** |
| | | Insuffisamment traité | Non applicable |
| 5.1.6 | L'ensemble des mesures sont faites en utilisant une méthode valide et fiable | Bien traité | Non traité* |
| | | Adéquatement traité | Non rapporté** |
| | | Insuffisamment traité | Non applicable |
| 5.1.7 | La qualité de l'étude est évaluée et prise en considération | Bien traité | Non traité* |
| | | Adéquatement traité | Non rapporté** |
| | | Insuffisamment traité | Non applicable |
| SECTION 2 : ÉVALUATION GÉNÉRALE | | | |
| 5.2.1 | Comment l'étude s'assure de réduire les biais? Cote ++, + ou - | | |
| 5.2.2 | Si la cote est + ou -, comment le biais a pu affecter les résultats? (positivement ou négativement) | | |
| 5.2.3 | En considérant les aspects technologiques, votre évaluation de la méthodologie et l'exactitude des statistiques utilisées, êtes-vous assuré que le traitement est la cause des résultats? (élevé, moyen, faible) | | |
| 5.2.4 | Est-ce que les résultats de l'étude sont directement en lien avec ses objectifs? (élevé, moyen, faible) | | |

* Non traité : mentionné, mais avec des détails insuffisants pour une évaluation

** Non rapporté : non mentionné, ou indique que cet aspect a été ignoré

Étape 6 : Résumé des éléments pertinents des articles scientifiques

L'information contenue dans les articles scientifiques choisis à l'étape 5 est finalement extraite, analysée et résumée afin de contribuer à développer la réponse à la question de recherche.

2.2 Résultats

2.2.1 Description générale du processus effectué lors de la revue de littérature systématique

En préambule, la recherche effectuée conformément aux paramètres définis à la première étape du processus de revue systématique a fourni environ 7 000 articles scientifiques. Les titres, les résumés et les mots-clés de chaque article furent ensuite passés en revue selon les critères d'inclusion de l'étape 2, permettant ainsi la sélection d'environ 250 articles. Par la suite, l'évaluation des articles selon les critères de l'étape 3 a permis de qualifier 42 articles à être analysés par une équipe d'évaluateurs.

Lors de l'étape 4, l'équipe d'évaluateurs, constituée de 5 personnes, a analysé le contenu complet des 42 écrits en conformité avec les paramètres des étapes 2 et 3 permettant de retrancher 13 articles. Les résultats de la qualification des évaluateurs sont présentés à l'annexe 1.

Par la suite, la qualité des 29 articles restants a été évaluée à l'aide de la liste de contrôle systématique de l'étape 5 permettant de qualifier 21 articles comme sources potentielles d'information. La qualification des évaluateurs sur la qualité des articles et les articles retenus sont présentés aux annexes 2 et 3 respectivement.

2.2.2 Analyse de la littérature retenue et réponse à la question de recherche

L'analyse des résultats de recherche sur la caractérisation des gaz et des particules issus de la combustion de biomasses a permis de répondre à la question de cette recension systématique des écrits « Quels sont les gaz et particules produits par la combustion de la biomasse agricole et la biomasse forestière dans des équipements de combustion de moins de 3MW? ». De façon générale, les composants issus du procédé de combustion sont classés en deux catégories selon leur procédure d'origine. La première catégorie comprend les composants formés à partir d'une combustion complète et la deuxième, ceux formés à partir de la combustion incomplète du combustible.

Les émissions causées par une combustion incomplète sont principalement le résultat d'un mélange insuffisant entre l'air et le combustible dans la chambre de combustion, un manque d'oxygène, des températures trop faibles et de courts temps de séjour (EEA, 2006).

Les produits issus d'une combustion incomplète sont le monoxyde de carbone (CO), le matériel particulaire comme la suie, les résidus carbonacés ou les hydrocarbures lourds condensés (goudron), l'ozone (O₃), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),

les composés organiques volatils non méthaniques (COVnM), le méthane (CH₄), l'ammoniac (NH₃), les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzo-furanes (PCDF).

Les produits issus d'une combustion complète sont le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (NO_x), principalement le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂), les oxydes de soufre (SO_x), comme le monoxyde de soufre (SO) et le dioxyde de soufre (SO₂), l'acide chlorhydrique (HCl), les métaux lourds et le matériel particulaire issu de la combustion complète (P₁₀ et P_{2.5}).

La composition gazeuse et particulaire des émissions dépend de multiples facteurs, dont le type et les caractéristiques du combustible, l'efficacité et les conditions de la combustion, la technologie ou l'équipement utilisé et les mesures de réduction des émissions. De plus, Van Loo et Koppejan (2008) affirment que les niveaux d'émission mesurés sont très influencés par la méthodologie utilisée lors des mesures.

La biomasse la plus analysée dans les différentes études est le bois sous différentes formes tels les bûches, les granules, les copeaux ou les sciures. Aussi, les biomasses comme la paille, la tourbe et le fumier de volailles sont aussi analysées dans la littérature mais en moindre importance. Le tableau à l'annexe 4 présente la caractérisation et les émissions types des composants issus de la combustion de la biomasse relevées dans la littérature.

Dans un premier temps, le tableau révèle que le bois à titre de combustible est la biomasse la plus analysée. En effet, il y a beaucoup plus d'information sur les émissions issues de la combustion du bois que celles issues de la combustion de la biomasse agricole. Toutefois, dû à la recherche incessante ces dernières années de nouvelles sources d'énergie renouvelable, les biomasses agricoles sont de plus en plus considérées à titre de combustible.

Dans un second temps, le tableau illustre l'hétérogénéité dans la présentation de résultats de la littérature. La masse du composant mesuré est présentée en relation à l'énergie dégagée, à la quantité de biomasse utilisée, à l'apport du volume d'air dans l'équipement ou simplement en unités de concentration (ppm) ou pourcentage. Ainsi, l'analyse et la comparaison de résultats est difficile. Également le tableau démontre que les équipements de combustion utilisés sont aussi très variés et regroupent les fournaies, les chaudières, les chambres de combustion, etc.

En dernier lieu, le tableau est destiné aussi à être une source de référence et de comparaison de données pour les futures études sur la combustion de la biomasse.

Dans la plupart des études, une analyse chimique et physique de la biomasse faisait partie de la méthodologie de recherche. En fait, plusieurs études présentaient l'existence d'une relation entre quelques composants constituants du combustible et les émissions produites.

2.2.3 Caractérisation des émissions issues d'une combustion complète

Dioxyde de carbone (CO₂)

Le CO₂, un des gaz à effet de serre, est celui le plus dégagé par la combustion de biomasses dû à l'important contenu de carbone présent dans ces combustibles (Van Loo et Koppejan, 2008). Bien que la combustion de biomasses émette une grande quantité de CO₂, elle peut être vue comme une source d'énergie neutre en émissions de CO₂. Cela s'expliquerait par le fait que le CO₂ dégagé lors de la combustion de la biomasse, équivaut à la quantité prise durant leur croissance. (Lavric et al., 2004). Néanmoins, cette affirmation prévaut seulement lorsque l'énergie est utilisée de façon durable, ce qui n'est pas le cas de plusieurs pays en développement (Demirbas, 2005).

Dans les études retenues lors de la revue de littérature systématique, les niveaux de CO₂ ont été mesurés grâce à des analyseurs infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) (Johansson et al., 2004; Hedman et al., 2006; Tissari et al., 2008).

Oxydes d'azote (NO_x)

Les NO_x génèrent des pluies acides, occasionnent des dommages à la végétation, contribuent à la formation de smog et causent de la corrosion et des dommages matériels (Van Loo et Koppejan, 2008).

Les émissions des NO_x issues de la combustion de biomasses sont principalement le résultat d'une oxydation complète de l'azote contenu dans le combustible. Mais, bien que les combustibles azotés produisent des concentrations de NO_x significativement plus hautes que les combustibles à faible teneur d'azote, cette relation n'est pas évidente dans la littérature scientifique. Des études ont montré qu'il pouvait exister des relations avec la concentration d'azote directement proportionnelles (Johansson et al., 2004), logarithmiques (Van Loo et Koppejan, 2008), dépendantes (Leckner et Karlsson, 1993) et que les corrélations étaient parfois fortes, parfois faibles, et même inexistantes (Spliethof et al., 2000).

Par ailleurs, des effets directement proportionnels ont été identifiés entre les émissions des NO_x et la température de combustion (Niessen, 2008; Spliethof et al., 2000). D'après Lavric et al. (2004), le bois produit des émissions de NO_x plus faibles que les combustibles fossiles, ce qui favorise son utilisation, mais seulement si la température est contrôlée pour réduire l'oxydation de l'azote.

Concernant les méthodes de mesure, Johansson et al. (2004) ont utilisé la technique de chimiluminescence pour déterminer et comparer les émissions de NO_x de nouvelles et d'anciennes chaudières. Tissari et al. (2008) ont utilisé un analyseur infrarouge FTIR.

Oxyde nitreux (N₂O)

Le N₂O est un gaz produit par l'oxydation de l'azote contenu dans le combustible (Abelha et al., 2003; Van Loo et Koppejan, 2008). Le N₂O est un des gaz à effet de serre le plus puissant mais les niveaux d'émission sont beaucoup plus petits que ceux du CO₂.

Néanmoins, le dégagement de ce gaz lors de la combustion a une contribution importante aux effets du réchauffement global.

Comme le CO, le CO₂ et les NO_x, le N₂O est mesuré avec un analyseur FTIR (Hedman et al., 2006).

Oxydes de soufre (SO_x)

Les oxydes de soufre proviennent de l'oxydation du soufre (S) contenu dans les combustibles. Les gaz formés sont principalement le SO₂ (95 %) et le SO₃ (5 %). Cependant, tout le soufre n'est pas converti en SO_x, une quantité non négligeable se retrouve dans les cendres, sous forme de sulfates (IEPF, 2005).

Lorsque le SO₂ se dissout dans la vapeur d'eau atmosphérique, il produit des acides et interagit avec des particules et des gaz présents dans l'air pour former des sulfates et d'autres composés nocifs pour les humains et l'environnement (EC, 2006a). D'après Lavric et al. (2004), dans le cadre de mesures des niveaux d'émission, la teneur de sulfure dans le bois est faible et ceci constituerait, selon les auteurs, un gros avantage par rapport aux combustibles fossiles.

Tout comme les NO_x, les SO_x interviennent dans la génération de pluies acides, occasionnant des dommages à la végétation, contribuant à la formation de smog et générant de la corrosion (Van Loo et Koppejan, 2008).

Acide chlorhydrique (HCl)

Une fraction du chlore contenu dans le combustible peut se retrouver sous forme de HCl. Le HCl est un produit de la combustion de toute biomasse contenant du chlore (Cl). Il cause des impacts négatifs aussi bien à l'environnement qu'à la santé humaine.

Selon l'IEPF (2005), le contenu de chlore dans le bois est très bas contribuant faiblement à la combustion. Toutefois, lorsque des produits ayant des taux importants de chlore sont incinérés, par exemple la paille ou l'herbe, les émissions de HCl deviennent significatives. (Van Loo et Koppejan, 2008).

Métaux lourds

La plupart des métaux lourds reliés à la combustion (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) sont émis comme de composants adjoints et/ou adsorbés aux particules et cendres volantes (EEA, 2006). Les métaux lourds, étant quelques-uns toxiques et quelques autres carcinogènes, ils sont présents dans tous les types de biomasses, à tout le moins à l'état de trace, et les émissions sont fortement fonction de leur présence (et concentration) dans le combustible. Au cours des travaux de Ross et al. (2002), les résultats d'analyse de la concentration des métaux dans les briquettes de sciure, les cendres et les cendres volantes résultant de la combustion ont démontré que les éléments présents en plus grandes concentrations étaient le Cu, Fe, Mn, Pb et Zn.

Les éléments les moins volatils tendent à se condenser à la surface des particules dans les gaz d'échappement. Le taux de volatilisation des métaux lourds dépend des caractéristiques de l'équipement de combustion et des caractéristiques chimiques de la biomasse (EEA, 2006). La présence d'alkali métaux (Na, K, etc.) dans les biomasses est très problématique car ils forment des composants volatils qui ont une température de fusion très basse. Les cendres de la biomasse tendent à contenir une haute teneur en alkali métaux qui cause l'agglomération et l'encrassement, en plus d'apporter des problèmes lors de la gazéification et de la combustion (Tissari et al., 2008).

Matériel particulaire

Le matériel particulaire est divisé en deux groupes selon le type de combustion soit : 1) les particules provenant d'une combustion complète; et 2) celles provenant d'une combustion incomplète (décrites à la section 2.2.4) (Van Loo et Koppejan, 2008).

Les particules produites à partir d'une combustion complète sont des fragments en suspension dans l'air sous forme solide ou liquide. Selon les composés et les processus à l'origine de leur formation, ils sont classés parmi les particules primaires ou secondaires. Les premières sont émises à la source même des émissions sous forme de cendres (des particules comportant un diamètre supérieur à 1 μm). Les secondes appelées aérosols, sont le résultat d'une série de réactions chimiques et physiques où interviennent différents gaz précurseurs, tels que les oxydes de soufre, les oxydes d'azote et l'ammoniac qui réagissent entre eux pour former des particules de sulfate, de nitrate et d'ammoniac. Les aérosols ont un diamètre inférieur à 1 μm .

Le diamètre aérodynamique est le paramètre le plus important pour caractériser les particules. Il détermine en grande partie la portée des dommages que celles-ci causent à la santé et à l'environnement. Environnement Canada (2006b) a catégorisé les particules en trois groupes :

- Les particules totales (PT) : particules atmosphériques d'un diamètre maximal d'environ 100 μm ;
- Les P_{10} : particules atmosphériques d'un diamètre inférieur à 10 μm ;
- Les $P_{2,5}$: particules atmosphériques d'un diamètre inférieur à 2,5 μm , appelées aussi « particules fines ».

Les particules dont le diamètre est inférieur à 1,0 micromètre et à 0,1 micromètre, sont respectivement appelées « particules très fines » et « particules ultrafines ».

Diverses maladies chez l'humain et des effets néfastes sur la végétation sont liées à l'émission de particules. Elles sont aussi l'une des causes de la brume sèche régionale et de la détérioration de la visibilité (EC, 2006b). Elles peuvent causer de sérieux problèmes de formation de dépôts, augmenter le risque de corrosion des équipements et causer des problèmes d'émission et d'effets indirects sur la concentration des métaux lourds (Van Loo et Koppejan, 2008).

Puisque la combustion de biomasses est une source importante d'émission de particules et que le matériel particulaire est vu comme l'un des paramètres le plus important dans la pollution de l'air, la propagation de la bioénergie peut être entravée. Néanmoins, des technologies de réduction des émissions de particules ont été développées (Nussbaumer et al., 2008) afin de surmonter cet inconvénient.

2.2.4 Caractérisation des émissions issues d'une combustion incomplète

Monoxyde de carbone (CO)

Le CO est le principal sous-produit dans la conversion du carbone du combustible en CO₂. Il est oxydé en CO₂ sous des conditions spécifiques de température et d'oxygène lors d'une combustion complète (EEA, 2006). Le CO est alors considéré comme un bon indicateur de la qualité de la combustion et par conséquent, il est généralement mesuré lors des tests d'efficacité des équipements de combustion. Le taux de conversion du CO en CO₂ augmente directement avec la température. Toutefois, pour une température donnée, il existe un taux d'apport d'air (air d'excès) optimum qui minimise les rejets de CO. L'excès d'air est apporté au processus de combustion pour que chaque molécule de combustible soit entourée de suffisamment d'air. Selon les installations de combustion, les valeurs optimales d'excès d'air se situent entre 1,3 et 1,8 (IEPF, 2005).

Le niveau d'émission de CO est influencé par les conditions de la combustion (IEPF, 2005). Des émissions peuvent se produire quand la température de combustion est trop basse ou quand l'apport d'oxygène est insuffisant, ou encore lorsque le temps de séjour est trop court. Les équipements de combustion de faible capacité ont des niveaux d'émission beaucoup plus élevés que les équipements industriels. Tout comme le CO₂, l'émission de CO est plus faible lorsque les conditions de combustion de l'équipement sont contrôlées automatiquement.

Le CO génère des effets négatifs sur la santé humaine puisqu'il réduit l'absorption d'oxygène, spécialement chez les personnes asthmatiques, et dans des cas extrêmes, il peut produire la suffocation (Van Loo et Koppejan, 2008).

Méthane (CH₄)

Dans le cadre de la combustion de biomasses, le CH₄ est un intermédiaire important dans la conversion du carbone et de l'hydrogène du combustible en CO₂ et en H₂O respectivement (Van Loo et Koppejan, 2008). Le méthane est généralement mentionné séparément des autres hydrocarbures puisqu'il est un gaz à effet de serre.

Tout comme le N₂O, les émissions du CH₄ sont très faibles en comparaison de celles du CO₂. Bien que les émissions de CO₂ provenant de la combustion de biomasses sont presque exclues des inventaires des gaz à effet de serre, le CH₄ et le N₂O sont généralement inclus (Tarnawski, 2004).

Johansson et al. (2004) ont déterminé les niveaux d'émission de 33 composés organiques volatils (COV) issus de la combustion de pastilles de bois densifiées et de rondins de bois

dans sept types de chaudières. Les résultats ont démontré que le méthane représente de 20 à 60 % de la fraction massique totale des COV mesurés. D'après ces mêmes auteurs, l'émission dominante du CH₄ est probablement due à l'oxydation relativement lente en comparaison des autres hydrocarbures.

Composés organiques volatils non-méthanique (COVnM)

Ces composés organiques volatils (COVnM) sont des gaz et des vapeurs autres que le CH₄ contenant du carbone. Le CO₂, le CO et les chlorofluorocarbures (CFC) sont aussi exclus du groupe de COV. Les COVnM sont tous d'intermédiaires dans l'oxydation des combustibles. Ils peuvent adsorber, condenser et former des particules (EEA, 2006).

De nombreux COVnM individuels sont connus pour leurs effets toxiques et carcinogènes (démontrés ou soupçonnés) pour les êtres humains. Certains d'entre eux, comme le benzène (C₆H₆) et le dichlorométhane (CH₂Cl₂), ont été évalués et déclarés toxiques en vertu de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999). Les COVnM sont aussi des polluants précurseurs de la formation secondaire des particules fines (P_{2,5}). En plus, les COVnM les plus réactifs interviennent dans le processus de production d'ozone troposphérique (Environnement Canada, 2006c).

Les COV sont regroupés en deux grandes familles. La première comporte les COV non-polaires, du type benzène (C₆H₆), toluène (C₇H₈) ou autres. Ils proviennent généralement de sources mobiles comme l'essence. La deuxième famille regroupe les COV polaires. Ceux-ci sont des composés qui renferment un groupe carbonyle, comme l'acroléine (C₃H₄O) ou la formaldéhyde (CH₂O) et peuvent être plus représentatifs des émissions liées au chauffage au bois (Carter et al., 2004).

Dans l'étude de Johansson et al. (2004), où l'émission de 33 COV issus de la combustion de pastilles de bois densifiées et de rondins de bois dans sept types de chaudières a été déterminée, les COVnM les plus représentatifs sont l'éthane (C₂H₆), l'éthylène (C₂H₄), le propène (C₃H₆), l'acétylène (C₂H₂) et le benzène (C₆H₆).

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP sont le produit d'une combustion incomplète d'un combustible. Ils sont usuellement mentionnés séparément des autres hydrocarbures à cause de leurs effets carcinogènes. Les niveaux d'émission des HAP dépendent des conditions de la combustion, comme la température, le temps de séjour et la disponibilité de l'oxygène (EEA, 2006). Les HAP sont formés à des températures oscillant entre 700 et 900 °C. Des températures plus élevées permettent de les décomposer thermiquement (Olsson et Kjallstrand, 2006).

Les HAP peuvent être émis en phase gazeuse ou particulaire. Dans l'analyse de 16 HAP issus de plusieurs chaudières à bois, Bignal et al. (2008) ont trouvé que la plupart des HAP (89 %) se présentaient sous forme gazeuse, principalement du naphthalène (C₁₀H₈) et du phénanthrène (C₁₄H₁₀) pour respectivement 22 et 18 %. Johansson et al. (2004) ont

démontré que 70 % des HAP analysés étaient du naphthalène ($C_{10}H_8$), du phénanthrène ($C_{14}H_{10}$), du fluoranthène ($C_{16}H_{12}$), du pyrène ($C_{16}H_{10}$) et de l'acénaphylène ($C_{12}H_8$).

Les émissions de benzo(a)pyrène (BaP) ont également fait l'objet de recherches plus spécifiques (Andersson et al., 1998; Bignal et al., 2008, Carter et al., 2004) puisqu'il serait considéré comme le HAP le plus carcinogène (Kocbach et al., 2006).

Matériel particulaire

Les particules formées à partir d'une combustion incomplète peuvent se trouver sous forme de suie, de résidus carbonacés ou d'hydrocarbures lourds condensés (goudron). La suie est formée principalement de carbone et elle est le résultat d'un manque local d'oxygène ou de l'extinction locale de la flamme. Les résidus carbonacés peuvent être entraînés dans le flux de gaz à cause de leur très basse densité spécifique. Les hydrocarbures lourds condensés sont, dans certains cas, les principaux contributeurs des niveaux d'émission de particules totales dans les équipements de combustion à biomasse de faible puissance (Van Loo et Koppejan, 2008).

Polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzo-furanes (PCDF)

Les PCDD et PCDF sont un groupe de composants hautement toxiques. Dix-sept (17) de ces isomères sont présentés comme extrêmement toxiques, mutagènes et liés à la suppression du système immunitaire humain (Lavric et al., 2004).

Ils sont présents sous forme de traces dans l'atmosphère où leur présence est reliée à la combustion. Dû à leurs propriétés de persistance et de bioaccumulation, ces molécules ont tendance à se déplacer sur de très longues distances et à se déposer loin des lieux d'émission. Pour cette raison, ils appartiennent au groupe des polluants organiques persistants (POP).

Vanloo et Koppejan (2008) affirment que dû aux divers facteurs influençant la formation des PCDD et PCDF, de larges variations de concentration peuvent apparaître, parfois dans une même installation de combustion de biomasses.

Ammoniac (NH_3)

De petites quantités de NH_3 résultant d'un processus de combustion incomplète peuvent être émises dans tous les combustibles solides ayant de l'azote. Cela arrive dans des cas où les températures de combustion sont très basses (EEA, 2006). Le NH_3 se combine alors dans l'atmosphère avec les sulfates et les nitrates pour former des particules fines ($P_{2,5}$) secondaires. Ces dernières ont des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement (EC, 2006d).

Indépendamment du type de biomasses, l'azote volatil de la biomasse forme préférentiellement du NH_3 et sa concentration dépend de la perte des matières volatiles et de la température de combustion (Werther et Ogada, 1999).

Ozone troposphérique (O₃)

L'ozone troposphérique est un polluant « secondaire » parce qu'il se crée lorsque deux polluants primaires réagissent au soleil et à l'air stagnant. Ces deux polluants primaires sont les NO_x et les COV.

Les particules et l'O₃ peuvent engendrer des maladies graves comme la bronchite chronique, l'asthme et même la mort prématurée. Parmi les effets environnementaux associés à ce polluant, mentionnons, le dommage aux cultures et une vulnérabilité accrue aux maladies chez certaines essences d'arbres (EC, 2006e).

2.3 Discussion

Il est très pertinent de distinguer le type de biomasse utilisée lors de la combustion car les gaz dégagés dépendent des éléments constituant du combustible et des réactions suite à la combustion. En effet, les grandes variations de la teneur d'azote, du chlore, du soufre et de cendres dans les diverses biomasses aboutissent à des variations considérables dans les niveaux d'émission. C'est ainsi que la composition gazeuse et particulaire des effluents gazeux est différente lors de la combustion d'une biomasse forestière et d'une biomasse agricole. Par exemple, les biomasses agricoles d'origine animale ont une teneur d'azote plus haute que les biomasses d'origine végétal ou lignocellulosiques, ce qui facilite la production d'oxydes d'azote (NO_x) et de l'oxyde nitreux (N₂O). De même, les céréales et la paille ont une teneur en chlore plus grande que les biomasses forestières. Donc, les émissions dégagées par la combustion des céréales contiennent notamment plus d'acide chlorhydrique (HCl) et par conséquent, sont plus acides que celles émises par le bois.

Il est à noter aussi que les gaz et composés dégagés dépendent des paramètres de combustion. Également, les biomasses sont des matériaux ayant une constitution très hétérogène, ce qui rend plus difficile l'obtention d'une combustion totalement complète. Donc, il y aura toujours un dégagement de gaz dommageable issu d'une combustion incomplète. Cependant un apport d'air adéquat dans la zone de combustion permet de diminuer la production de CO, HAP et dioxines. D'ailleurs, la postcombustion, consistant à brûler le CO présent dans les fumées émises, est une technique efficace dans la réduction des émissions de ce gaz.

3 Revue des normes et des méthodes standardisées de mesure

3.1 Introduction et méthodologie

Cette phase du projet comprend : 1) la recherche, l'analyse et l'inventaire des différentes normes liées à la combustion de biomasses et; 2) l'inventaire des méthodes standardisées liées à la mesure des particules solides et gazeuses issues de sources stationnaires de combustion de biomasses.

Une approche de revue traditionnelle a été appliquée pour l'aspect relié aux normes puisque les documents normatifs sont considérés comme des documents dont la validité technique et scientifique ne peut être remise en cause.

Afin de bien répondre au mandat, les normes sont présentées d'abord par catégorie (section 3.2), puis par pays considéré avant-gardiste du secteur de la combustion de biomasses (section 3.3). Les pays ayant des méthodologies standardisées de mesure, des projets de recherche et développement et des incitatifs gouvernementaux en ce qui a trait à la combustion de biomasses ont été considérés comme des avant-gardistes de cette filière.

A prime abord, la structure normative et les méthodes standards de mesure des émissions liées à la combustion sont complexes. D'abord, même si la réglementation portant sur le bois comme élément de combustion est bien déterminée, largement documentée et normalisée, il n'existe pas de législation officiellement en place en matière de combustion des biomasses agricoles. Il en est de même pour les méthodes de vérification de leurs émissions.

Cependant, dû aux pressions de toutes sortes et à la volonté de développer la filière des biomasses agricoles comme source d'énergie durable et économique, différents pays ont récemment entrepris différentes démarches afin d'assouvir l'actuelle demande de procédures de certification des biomasses et des méthodes d'évaluation d'équipements de combustion.

3.2 Révision des normes liées à la combustion de biomasses et les méthodes de mesure des émissions

Les normes et méthodes liées à la combustion de biomasses ont été divisées en trois catégories selon leur domaine d'application (tableau 6). Dans la première catégorie se trouvent les normes visant à classifier et à déterminer les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques de la biomasse. Actuellement, cette catégorie est la seule à avoir des normes incluant la biomasse agricole dans leurs applications.

À partir des analyses chimiques de la biomasse, il est possible de prédéterminer les composants qui seront dégagés lors de la combustion et par conséquent, de définir le protocole de mesure. Par exemple, un produit avec une haute teneur en azote impliquera la mesure des émissions de NO_x; un produit avec une haute teneur en chlore impliquera la

mesure de l'émission de HCl. Une liste des normes européennes et américaines de cette catégorie est présentée à l'annexe 5.

Tableau 6. Comparaison de la structure normative du secteur de la combustion de biomasses d'Europe et des États-Unis

| Catégorie | Domaine d'application | Europe | | États-Unis | | |
|-----------|--|---|--|-------------------------------------|--|--------------------------|
| 1 | Classification et analyse physique, chimique et mécanique de la biomasse | Les normes sont répertoriées à l'annexe 5 | | | | |
| 2 | Efficacité des appareils de combustion | Description des requis | Fournaise CEN 13240 CEN 12815 | Chaudière CEN 303-5 CEN-12809 | Fournaise Sub-partie AAA ¹ | Chaudière - |
| | | Description des conditions du test | CEN-13229 CEN-14785 CEN-15250 CEN-15543 | | Méthode 28 | Méthode 28 OWHH (projet) |
| 3 | Mesure standard des émissions | | | Méthode 5H ou 5G | Méthode 5H ou 5G | |

Adapté de Nussbaumer et al. (2008)

1 : Code de réglementations fédérales (CFR) Titre 40 – Protection de l'environnement, Partie 60 – *Standard of performance for new stationary sources*, Sub-partie AAA – *Standards of performance for new residential wood heaters* de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (USEPA)

La deuxième catégorie porte sur les normes pour l'essai et la détermination du rendement des appareils de combustion. Ces normes énoncent le mode opératoire de mesure des émissions des différents appareils de combustion et décrivent les procédures pour déterminer la puissance thermique et le rendement. Il n'existe pas encore de normes, ni de méthodes officielles pour l'évaluation des émissions des biomasses agricoles autres que le bois dans les appareils de combustion de petite dimension.

Les normes européennes incluent généralement les qualités requises de l'appareil et les méthodes de mesure des émissions. Les composants mesurés sont les particules solides, le CO et quelques COV. En comparaison des États-Unis, le code CFR 40, *Part 60 – Subpart AAA* intitulé « *Standards of performance for new residential wood heaters* » de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (USEPA), résume toutes les conditions qu'une fournaise doit satisfaire mais, contrairement aux normes de la communauté européenne, il fait appel aux méthodes à suivre pour accorder la certification sans les décrire. La méthode 28 est celle qui détermine le protocole d'opération de l'équipement lors du test pour obtenir la certification.

En Europe, la norme EN 303-5 intitulée « chaudières spéciales pour combustibles solides, à chargement manuel ou automatique, puissance utile inférieure ou égale à 300 kW – Définitions, exigences, essais et marquage » est la norme la plus utilisée parmi les pays de la Communauté Européenne (France, Espagne, Danemark, Finlande, Autriche et Allemagne) pour évaluer les appareils de combustion.

Des efforts croissants ont récemment été faits dans plusieurs pays européens pour l'utilisation des biomasses agricoles (cultures céréalières et leurs résidus, cultures

énergétiques comme le miscanthus, etc.) dans des fournaies de petite dimension. Cependant, l'évaluation des équipements et des technologies est difficile et incertaine à cause du fait que les procédures d'essai ne sont pas communément acceptées (Eder et al., 2008).

La troisième catégorie comporte les techniques et les modes opératoires standardisés pour l'analyse et la quantification des composants spécifiques issus d'un effluent. Ces techniques sont décrites dans les normes de certification d'équipements en Europe ou référencées aux États-Unis. Les méthodes 5H et 5G sont les méthodes officielles aux États-Unis pour la détermination de matériel particulaire. Les méthodes pour déterminer d'autres composants sont stipulées dans les index du CFR Titre 40 de l'USEPA (plus de 300 méthodes), mais ils ne font pas partie du processus de certification.

En général, ces méthodes de mesure sont constituées de trois parties, soit l'échantillonnage, le conditionnement et l'analyse (InfoMil, 2006).

Échantillonnage

L'échantillonnage des composants provenant de la combustion est généralement effectué à partir du soutirage d'un échantillon représentatif du flux vers l'extérieur de la cheminée grâce à une sonde et à un système de conditionnement. Cette approche appelée « analyse extractive » ou échantillonnage est généralement utilisée pour la détermination de la composition chimique des émissions.

De manière générale, afin de bien déterminer l'émission d'un gaz et obtenir des échantillons représentatifs, le prélèvement doit s'effectuer de façon isocinétique. Cela implique que, les conditions normales de vitesse et de direction des particules dans les gaz de la conduite restent invariables à l'entrée de la sonde d'échantillonnage, ceci afin d'éviter une discrimination de masse causée par l'inertie des particules.

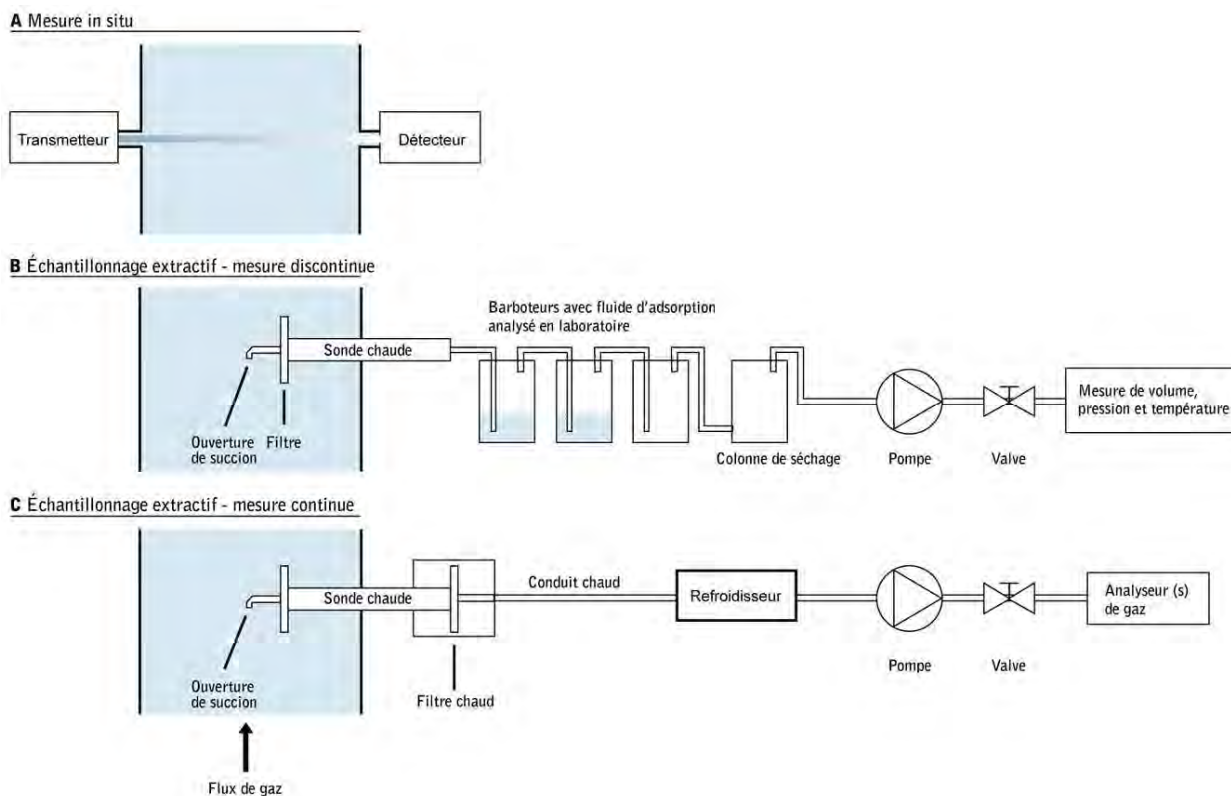
Conditionnement

Puisque la mesure directe des gaz dans la cheminée est souvent impossible, une partie du fluide doit être extrait et mesuré à l'extérieur. Néanmoins, afin d'éviter une interférence dans les mesures et la perte de particules, les échantillons doivent être conditionnés par rapport aux particules et à la teneur de vapeur d'eau (InfoMil, 2006).

Le conditionnement par rapport aux particules consiste à éviter l'accumulation de particules dans les systèmes d'échantillonnage car ceci pourrait entraîner (1) le blocage des composants ciblés (dans le cas des mesures extractives), (2) la contamination des cellules de mesure (équipements de mesure optique), ou (3) la perturbation des lectures des analyseurs comme le chromatographe de gaz. Pour cela, on effectue une étape de filtration lors de l'échantillonnage.

Le filtre peut se placer après la sonde d'échantillonnage à l'extérieur de la cheminée ou immédiatement après l'orifice de succion de la sonde à l'intérieur de la cheminée (fig. 1B et 1C respectivement). De plus, le filtre doit être chauffé avant l'échantillonnage et la

température doit se maintenir au-dessus du point de rosée tout au long du prélèvement (InfoMil, 2006).



Adaptée de InfoMil (2006)

Figure 1. Méthodes d'échantillonnage et analyse

Le conditionnement par rapport à la vapeur d'eau s'effectue afin d'éviter la condensation de celle-ci due au refroidissement des gaz de combustion suite à leur extraction. Il existe deux approches qui préviennent la condensation de la vapeur d'eau.

La première approche consiste à analyser l'échantillon à une température au-dessus du point de rosée du gaz. Pour cela, l'échantillon de gaz est chauffé et les conduits de transport et les équipements sont isolés. Un exemple des équipements fréquemment utilisés dans le milieu scientifique employant cette technique, est le détecteur à ionisation de flamme (FID) (Lee et al., 2005; Zhang et al., 2000; Rudolph et al., 1995).

Dans la deuxième approche, l'analyse s'effectue à la température ambiante. Afin d'éviter la condensation, la teneur de vapeur d'eau dans l'échantillon est donc réduite jusqu'à ce que le point de rosée du gaz soit plus inférieur à la température ambiante. La réduction de la concentration des vapeurs d'eau ou du séchage se fait au moyen de différentes méthodes, à savoir des agents sécheurs (comme l'acide sulfurique, le gel de silice ou le tamis moléculaire), le refroidissement, le séchage par perméabilité ou la dilution.

Analyse

À cette étape, la concentration des gaz ciblés ainsi que les différents paramètres comme la température, la pression, la teneur en oxygène, la teneur d'humidité et le débit des gaz d'évacuation sont déterminés. L'analyse peut être effectuée directement dans la cheminée « analyse in situ » ou à partir d'un échantillon de gaz prélevé de la cheminée « analyse extractive ». Les principes de mesure des émissions les plus utilisés sont la spectrométrie infrarouge, la spectrométrie ultraviolet, la gravimétrie, la détection à ionisation de flamme (FID) et le paramagnétisme.

Dans l'approche in situ, le gaz ciblé est mesuré sans qu'il soit retiré de la cheminée. Les méthodes optiques et l'infrarouge sont deux exemples de cette approche. L'avantage de cette technique est que les instruments sont relativement simples. L'inconvénient est que les mesures ne sont prises qu'à un seul point, ou dans le cas de l'irradiation (fig. 1A), à une seule ligne, rendant donc difficile la mesure d'un échantillon de façon représentative (InfoMil, 2006).

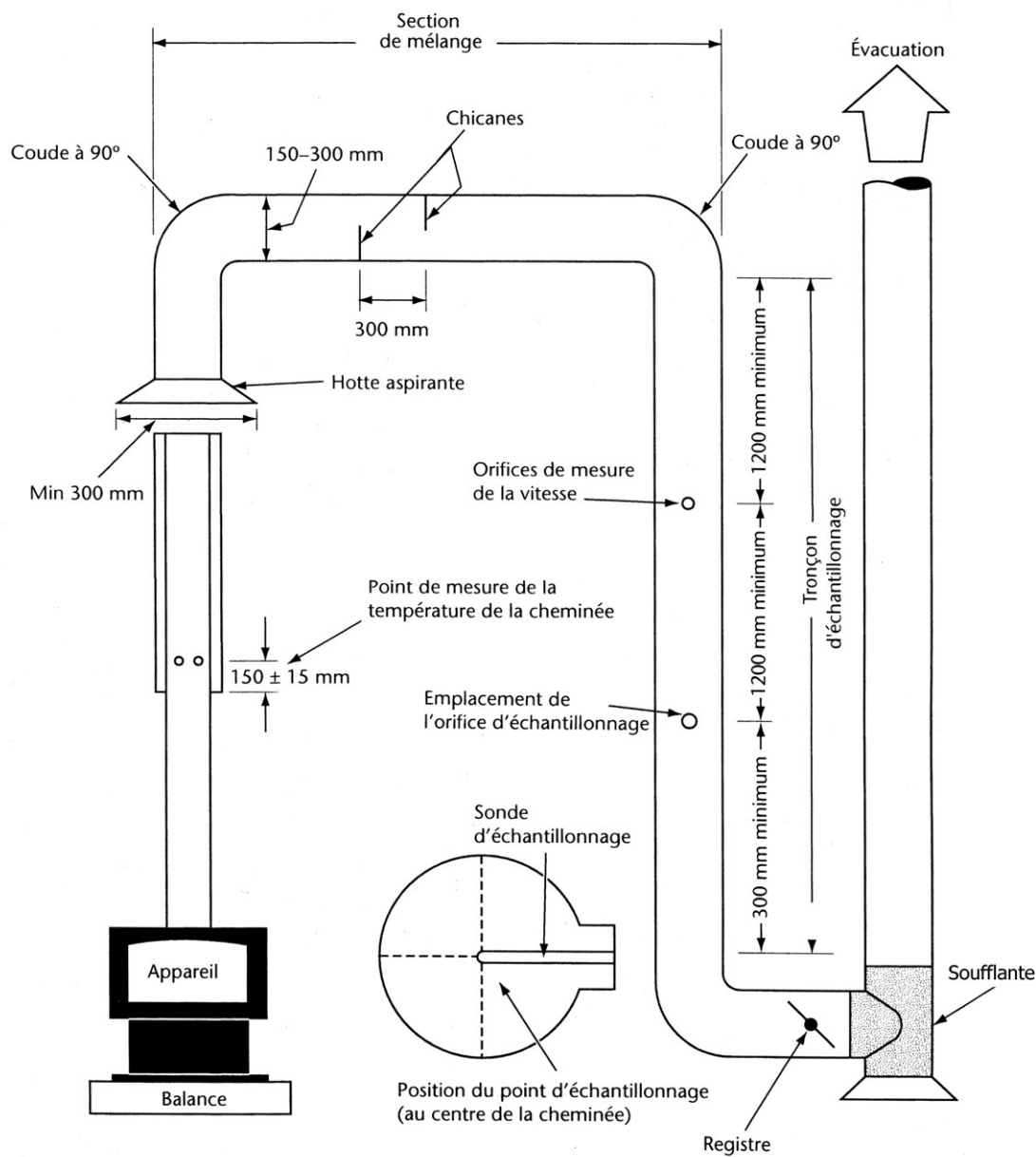
L'analyse extractive des particules peut s'effectuer de manière périodique ou continue :

L'analyse périodique (ou de prélèvement instantané) comporte le prélèvement d'un échantillon de gaz durant une certaine période de temps dans un liquide ou un matériel solide adsorbant qui sera analysé ultérieurement en laboratoire (fig. 1B). Puisque l'analyse périodique apporte des résultats d'une situation particulière, il est important que l'opération de l'équipement de combustion soit représentative lors de l'échantillonnage. En mesurant le volume des gaz prélevés et la masse des composants, il est possible d'obtenir la concentration et l'émission du contaminant de l'effluent gazeux.

L'analyse continue de gaz consiste à extraire sans interruption un échantillon du flux gazeux et de mesurer continuellement sa composition au moyen d'un équipement installé de façon permanente (fig. 1C). Ce type d'analyseur est normalement installé par les propriétaires des équipements de combustion (InfoMil, 2006). Lorsque l'équipement utilise un instrument spécifique pour l'analyse en continue des composants, la méthode est appelée « moniteur d'émission continu (CEM) ».

La méthode 5H effectue la collection des particules grâce à un filtre chauffé, un filtre de secours et une série de séparateurs à impact immergés sous l'eau. Par contre, la méthode 5G est basée sur l'approche du tunnel de dilution. Il s'agit d'un appareillage constitué d'une hotte aspirante, un tunnel de dilution, une soufflante et un registre (fig. 2) qui permettent l'échantillonnage de particules dans un filtre à partir d'une colonne de gaz dilué et refroidi.

La norme EN 303.5 prescrit l'utilisation d'un analyseur FID pour mesurer le carbone organique. L'échantillonnage se réalise de façon extractive directement dans la cheminée et l'analyse s'effectue de façon continue. Les équipements de combustion peuvent ainsi être ainsi classés en fonction du rendement et des émissions de polluants (CO, hydrocarbures imbrûlés et poussières) (Wehbe, 2002).



Source : Norme CAN/CSA-B415.1, 2000

Figure 2. Système de conditionnement des échantillons par tunnel de dilution

3.3 Comparaison de normes et guides de combustion de biomasses adoptées dans différents pays

3.3.1 Allemagne

En Allemagne, il existe un processus de demande de permis encadré par la *Federal Immission Control Regulation No 4 (4. BImSchV)* afin d'autoriser la combustion d'une matière. La classification des biomasses est standardisée et est encadrée par la norme DIN CEN/TS 14961:2005-05: « *Solid biofuels – Fuel specifications and classes* ».

De plus, l'utilisation de chaudières est restreinte à celles qui portent le symbole (Ü) licencié par l'autorité d'inspection TÜV (fig. 3). Le symbole de la communauté européenne (CE) est également décerné aux produits qui respectent les directives de la CE lesquelles sont issues de lois nationales.



Figure 3. Symboles de certification de chaudières en Allemagne

La DIN 18891 et la DIN 18895 sont les normes allemandes désignées pour le test de poêles et de foyers respectivement (Gras, et al., 2002). Les chaudières doivent respecter plusieurs directives et normes, mais la plus importante est la DIN EN 303-5. Celle-ci est en fait la norme européenne adoptée par le pays sans aucune modification. La combustion de la paille et autres combustibles semblables peut être évaluée en appliquant la norme DIN 4702-4:1990-03 « *Boiler for wood, straw and similar fuels; definitions, requirements, testing* » laquelle suit les méthodes des normes DIN EN 304 et DIN EN 303-5.

3.3.2 Australie et Nouvelle-Zélande

La norme AS/NZS 4013 et les normes associées (AS4012 et AS4014) spécifient les procédures standards pour la mesure des émissions de la plupart des appareils de combustion au bois en Australie et en Nouvelle-Zélande. Ces normes utilisent la technique de conditionnement par tunnel de dilution (Gras, et al., 2002). Des échantillons de gaz sont extraits du tunnel à trois différentes vitesses de flux (haute, moyenne et faible), puis ils sont filtrés et les gaz collectés sont finalement analysés.

3.3.3 Autriche

Les émissions limites de composants issus de chaudières en Autriche sont stipulées dans la norme Art. 15a B-VG (< 400 kW).

Actuellement, en Autriche, le test des équipements de combustion de biomasses est limité au bois naturel en raison des prescriptions des états fédéraux. Les standardisations sous-jacentes sont ÖNORM M7132 (bûche de bois), ÖNORM M7133 (copeau) and ÖNORM M7135 (bois comprimé). Cependant, le développement d'une norme officielle pour la combustion d'autres biomasses est en cours. Celle-ci sera basée sur la norme européenne EN 303-5 (Lasselsberger et al., 2008).

Pour l'instant, l'Autriche a une méthode de certification standard pour la classification des biomasses agricoles VORNORM ÖNORM M 7139 (Grains – Requis et spécifications), VORNORM ÖNORM C 4000 (granules et briquettes de bois de campêche), VORNORM ÖNORM C 4001 (copeau de bois de campêche (en progrès)).

Les chaudières à bois sont testées et évaluées en suivant la norme EN 303-5 (Grass, et al., 2002) à cause de l'inexistence d'une norme nationale. Cependant, des règlements non officiels pour mesurer l'efficacité et les émissions des équipements sont aussi utilisés (Becher et al., 2008).

En Autriche, tant la Fédération autrichienne que les états fédéraux soutiennent la production et l'utilisation de carburants de biomasses. Le but est de produire 40 % de l'énergie avec des sources renouvelables d'ici 2020, doublant ainsi sa valeur actuelle.

3.3.4 Canada

Dans le contexte canadien, la norme CAN/CSA-B415.1-00 intitulée « essais et rendement des appareils de chauffage à combustibles solides » et approuvée en 2003 par le Conseil canadien des normes, énonce le mode opératoire de mesure des émissions de chaudières et d'autres équipements à combustibles solides. La norme comprend les biomasses forestières telles que le bois de corde, les copeaux, la sciure, les mottes de tourbe, les granules de bois et de papier densifiés et la biomasse agricole telle que le maïs-grain. La norme présente la méthode de mesure de particules laquelle suit le principe du tunnel de dilution. Le protocole se base sur la méthode 5G de l'USEPA. Lors des essais, l'O₂, le CO et le CO₂ sont aussi mesurés.

La norme CAN/CSA-B366.1-FM91 vise les appareils à combustibles solides pour le chauffage central où le terme « combustibles solides » englobe, mais sans s'y limiter, le charbon et les biocarburants tels que le bois de corde, les copeaux, la sciure, les grains de bois ou de papier, et le maïs.

Les directives canadiennes ont basé plusieurs de leurs méthodes de mesure des émissions et d'analyse des composants sur les méthodes américaines de l'USEPA.

Au Québec, le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec a publié un guide non officiel intitulé « Cahier 4 : Échantillonnage des émissions atmosphériques en provenance de sources fixes ». Ce dernier expose les éléments essentiels lors de la réalisation d'une campagne d'échantillonnage et répertorie les méthodes standards de mesure de composants spécifiques.

Le Québec et la Colombie-Britannique sont actuellement les seules provinces qui exigent que les nouveaux équipements de combustion commercialisés soient certifiés par l'Association canadienne de normalisation (ACNOR) ou l'USEPA.

3.3.5 Danemark

Au Danemark, les procédures de mesure des émissions issues de la combustion de biocombustible sont régulées par les normes suivantes : VDI 2066 Blatt2, EN 13284-1, VDI 2066 Blatt 5, NS 3058, EN 303-5, MEL 02, ISO 9096 et ISO 10155. Toutes ces normes ont, comme technique de mesure commune, l'utilisation de filtres pour l'échantillonnage, ce qui implique une méthode de type extractive isocinétique et une analyse de masse par gravimétrie (Johansson, 2006).

L'échantillonnage des particules dans les normes VDI 2066 Blatt 2 et EN 303-5 est réalisé in situ au moyen de cartouches filtrantes ou de filtres à dés. Dans les normes EN 13284, MEL 02 et ISO 9096, l'échantillonnage s'effectue de façon extractive ou in situ avec des filtres chauffés et des sondes. Dans la norme VDI 2066 Blatt 5, les particules sont prélevées in situ au moyen d'un échantillonneur à chocs en cascade. En dernier lieu, la norme NS 3058 utilise la technique du tunnel de dilution et un échantillonnage avec des filtres plats de façon extractive.

3.3.6 États-Unis

Comme il a été expliqué à la section 3.2, le code 40 CFR 60, sub-partie AAA de l'USEPA, met en vigueur la régularité pour la certification et l'audit des performances de chaudières à bois aux États-Unis. Le code recommande de suivre la méthode 5H ou la méthode 5G pour la mesure de matériel particulaire.

Dans la méthode 5H, la collecte des particules s'effectue sur un filtre chauffé, un filtre de secours et une série de séparateurs à impact immergés dans l'eau. La méthode 5G est basée sur l'approche du tunnel de dilution.

L'organisme de normalisation ASTM dispose de la norme ASTM E2515-07, laquelle décrit la procédure standard pour déterminer les émissions de matériel particulaire collecté dans un tunnel de dilution.

L'USEPA a débuté un partenariat avec des fabricants pour produire et vendre des chaudières plus propres et plus efficaces, lesquelles doivent ainsi respecter un certain niveau de performance. Au début de 2007, dix fabricants avaient signé l'accord avec l'USEPA pour construire des modèles plus propres disponibles aux consommateurs. Ces équipements seraient environ 70% moins polluants que les modèles existants.

Le DOER (*Department of Energy Resources*) de Massachusetts, le NESCAUM (*The Clean Air Association of the Northeast States*), le NYSERDA (*New York State Energy and Research Development Authority*) et autres organisations planifient d'entreprendre des efforts communs pour déterminer si un facteur de correction peut être déterminé afin de comparer les résultats des tests des équipements de combustion utilisant les protocoles américains et européens (EPA Method 28 et EN 303-5 respectivement).

3.3.7 Finlande

Au début des années 80, la Finlande a développé la norme SFS-4800 afin de tester de manière standard les chaudières à combustibles solides (Oravainen, 2000). Cette norme définit l'équipement d'essai, les différents combustibles et la procédure opérationnelle. Récemment, la Finlande a aussi adopté la norme européenne EN 303-5. Mais ces normes n'agissent pas comme des systèmes de certification et actuellement, il n'existe pas de procédures de certification des équipements de combustion ni des biomasses en Finlande (Becher, et al., 2008). Cependant, dans les pays nordiques, il est possible d'obtenir une étiquette de qualité Swan sur les équipements qui ne dépassent pas des limites d'émission très strictes. Toutefois, elle n'est valide que pour le bois et la paille. Les critères évalués sont l'efficacité de combustion, les niveaux d'émission (carbone gazeux organique, CO et matériel particulaire), la conception du système, le matériel, l'emballage, l'installation, les instructions d'opération, etc. (Olson, 2006).

Normalement, la biomasse utilisée en Finlande est du bois en bûche, en copeaux et en granules, de la tourbe en granules. Dans quelques zones on utilise des grains comme l'orge, l'avoine, le seigle et le blé. La baldingère faux-roseau (*Phalaris arundinacea*) est une herbe qui a été cultivée en Finlande pendant plusieurs années et elle est mélangée à d'autres biomasses pour la production de granules ou comme un combustible supplémentaire.

3.3.8 France

Les chaudières sont testées à l'aide de la norme DIN 4702. Même si la norme EN 303.5 est également applicable en France, elle n'a pas un caractère obligatoire; aucun décret ni directive n'impose au constructeur de vérifier les performances de son appareil dans un laboratoire d'essai reconnu par un organisme notifié (AFNOR) (Wehbe, 2002).

3.3.9 Norvège

En Norvège, les normes liées au test des équipements de chauffage et à la mesure des émissions sont NS 3058-1, NS 3058-2, NS 3058-3, NS 3058-4 et NS 3059. La procédure opérationnelle pour la détermination des particules dans ces normes est basée sur la technique du tunnel de dilution (Nussbaumer et al., 2008a; Gras et al., 2002). Les particules sont échantillonnées dans des filtres plats à l'extérieur de la cheminée (Johansson et al., 2006). D'ailleurs, plusieurs aspects de la procédure de ces normes ressemblent aux méthodes de l'USEPA (Boman et al., 2005).

3.3.10 Suède

Le concept « combustible autorisé » n'est pas utilisé en Suède. La normalisation en place classe les biocombustibles selon leur origine : combustibles forestiers, tourbe, combustibles agricoles, combustibles dérivés de déchets, etc. (Becher et al., 2008). Voici la liste de ces normes :

SIS-CEN/TS 14961:2005, *Fasta biobränslen - Specifikationer och klassificering* (Biocombustibles solides – Spécifications du combustible et classes);

SIS-CEN/TS 15359:2007, *Fasta återvunna bränslen - Specifikationer och klassificering* (Biocombustibles solides recyclés – Spécifications du combustible et classes);

SS 187123, *Biobränslen och torv - Bränslebriketter - Klassificering* (Biocombustibles et tourbe – Agglomérés – Classes);

SS 187120 *Biobränslen och torv - Bränslepellets* (Biocombustibles et tourbe – Granules).

Les méthodes utilisées pour la détermination des émissions en Suède sont régularisées par la norme SP-1419 pour les chaudières à bois, et la norme SP-1425 pour les poêles à bois. La qualité de la combustion est mesurée, dans les deux cas, en fonction de la teneur des composés organiques gazeux (Grass, et al., 2002; Oravainen, 2000). Aucune information sur les techniques adoptées par ces normes n'a été trouvée. Cependant, Alakangas et al. (2005), affirment que la régulation européenne a graduellement remplacé les normes suédoises.

L'étiquette de qualité « CE » (fig. 3) pour les chaudières et fournaies est volontaire en Suède. Il existe aussi deux autres systèmes de balisage, soit la marque « P » (fig. 4) du *SP Technical Research Institute* et « l'eco-étiquette Swan » présentée par le *Nordic Council of Ministers*. Le système de certification avec l'étiquette « P » comprend des critères d'émission, d'efficacité, de sécurité et d'opération des équipements.



Figure 4. Étiquette "P" du système de balisage d'équipements de combustion en Suède

En Suède, 70 % de la consommation d'énergie est fournie par des sources renouvelables. La plupart est constituée par le bois. Les biomasses autres que le bois constituent seulement 1 %. Becher et al. (2008) affirment que ce pourcentage est dû à un manque de support du nouveau gouvernement (depuis 2006) qui ne porte pas assez d'intérêt aux

biocombustibles. Pour cette raison, il n'y a pas non plus de programmes de support planifiés pour le futur.

3.3.11 Organisation internationale de normalisation (ISO)

Afin de définir une méthode standard internationale pour la mesure des émissions de gaz des équipements de chauffage, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a réalisé le projet de norme ISO 13336. Cette méthode, basée sur l'approche du tunnel de dilution, n'a toutefois pas été ratifiée lors de la validation internationale (Grass, et al., 2002).

3.4 Discussion sur la revue des normes et des méthodes standardisées de mesure

La normalisation concernant l'analyse standard de la combustion de biomasses a été divisée en trois catégories selon le domaine d'application, soit (1) Classification et analyse physique, chimique et mécanique de la biomasse, (2) efficacité des appareils de combustion, et (3) mesure standard des émissions. Dans le cas de la biomasse agricole, les instituts officiels de normalisation ont, jusqu'à maintenant, créé des standards appartenant à la première catégorie. La biomasse forestière est la plus documentée dans les législations internationales. Néanmoins, dû au développement accéléré des technologies de combustion de biomasses et à la nécessité d'utiliser des méthodes d'évaluation et certification communes, de nouvelles normes de la deuxième catégorie sont en cours.

Il existe plusieurs techniques et méthodes pour la détermination des émissions provenant d'une source de combustion stationnaire. D'une façon générale, le code 40 CFR 60 et la norme EN-303.5 sont les plus référenciés par la législation des pays américains et européens respectivement.

La méthode du tunnel de dilution est une des méthodes d'échantillonnage et de conditionnement des gaz de combustion adoptées par les normes de mesure standard au niveau national et international. Cette technique comporte des inconvénients comme le grand volume d'espace requis pour l'installation de l'appareillage et les longues périodes d'échantillonnage.

Il existe aussi des méthodologies standardisées reconnues pour réaliser l'échantillonnage des gaz directement de la cheminée. Ces analyses s'effectuent de façon périodique et avec des échantillonnages extractifs. Dans ce cas, le conditionnement des échantillons est toujours nécessaire. En général, le travail d'échantillonnage est plus pratique avec l'utilisation de cette technique.

4 Protocole simplifié de mesure des émissions atmosphériques issues de la combustion de biomasses

4.1 Introduction et méthodologie

Dans cette troisième phase, les informations de la phase 1 et 2 ont été combinées afin de d'établir un protocole permettant de mesurer les émissions issues d'équipements de combustion de la biomasse agricole.

Afin de permettre une large acceptation du protocole proposé et de répondre aux exigences du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), le protocole a été basé sur le guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales – Cahier 4, du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (MDDEP, 2009). Le mode opératoire d'essai proposé fait référence à la Méthode 5H du CFR, Title 40 de la USEPA (USEPA, 2000).

Puisque les caractéristiques chimiques des biomasses agricoles sont différentes des biomasses forestières, le protocole de mesure des émissions a été adapté en conséquence.

Selon la revue de littérature de l'étape 2 (voir également annexe 4), les composants les plus importants pour déterminer la qualité de la combustion d'une biomasse sont le matériel particulaire, le CO, le CO₂ et intrinsèquement l'O₂. L'analyse de ces composants fait partie du présent protocole.

Selon le MDDEP (2009), le déroulement d'une campagne d'échantillonnage doit être divisé en trois étapes principales, soit le pré-échantillonnage, l'échantillonnage et le post-échantillonnage.

4.2 Pré-échantillonnage

Il est recommandé de se renseigner sur l'équipement nécessaire pour procéder à l'échantillonnage, les caractéristiques des gaz potentiellement émis, le matériel nécessaire et les services connexes requis (plate-forme sécuritaire, abri chauffé, porte d'échantillonnage, électricité, moyens de communication, espace de travail pour la manipulation des échantillons, etc.) avant même que les essais ne soient réalisés et que le devis d'échantillonnage ne soit préparé.

Avant d'entreprendre une campagne d'échantillonnage, il faut avoir des renseignements les plus complets possible dans le but d'assurer la réussite des essais et de la caractérisation. Il est donc primordial de bien déterminer les conditions de fonctionnement de chacune des sources et d'obtenir des données préliminaires comme celles décrites ci-dessous :

Introduction

Une brève description du but des essais et du contexte de réalisation.

Sources et capacités de production

Pour chacun des points d'émission étudiés, l'appellation du procédé et le principe de fonctionnement doivent être connus. Il importe également d'obtenir, dans la mesure du possible, les capacités de production habituelles afin de vérifier si les émissions de la source sont échantillonnées ou mesurées dans les mêmes conditions.

Systèmes d'épuration

Lorsque l'effluent gazeux du point d'émission étudié est épuré, l'appellation de l'unité d'épuration et le principe de fonctionnement doivent être obtenus dans la mesure du possible.

Services disponibles au site d'échantillonnage

L'équipe responsable des échantillonnages doit dresser la liste de l'ensemble des services requis pour les mesures (électricité, abri, local adéquat pour la manipulation des échantillons, etc.).

Points d'échantillonnage sélectionnés

Au début des travaux de caractérisation, l'équipe d'échantillonnage doit déterminer les lieux de prélèvement où le flux gazeux de chaque point d'émission peut être échantillonné. Il faut alors décrire les points d'échantillonnage, tracer un croquis de la source et préciser la nature des turbulences en amont et en aval des lieux en question.

La hauteur du point d'émission à l'atmosphère, le diamètre intérieur du conduit au site d'échantillonnage et les longueurs de conduite sans turbulence avant et après les points de prélèvement doivent être mesurés ou obtenus de plans conformes. Ainsi, la détermination du nombre de points de mesure et de leur position peut être effectuée selon la méthode SPE 1/RM/8-méthode A d'Environnement Canada.

Caractéristiques préliminaires du flux gazeux

Avant d'échantillonner un contaminant ou un groupe de contaminants provenant d'un point d'émission, il faut connaître, avant le premier essai, la température, la vitesse, le poids moléculaire et l'humidité du gaz émis par ceux-ci. Ces données préliminaires servent à calculer les paramètres pour l'ajustement de la pompe durant le prélèvement et le diamètre de la buse qui permet le prélèvement de façon isocinétique comme l'exige la méthode choisie. De plus, les problèmes associés à l'écoulement des gaz (stabilité, débit cyclonique ou inversé) seront décelés durant les essais préliminaires. Les méthodes utilisées pour effectuer ces mesures sont SPE 1/RM/8-méthode B « Détermination de la vitesse et du débit volumétrique des gaz de cheminée » et SPE 1/RM/8-méthode D « Détermination de la teneur en humidité ».

Substances à échantillonner et méthodes à utiliser

Le devis doit clairement spécifier les substances ou les paramètres à échantillonner et décrire les méthodes à utiliser pour mesurer les contaminants recherchés. Une analyse chimique de la biomasse est indispensable afin de définir les composants et les méthodes à utiliser (voir section 4.3.2 – Principes méthodologiques).

Activités d'assurance et de contrôle de la qualité

Le programme d'assurance et de contrôle de la qualité adopté pour valider les résultats et les moyens de contrôle mis en place dans le but de respecter les éléments critiques des mesures effectuées tout au long de la campagne doit être décrit.

Calendrier d'échantillonnage et membres de l'équipe

Le devis doit renfermer un calendrier de réalisation de même qu'une liste des noms de tous les membres de l'équipe d'échantillonnage avec une description de leur formation et de leur expérience. Il faut aussi préciser le rôle de chacun des membres en vue de la réalisation de la campagne d'échantillonnage.

Autres renseignements

Tout autre renseignement essentiel peut être ajouté au devis d'échantillonnage de façon à préciser la problématique d'un site donné.

Par ailleurs, en matière de sécurité, les membres de l'équipe sont responsables de leur propre sécurité. Ils sont tenus de porter les équipements de sécurité nécessaires et de respecter les règles de sécurité en vigueur sur chaque site d'échantillonnage. Le Cahier 1 du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales (MDDEP, 2008) renferme tous les renseignements essentiels sur les aspects santé et sécurité à respecter lors d'une campagne d'échantillonnage.

4.3 Échantillonnage

4.3.1 Contrôle et assurance de la qualité de l'échantillonnage

Le programme d'échantillonnage doit être en mesure d'assurer et de contrôler la qualité en rapport avec les activités d'échantillonnage. Le MDDEP (2009) signale les principaux éléments de contrôle de la qualité à considérer lors d'une campagne d'échantillonnage :

- Préparation des dispositifs d'échantillonnage selon les exigences des méthodes (incluant l'ajout de milieux absorbants, etc.);
- Numérotation et étiquetage adéquat des échantillons;
- Tests de fuite avant, pendant (si une modification est apportée au dispositif d'échantillonnage) et après les prélèvements;

- Stricte observation des protocoles d'échantillonnage (nombre de points de mesure, lecture des températures, lecture des pressions, etc.);
- Vérification périodique du facteur de correction du compteur de gaz de type sec selon le cas, à l'aide de l'orifice critique;
- Prélèvement d'un échantillon témoin (blanc de terrain) pour chaque paramètre déterminé.

4.3.2 Principes méthodologiques

Les principes méthodologiques à utiliser dépendent des composants à mesurer. Deux sortes de composants sont donc définies pour cette finalité : les composants à mesure obligatoire et les composants à mesure optionnelle.

Les composants à mesure obligatoire sont ceux qui déterminent la qualité de la combustion, soit le CO, le CO₂, l'O₂ et le matériel particulaire. En plus, puisque les biomasses agricoles sont, dans la plupart des cas, constituées d'éléments différents à ceux du bois, les émissions sont aussi différentes. L'azote est l'élément principal dans la constitution des biomasses agricoles et un générateur de particules polluantes lors de la combustion. C'est ainsi que la détermination des émissions de NO_x (NO et NO₂) est de caractère obligatoire dans le protocole.

L'analyse optionnelle de certains composants est reliée à la variabilité de la concentration dans la composition des biomasses agricoles. C'est donc le cas du chlore (Cl) et du soufre (S). Ces deux éléments produisent de l'acide chlorhydrique (HCl) et du dioxyde de soufre (SO₂) respectivement. La mesure des émissions de ces deux gaz peut-être déterminée par l'analyse chimique de la biomasse selon la norme CEN/TS 15289 : 2006 « Biocombustibles solides – Détermination du contenu total de soufre et chlore ». Dans le cas de concentrations importantes de Cl et/ou de S dans la biomasse, les émissions de HCl et/ou de SO₂ doivent être déterminées.

Le tableau 7 présente les méthodes à suivre pour la détermination des émissions de chaque paramètre selon le type méthode « de prélèvement instantané » et « en continu ou instrumentale ». Certaines substances peuvent être échantillonnées simultanément dans le même dispositif d'échantillonnage. Pour connaître les substances qui peuvent être échantillonnées dans la même ligne, il faut tenir compte de la nature chimique de la substance et appuyer sa décision sur la documentation scientifique disponible. Le tableau 7 présente aussi les combinaisons des paramètres possibles.

L'échantillonnage de gaz et de particules doit respecter la méthode 5 codifiée dans le CFR 40, *part* 60 de l'USEPA.

Tableau 7. Méthodes de détermination de composants issus d'un équipement combustion

| Méthodes de prélèvement instantané | | |
|---|---|---|
| Paramètre | Méthodes | Spécifications et exigences supplémentaires |
| Particules, CO ₂ , CO et O ₂ | USEPA, CFR 40, <i>Part</i> 60, méthode 5H | Possible utilisation de la méthode "Environnement Canada, SPE 1/RM/8 - méthode E" pour des cas particuliers |
| SO ₂ | Environnement Canada, EPS 1/AP/74-3 | Durée minimale de prélèvement : 20 minutes Volume minimal de prélèvement : 20 litres |
| Oxydes d'azote (NO _x) | Environnement Canada, EPS 1/AP/77-3 | Durée de prélèvement : 1 minute |
| Chlorure d'hydrogène (HCl) | Environnement Canada, SPE 1/RM/1 | Durée minimale de prélèvement : 20 minutes Volume minimal de prélèvement : 20 litres |
| Particules et SO ₂ | Environnement Canada, SPE 1/RM/8 modifiée selon la méthode Environnement Canada, EPS 1/AP/74-3 | |
| Particules et HCl | Environnement Canada, SPE 1/RM/8 modifiée selon la méthode Environnement Canada, SPE 1/RM/1 | |
| Méthodes en continu ou instrumentales | | |
| Dioxyde de soufre (SO ₂) | USEPA, CFR 40, part 60, méthode 6C | Durée minimale de prélèvement : 60 minutes. Utilisation de 3 gaz d'étalonnage à des concentrations représentatives |
| Oxydes d'azote (NO _x) | USEPA, CFR 40, part 60, méthode 7 E (ou 6C avec adaptation) | Durée minimale de prélèvement : 60 minutes. Utilisation de 3 gaz d'étalonnage à des concentrations représentatives |
| Oxygène (O ₂) | USEPA, CFR 40, part 60, méthode 3A (ou 6C avec adaptation) | Durée minimale de prélèvement : 60 minutes. Utilisation de 3 gaz d'étalonnage à des concentrations représentatives |
| Dioxyde de carbone (CO ₂) | USEPA, CFR 40, part 60, méthodes 3A (ou 6C avec adaptation) | Durée minimale de prélèvement : 60 minutes. Utilisation de 3 gaz d'étalonnage à des concentrations représentatives |
| Monoxyde de carbone (CO) | USEPA, CFR 40, part 60, méthode 10 | Durée minimale de prélèvement : 60 minutes. Utilisation de 3 gaz d'étalonnage à des concentrations représentatives |
| Autres déterminations instrumentales non spécifiées | | Méthodes validées et approuvées par un organisme reconnu |

4.4 Post-échantillonnage

Voir Cahier 4 – Échantillonnage des émissions atmosphériques en provenance de sources fixes, section 5 (MDDEP, 2009) « Post-échantillonnage », page 21.

5 Conclusion

Le Gouvernement du Québec souhaite favoriser et encadrer adéquatement l'émergence de projets locaux de combustion de la biomasse agricole. Actuellement, il existe un intérêt réel pour l'utilisation de certaines biomasses agricoles à titre de combustible dans les chaudières à biomasse. Cette filière émergente nécessite d'être bien documentée et encadrée afin de profiter pleinement des gains escomptés par rapport à la substitution des carburants fossiles, notamment en ce qui a trait à la protection de la qualité de l'air.

Le présent projet visait à faire l'inventaire et la caractérisation des composantes des effluents gazeux et particulaires issus de la combustion de la biomasse agricole, de faire un survol des normes en place et d'établir un protocole simplifié de mesure de ces émissions à partir d'un processus de révision de littérature rigoureux.

Un des aspects importants qui émerge de l'étude de la littérature est que la biomasse a de fortes chances de contenir du Cl et du N qui entraînent des émissions de HCl et NO_x. De plus, la composition des émissions dépend de multiples facteurs tels le type de combustible, l'efficacité de la combustion ou les caractéristiques du combustible. L'analyse des résultats de recherche sur la caractérisation des gaz et des particules issus de la combustion de biomasses a permis de démontrer que les composants issus du procédé de combustion sont généralement classés en deux catégories, soit ceux issus d'une combustion complète ou incomplète. Les principaux composés issus d'une combustion incomplète sont le monoxyde de carbone (CO), le matériel particulaire comme la suie, le char ou les hydrocarbonés lourds condensés (goudron), l'ozone (O₃), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatils non méthaniques (COV_{nM}), le méthane (CH₄), l'ammoniac (NH₃), les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzo-furanes (PCDF). Les principaux produits issus d'une combustion complète sont : le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes d'azote (NO_x) principalement le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂), les oxydes de soufre (SO_x) comme le monoxyde de soufre (SO) et le dioxyde de soufre (SO₂), l'acide chlorhydrique (HCl), les métaux lourds et le matériel particulaire issu de la combustion complète (P₁₀ et P_{2.5}).

Le survol des différentes normes démontre qu'il y a peu de pays qui disposent d'une normalisation spécifique pour la combustion de la biomasse à des fins énergétiques. Même si la réglementation portant sur le bois comme élément de combustion est bien déterminée, largement documentée et normalisée, il n'existe peu, ou pas de législation officielle en matière de combustion des biomasses agricoles. Il en est de même pour les méthodes de vérification de leurs émissions. Cependant, dû aux pressions de toutes sortes et à la volonté de développer la filière de biomasses agricoles comme source d'énergie durable et économique, différents pays ont récemment entrepris différentes démarches afin de mettre en place des procédures de certification des biomasses et des méthodes d'évaluation des équipements de combustion.

Afin de réduire les coûts et d'aiguiller les promoteurs ou les intervenants du milieu, un protocole simplifié est proposé dans le rapport. Dans un contexte d'étude préliminaire, cette approche simplifiée vise à, alléger le nombre de composés à mesurer afin de déterminer le potentiel de la biomasse ou de la chaudière avant d'entreprendre des études plus complètes des émissions en conformité avec le cahier 4 (MDDEP, 2009).

6 Recommandations

Finalement, la présente étude permet de faire des recommandations pour encadrer plus efficacement le développement de la filière de biomasses à des fins de valorisation énergétique. Les auteurs recommandent donc :

- De mettre en place un système de certification de la biomasse comprenant :
 - une définition des biomasses agricoles valorisables à des fins énergétiques;
 - les caractéristiques que la biomasse doit posséder pour être potentiellement performante (incluant par exemple la teneur maximale en chlore, en azote, en métaux, la teneur idéale en eau, etc.);
 - le pouvoir calorifique et la méthode à utiliser;
 - d'autres caractéristiques telle la fourchette du pourcentage de cendre.
- De produire un guide permettant de déterminer le potentiel d'une biomasse incluant :
 - une caractérisation physico-chimique simplifiée de la biomasse basée sur les éléments clefs de la certification;
 - une méthodologie simplifiée de mesure des émissions*;
 - une méthodologie simplifiée pour évaluer l'efficacité énergétique des équipements de combustion*;
 - une approche grossière pour établir un bilan massique et énergétique couplée à une analyse économique indicative;
 - une table d'aide à la décision permettant de déterminer s'il est avantageux de poursuivre le développement de la biomasse et/ou de l'équipement de combustion évalué à l'aide de l'approche préconisée par le guide.

*Ces éléments sont encore inconnus et devraient faire l'objet de recherches plus approfondies.

7 Références

- Abelha, P., I. Gulyurtlu, D. Boavida, J. Seabra Barros, I. Cabrita, J. Leahy et B. Kelleherb, M. Leahyc. 2003. Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor. *Fuel* 82: 687–692.
- Alakangas, E., T. Lensu, N. Haglund et M. Nitschke. 2005. Review of the present status and future prospects of standards and regulations in the bioenergy field. Action 2: development of standards to achieve market harmonisation in the bioenergy field. ISSN 0283-7234. [En ligne] <http://www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/rep584.pdf>
- Andersson, P., S. Marklund. 1998. Emissions of organic compounds from biofuel combustion and influence of different control parameters using a laboratory scale incinerator. *Chemosphere*. 36: 1429-1443.
- Becher, N., S. Brauer, V. Lenz et T. Seidenberger. 2008. Development of test methods for non wood small-scale combustion plants. Work package 2: General conditions, analysis, advice on measurement techniques and standardization. Institute for Energy and Environment. Leipzig, Allemagne. [En ligne]. www.sp.se/sv/index/services/ventilation/Documents/Development%20of%20test%20methods%20for%20non%20wood%20small-scale%20combustion%20plants.pdf
- Signal, K.L., S. Langridge, J.L. Zhou. 2008. Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions. *Atmospheric Environment*. 42: 8863-8871.
- Boman, C., A. Nordin, R. Westerholm et E. Pettersson. 2005. Evaluation of a constant volume sampling setup for residential biomass fired appliances-influence of dilution conditions on particulate and PAH emissions. *Biomass and Bioenergy* 29: 258–268.
- Carter, A-M., A. Germain, J. Rousseau, M. Bisson, C. Gagnon. 2004. Campagne d'échantillonnage sur le chauffage résidentiel au bois. Rapport d'étude : 1999 à 2002. [En ligne]http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/rsqa_fr/media/documents/chauffagebois1999_2002.pdf
- CONEG Policy Research Center, Inc. 2009. Biomass boiler & furnace emissions and safety regulations in the northeast states. Evaluation and options for regional consistency. [En ligne] <http://www.mass.gov/Eoeea/docs/doer/renewables/biomass/DOER%20Biomass%20Emissions%20&%20Safety%20Regulations.pdf>
- EC (Environnement Canada). 2006a. La Voie verte, site Web d'Environnement Canada. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/default.asp?lang=Fr&n=BBB2123F-1>
- EC (Environnement Canada). 2006b. La Voie verte, site Web d'Environnement Canada. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/default.asp?lang=Fr&n=2C68B45C-1>
- EC (Environnement Canada). 2006c. La Voie verte, site Web d'Environnement Canada. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/default.asp?lang=Fr&n=15B9B65A-1>

- EC (Environnement Canada). 2006d. La Voie verte, site Web d'Environnement Canada. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/default.asp?lang=Fr&n=27A52116-1>
- EC (Environnement Canada). 2006e. La Voie verte, site Web d'Environnement Canada. [En ligne] www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/default.asp?lang=Fr&n=590611CA-1
- Eder, G., W. Haslinger et L. Carvalho. 2008. Development of test methods for non-wood small-scale combustion plants. WP1. Final report. [En ligne] www.sp.se/sv/index/services/ventilation/Documents/Development%20of%20test%20methods%20for%20non%20wood%20small-scale%20combustion%20plants.pdf
- EEA (European Environment Agency). 2006. EMEP/CORINAIR Emission inventory guidebook Technical report No 11/2006 [En ligne] www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR4
- Demirbas, A. 2005. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* 31: 171–192.
- Gras, J., C. Meyer, I. Weeks, R. Gillett, I. Galbally, J. Todd, F. Carnovale, R. Joynt, A. Hinwood, H. Berko et S. Brown. 2002. Emissions from domestic solid fuel burning appliances (wood-heaters, open fireplaces). Technical report No. 5. Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, Australie. [En ligne] <http://www.environment.gov.au/atmosphere/airquality/publications/report5/index.html>
- Hedman, B., M. Naslund et S. Marklund. 2006. Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from combustion of firewood and pellets in residential stoves and boilers. *Environmental Science and Technology*. 40: 4968-4975.
- IEPF (Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie). 2005. Guide biomasse énergie. 2^e édition. Québec. Canada.
- InfoMil. 2006. L40 Manual for Measurement of Air Emissions. La Haye, Pays-Bas. [En ligne] <http://www.infomil.nl/uk/subjects/air/emission/>
- Johansson, L., H. Persson, L. Gustavsson, H. Oravainen, K. Winther et U. Zielke. 2006. Measurement of particules from residential combustion of solid fuel - Nordic basis for a new coming CEN standard. Preliminary final report to the Nordic council of ministers, Working Group Sea and Air. [En ligne] <http://www.norden.org/sv/publikationer/publikationer/2007-420>
- Johansson, L., S.B. Leckner, L. Gustavsson, D. Cooper, C. Tullin et A. Potter. 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment*. 38: 4183-4195.
- Kobach, A., Y. Li, K.E. Yttri, F.R. Cassee, P.E. Schwarze et E. Namork. 2006 Physicochemical characterisation of combustion particles from vehicle exhaust and residential wood smoke. *Particle and Fibre Toxicology* 2006, 3:1.

- Lasselsberger, L., G. Eder, W. Haslinger et L. Carvalho. 2008. Development of test methods for non wood small-scale combustion plants. WP 5: Development of test procedures. Austrian Bioenergy Centre GmbH. Wieselburg, Austria. [En ligne] www.sp.se/sv/index/services/ventilation/Documents/Development%20of%20test%20methods%20for%20non%20wood%20small-scale%20combustion%20plants.pdf
- Lavric, E.D., A. Konnov et J. De Ruyck. 2004. Dioxin levels in wood combustion - A review. *Biomass and Bioenergy*. 26: 115-145.
- Leckner, B. et M. Karlsson. 1993. Gaseous emissions from circulating fluidised bed combustion of wood. *Biomass and Bioenergy*, vol. 4, 5: 379-389.
- Lee, S., K. Baumann, J. Schauer, R. Sheesley, L. Naeher, S. Meinardi, D. Blake, E. Edgerton, A. Russell, et M. Clements. 2005. Gaseous and particulate emissions from prescribed burning in Georgia. *Environ. Sci. Technol.* 39: 9049-9056.
- MDDEP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec). 2008, Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 1 – Généralités. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 58 p., 3 annexes, http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/guides_ech.htm
- MDDEP (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec). 2009. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 4 – Échantillonnage des émissions atmosphériques en provenance de sources fixes, Québec. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Édition courante, http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/guides_ech.htm
- Niessen, R. 2008. Combustion and incineration engineering – Chapitre 10. De : Handbook of environmental engineering, Vol. 7: Biosolids Engineering and Management. Édité par : L.K. Wang, N. K. Shamma et Y. T. Hung. The Humana Press, Totowa, NJ.
- NICE (National Institute for Health and Clinical Excellence). 2007. The guidelines manual. London: National Institute for Health and Clinical Excellence. [En ligne] www.nice.org.uk
- Nussbaumer, T. 2003. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & Fuels*. 17: 1510-1521.
- Nussbaumer, T., E. Burkhard et R. Albrecht. 2008. Biomass combustion in Europe. Overview on technologies and regulations. Final Rapport. [En ligne]. <http://www.nyserda.org/Programs/Environment/EMEP/Report%2008-03%20-%20Biomass%20Combustion%20in%20Europe-complete-after%20corrections.pdf>
- Nussbaumer, T., C. Czasch, N. Klippel, L. Johansson et C. Tullin. 2008a. Particulate emissions from biomass combustion in IEA countries. Survey on measurements and emission factors. ISBN 3-908705-18-5. [En ligne] http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer_et_al_IEA_Report_PM10_Jan_2008.pdf

- Olsson, M. et J. Kjallstrand. 2004. Emissions from burning of softwood pellets. *Biomass and Bioenergy*. 27: 607-611.
- Olsson, M. 2006. Residential biomass combustion – emissions of organic compounds to air from wood pellets and other new alternatives. Thèse de doctorat. Chalmers University of Technology. Department of Chemical and Biological Engineering. Göteborg, Suède.
- Oravainen, H. 2000. Testing methods and emission requirements for small boilers (< 300 kW) in Europe. Motiva's Publication. [En ligne] <http://www.vtwoodsmoke.org/pdf/euBoileremission.pdf>
- Rudolph, J., A. Khedim et R. Koppmann. 1995. Field study of the emissions of methyl chloride and other halocarbons from biomass burning in western Africa. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 22: 67 – 80.
- Spliethoff, H., W. Scheurer et K.R.G. Hein. 2000. Effect of co-combustion of sewage sludge and biomass on emissions and heavy metals behaviour. *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*. 78: 33-39.
- Tarnawski, W. 2004. Emission factors for combustion of biomass fuels in the pulp and paper mills. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. July / October 2004, Vol. 12, No. 3 (47).
- Tissari, J., O. Sippula, J. Kouki, K. Vuorio et J. Jokiniemi. 2008. Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner. *Energy and Fuels*. 22: 2033-2042.
- Talluto, L. 2009. Des champs d'énergie? Le coopérateur agricole. Édition septembre 2009. Vol. 38. No 7.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2000. Method 5h: determination of particulate matter emissions from wood heaters from a stack location. [En ligne] <http://www.epa.gov/ttnemc01/promgate.html>
- Van Loo, S., J. Koppejan. 2008. The handbook of biomass combustion and co-firing. Édité par Sjaak van Loo et Jaap Koppenjan. Sterling, VA. USA.
- Villeneuve, J. 2009. Normes de combustion de la biomasse au Québec, au Canada, aux États-Unis et en Europe. Agriculture et Agroalimentaire Canada
- Wehbe, Y. 2002. Certification des chaudières alimentées avec un combustible bois. *Bio Énergie. Revue technique européenne*. ISSN 1561 – 0802. Mars 2002. p. 38. [En ligne] <http://www.itebe.org/telechargement/revue/Revue5/Revue5-FR/RevueBE5-FR-p38.pdf>
- Werther, J et T. Ogada. 1999. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. 25: 55-116.

Zhang, J., K.R. Smith, Y. Ma, S. Ye, F. Jiang, W. Qi, P. Liu, M.A.K. Khalil, R.A. Rasmussen et S.A. Thorneloe. 2000. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. *Atmospheric Environment* 34: 4537-4549.

Annexe 1.

Évaluation des critères d'inclusion et de pertinence lors de l'étape 4 de la revue systématique de la littérature.

| Article | Critères | | | | | | | | Titre | Auteurs | Publication |
|---------|----------|----|----|----|----|----|----|----|---|--|--|
| | I1 | I2 | I3 | I4 | P1 | P2 | P3 | P4 | | | |
| 1 | O | O | O | O | A | E | E | E | Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin | Bäfver L.S., M. Rönnbäck, B. Leckner, F. Claesson, C. Tullin | <i>Fuel Processing Technology</i> . 2009. 90: pp. 353 - 359 |
| 2 | O | O | N | O | A | A | I | I | Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of agricultural and sylvicultural debris | Conde, F.J, J.H. Ayala, A.M. Afonso, V. Gonzalez | <i>Atmospheric Environment</i> . 39. 2005. 6654-6663 |
| 3 | O | N | N | N | A | I | I | I | Combustion of biomass | Demirbas, A. | <i>Energy Sources</i> . 29. 2007. 549-61 |
| 4 | O | O | O | O | A | E | E | I | Emission of oxygenated species from the combustion of pine wood and its relation to soot formation | Fitzpatrick, E.M., A.B. Ross, J. Bates, G. Andrews, J.M. Jones, H. Phylaktou, M. Pourkashanian, A. Williams | <i>Process Safety and Environmental Protection</i> . 85. 2007. 430-440 |
| 5 | O | O | O | N | A | E | E | I | Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove | Hedberg, E., A. Kristensson, M. Ohlsson, C. Johansson, P-A. Johansson, E. Swietlicki, V. Vesely, U. Wideqvist, R. Westerholm | <i>Atmospheric Environment</i> . 36. 2002. 4823-4837 |
| 6 | O | O | O | O | A | E | E | A | Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from combustion of firewood and pellets in residential stoves and boilers | Hedman, B., M. Naslund, S. Marklund | <i>Environmental Science and Technology</i> . 40. 2006. 4968-4975 |
| 7 | O | O | N | O | E | A | E | I | Emissions modeling of fluidised bed co-combustion of poultry litter and peat | Henihan, A.M., M.J. Leahy, J.J. Leahy, E. Cummins, B.P. Kelleher | <i>Bioresource Technology</i> . 87. 2003. 289-294 |
| 8 | O | N | N | O | E | I | E | I | Advances in poultry litter disposal technology - a review | Kelleher, B.P., J.J. Leahy, A.M. Henihan, T.F. O'Dwyer, D. Sutton, M.J. Leahy | <i>Bioresource Technology</i> . 83. 2002. 27-36 |
| 9 | O | O | O | O | A | E | A | A | Measurement and prediction of the emission of pollutants from the combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace | Ross, A.B., J.M. Jones, S. Chaiklangmuang, A. Pourkashanian, A. Williams, K. Kubica, J.T. Andersson, M. Kerst, P. Danihelka, K.D. Bartle | <i>Fuel</i> . 81. 2002. 571-582 |
| 10 | O | O | N | O | E | A | A | I | Biomass harvest from natural willow rings around paririe wetlands | Schroeder, W., J. Kort, P. Savoie, F. Preto | <i>Bioenerg. Res</i> . 2009. 2. 99-105 |

(suite)

| Article | Critères | | | | | | | | Titre | Auteurs | Publication |
|---------|----------|----|----|----|----|----|----|----|---|--|--|
| | I1 | I2 | I3 | I4 | P1 | P2 | P3 | P4 | | | |
| 11 | O | O | N | O | A | A | E | A | Emissions of organic compounds from biofuel combustion and influence of different control parameters | Andersson, P., S. Marklund | <i>Chemosphere</i> . 1998. 36: pp. 1429-1443 |
| 12 | O | N | O | O | A | A | A | | Chemical characterization of fine particulate emissions from the fireplace combustion of wood types grown in the midwestern and Western United States | Fine, P.M., G.R. Cass, B.R.T. Simoneit | <i>Environmental Engineering Science</i> . 2004. 21: pp. 387-409 |
| 13 | O | O | O | O | A | E | E | I | Dioxin level in wood combustion - a review | Lavric, E.D., A.A. Konnov, J. De Ruyck | <i>Biomass and Bioenergy</i> . 2004. 26: pp. 115-145 |
| 14 | O | O | N | O | A | A | E | A | Levels and congener patterns of polychlorinated dibenzo-P-dioxins and dibenzofurans in solid residues from wood fired boilers | Oehme M., M.D. Müller | <i>Chemosphere</i> . 1995. 30. 1527-1539 |
| 15 | O | N | N | N | A | A | E | A | Wheat straw and peat for fuel pellets - organic compounds from combustion | Olsson, M. | <i>Biomass and Bioenergy</i> . 2006. 30: pp. 555 - 564 |
| 16 | O | O | O | O | A | E | | | Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater. | Tissari, J., J. Lyyranen, K. Hytonen, O. Sippula, U. Tapper, A. Frey, K. Saarnio, A.S. Pennanen, R. Hillamo, R.O. Salonen, M-R. Hirvonen, J. Jokiniemi | <i>Energy and Fuels</i> . 2004. 18: pp. 897-907 |
| 17 | O | N | N | O | A | A | I | I | Combustion of horse manure for heat production | Lundgren J., E. Pettersson | <i>Bioresource Technology</i> . 100. 2009. 3121-3126 |
| 18 | O | N | O | O | A | A | E | A | Critical parameters for particle emissions in small-scale fixed-bed combustion of wood pellets | Wiinikka, H., R. Gebart | <i>Energy and Fuels</i> . 2004. 18: pp. 897-907 |
| 19 | O | O | N | O | E | A | E | E | Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor | Abelha, P., I. Gulyurtlu, D. Boavida, J.S. Barros, I. Cabrita, J. Leahy, B. Kelleher, M. Leahy | <i>Fuel</i> . 82. 2003. 687-692 |
| 20 | O | N | O | O | A | A | E | E | Aerosol and fly ash formation in fixed bed biomass combustion systems using woody biofuels | Brunner T., M. Joeller, I. Obernberger, F. Frandsen | <i>12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection</i> . Juin 2002, Amsterdam |
| 21 | O | N | O | N | I | A | E | E | Chemical characterization of fine particle emissions from fireplace combustion of woods grown in the Northeastern United States | Fine, P.M., G.R. Cass, B.R.T. Simoneit | <i>Environmental, Science and Technology</i> . 2001. 35, pp. 2665-2675 |
| 22 | O | N | O | O | E | A | E | E | Chemical characterization of fine particle emissions from the wood stove combustion of prevalent United States tree species | Fine, P.M., G.R. Cass, B.R.T. Simoneit | <i>Environmental Engineering Science</i> . 2004. 21: pp. 705-721 |

(suite)

| Article | Critères | | | | | | | | Titre | Auteurs | Publication |
|---------|----------|----|----|----|----|----|----|----|--|---|---|
| | I1 | I2 | I3 | I4 | P1 | P2 | P3 | P4 | | | |
| 23 | O | O | N | O | E | I | E | E | High-temperature thermal destruction of poultry derived wastes for energy recovery in Australia | Florin, N.H., A.R. Maddocks, S. Wood, A.T. Harris | <i>Waste Management</i> . 2009. 29: pp. 1399-1408 |
| 24 | O | N | O | O | E | A | E | I | Chemical, microphysical and optical properties of primary particles from the combustion of biomass fuels | Habib, G., C. Venkataraman, T.C Bond, J.J. Schauer | <i>Environmental Science and Technology</i> . 2008. 42: pp. 8829-8834 |
| 25 | O | O | O | O | A | E | E | E | Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets | Johansson, L.S, B. Leckner, L. Gustavsson, D. Cooper, C. Tullin, A. Potter | <i>Atmospheric Environment</i> . 2004. 38: pp. 4183-4195 |
| 26 | O | N | O | O | A | A | E | E | Modeling of aerosol formation during biomass combustion in grate furnaces and comparison with measurements | Joller, M., T. Brunner, I. Obernberger | <i>Energy and Fuels</i> . 2005. 19: pp. 311-323 |
| 27 | O | O | O | O | A | E | E | E | Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarbons. An experimental study | Kozinski, J.A., R. Saade | <i>Fuel</i> . 1998. 77: pp. 225-237 |
| 28 | O | O | N | O | A | A | E | I | Domestic combustion of biomass fuels in developing countries: A major source of atmospheric pollutants | Ludwig, J., L.T. Marufu, B. Huber, M.O. Andrade, G. Helas | <i>Journal of Atmospheric Chemistry</i> . 2003. 44: 23–37 |
| 29 | O | O | O | N | I | E | E | E | Fine particle and gaseous emission rates from residential wood combustion | Mcdonald, Jacob D; Zielinska, Barbara; Fujita, Eric M; Sagebiel, John C; Chow, Judith C; Watson, John G | <i>Environmental Science and Technology</i> . 2000. 34: pp. 2080-2091 |
| 30 | O | O | O | O | A | E | E | I | Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II - Biomass combustion | Reddy, M.S., C. Venkataraman | <i>Atmospheric Environment</i> . 2002. 36: pp. 699-712 |
| 31 | O | O | N | O | A | A | E | E | Dioxin emissions from wood combustion | Schatowitz, B., G. Brandt, F. Gafner, E. Schlumpf, R. Bühler, P. Hasler, T. Nussbaumer | <i>Chemosphere</i> . 1994. 29: pp. 2005 – 2013 |
| 32 | O | O | O | O | A | E | E | E | Effect of co-combustion of sewage sludge and biomass on emissions and heavy metals behaviour | Spliethoff, H., W. Scheurer, K.R.G. Hein | <i>Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B</i> . 2000. 78: pp. 33-39 |
| 33 | O | O | O | O | A | E | E | E | Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner | Tissari, J., O. Sippula, J. Kouki, K. Vuorio, J. Jokiniemi | <i>Energy and Fuels</i> . 2008. 22: pp. 2033-2042 |

(suite)

| Article | Critères | | | | | | | | Titre | Auteurs | Publication |
|---------|----------|----|----|----|----|----|----|----|--|---|---|
| | I1 | I2 | I3 | I4 | P1 | P2 | P3 | P4 | | | |
| 34 | O | O | O | O | E | E | E | I | Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors | Zhang, J., K.R. Smith, Y. Ma, S. Ye, F. Jiang, W. Qi, P. Liu, M.A.K. Khalil, R.A. Rasmussen, S.A. Thorneloe | <i>Atmospheric Environment</i> . 2000. 34 : 4537-4549 |
| 35 | O | O | O | O | E | E | E | E | Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions | Signal, K.L, S. Langridge, J.L. Zhou | <i>Atmospheric Environment</i> . 2008. 42: pp. 8863-8871 |
| 36 | O | N | O | O | E | A | E | E | Characterisation of wood combustion particles using electron probe microanalysis | Osán, J., B. Alföldy, S. Török, R. Van Grieken | <i>Atmospheric Environment</i> . 2002. 36: pp. 2207-2214 |
| 37 | O | O | O | N | E | A | E | I | Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C1-C29 organic compounds from fireplace combustion of wood | Schauer, J.J., M.J Kleeman, G.R. Cass, B.R.T. Simoneit | <i>Environmental Science and Technology</i> . 2001. 35: pp. 1716-1728 |
| 38 | O | N | O | N | A | A | I | I | Characterization of organic aerosols emitted from the combustion of biomass indigenous to South Asia | Sheesley, R.J. J.J. Schauer, Z. Chowdhury, G.R. Cass, B.R.T. Simoneit | <i>Journal of Geophysical Research</i> . 2003. 108: pp. 8-1 |
| 39 | O | O | N | O | E | A | E | E | Optimiser la combustion pour un développement durable du bois-énergie | Bernard, C., M.L. Rabot-Querci, Y. Rogaume, C. Rogaume, A. Zoulalian | <i>Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP</i> , Vol. 61 (2006), No. 2, pp. 203-211 |
| 40 | O | O | N | O | E | A | E | E | Specific chimney emissions and biofuel characteristics of softwood pellets for residential heating in Sweden | Olsson, M., J. Kjallstrand, G. Petersson | <i>Biomass and Bioenergy</i> . 2003. 24: pp. 51-57 |
| 41 | O | O | N | O | E | A | E | I | Emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from biomass combustion and solid waste incineration | Demirbas, M.F. | <i>Energy Sources</i> . 2007. 28: pp. 1041-1047 |
| 42 | O | O | N | N | E | A | E | I | Life cycle emissions of greenhouse gases associated with burning animal wastes in countries of the European Union | Reijnders, L., M.A.J. Huijbregts | <i>Journal of Cleaner Production</i> . 13. 2005. 51–56 |

Les cotes pour les critères d'inclusion (I1-I4) sont évaluées comme suit : O = oui, N = non

Les cotes pour les critères de pertinence (P1-P4) sont évaluées comme suit : E = excellent, A = acceptable, I = inacceptable

Annexe 2.

Résultats de l'évaluation de la validité des écrits à l'étape 5 de la revue systématique de la littérature.

| Article | 5.1.1 | 5.1.2 | 5.1.3 | 5.1.4 | 5.1.5 | 5.1.6 | 5.1.7 | 5.2.1 | 5.2.2 | 5.2.3 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | + | + | E |
| 7 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | - | + | M |
| 9 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | NT | - | + | M |
| 10 | 3 | 3 | 3 | 3 | NT | 3 | NR | - | - | F |
| 11 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | ++ | - | E |
| 12 | 2 | 2 | NR | NA | 3 | 2 | 2 | + | + | E |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | + | + | M |
| 14 | 1 | 1 | 3 | NA | 3 | 1 | NA | + | + | M |
| 15 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | - | + | E |
| 16 | 2 | 3 | 1 | NA | NT | NA | NA | - | - | M |
| 17 | 2 | 3 | 2 | | NT | 3 | 3 | - | - | M |
| 18 | 1 | 1 | 2 | NA | 2 | 1 | 2 | ++ | + | E |
| 19 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | ++ | + | E |
| 20 | 1 | 1 | 3 | 3 | NA | 1 | 1 | ++ | + | E |
| 22 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | ++ | + | E |
| 25 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | ++ | + | E |
| 26 | 1 | 1 | 1 | 1 | NA | 1 | 2 | + | + | E |
| 27 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | ++ | + | E |
| 31 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | ++ | + | E |
| 32 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | + | + | E |
| 33 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | ++ | + | E |
| 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ++ | | E |
| 36 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ++ | | E |
| 37 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ++ | | E |
| 38 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | + | - | M |
| 39 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | + | - | F |
| 40 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | + | - | M |
| 41 | 3 | NA | 3 | NA | NA | NA | 3 | - | - | F |
| 42 | 2 | NA | 1 | NA | NA | NA | 2 | ++ | | F |

Les cotes pour les paramètres 5.1.1 à 5.1.7 sont évaluées comme suit : 1 = bien traité, 2 = adéquatement traité, 3 = insuffisamment traité, NT = non traité (mentionné, mais avec des détails insuffisants pour une évaluation), NR = Non rapporté (non mentionné, ou indique que cet aspect a été ignoré), NA = non applicable.

Les cotes pour les paramètres 5.2.1 sont évaluées comme suit : ++ = beaucoup, + = assez, - = pas du tout

Les cotes pour les paramètres 5.2.2 sont évaluées comme suit : + = positivement, - = négativement

Les cotes pour les paramètres 5.2.3 et 5.2.4 sont évaluées comme suit : E = élevé, M = moyen, F = faible

Annexe 3.

Liste des articles scientifiques résultant du processus de revue systématique de la littérature.

| Article | Titre | Auteur | Publication |
|---------|--|--|---|
| 6 | Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from combustion of firewood and pellets in residential stoves and boilers | Hedman, B., M. Naslund, S. Marklund | Environmental Science and Technology. 40. 2006. 4968-4975 |
| 9 | Measurement and prediction of the emission of pollutants from the combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace | Ross, A.B., J.M. Jones, S. Chaiklangmuang, A. Pourkashanian, A. Williams, K. Kubica, J.T. Andersson, M. Kerst, P. Danihelka, K.D. Bartle | Fuel. 81. 2002. 571–582 |
| 11 | Emissions of organic compounds from biofuel combustion and influence of different control parameters | Andersson, P., S. Marklund | Chemosphere. 1998. 36: pp. 1429-1443 |
| 12 | Chemical characterization of fine particule emissions from the fireplac combustion of wood types grown in the midwestern and Western United States | Fine, P.M., G.R. Cass, B.R.T Simoneit | Environmental Engineering Science. 2004. 21: pp. 387-409 |
| 13 | Dioxin level in wood combustion-a review | Lavric, E.D., A.A. Konnov, J. De Ruyck | Biomass and Bioenergy. 2004. 26: pp. 115-145 |
| 14 | Levels and congener patterns of polychlorinated dibenzo-P-dioxins and dibenzofurans in solid residues from wood fired boilers | Oehme M., M.D. Müller | Chemosphere. 1995. 30. 1527-1539 |
| 15 | Wheat straw and peat for fuel pellets - organic compounds from combustion | Olsson, M. | Biomass and Bioenergy. 2006. 30: pp. 555 – 564 |
| 18 | Critical Parameters for particle emissions in Small-scale fixed-bed combustion of wood pellets | Wiinikka, H., R. Gebart | Energy and Fuels. 2004. 18: pp. 897-907 |
| 19 | Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor | Abelha, P., I. Gulyurtlu, D. Boavida, J.S. Barros, I. Cabrita, J. Leahy, B. Kelleher, M. Leahy | Fuel. 82. 2003. 687–692 |
| 20 | Aerosol and fly ash formation in fixed bed biomass combustion systems using woody biofuels | Brunner T., M. Joeller, I. Obernberger, F. Frandsen | 12 th European conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection. Juin 2002, Amsterdam |

| | | | |
|----|---|--|---|
| 22 | Chemical characterization of fine particle emissions from the wood stove combustion of prevalent United States tree species | Fine, P.M., G.R. Cass, B.R.T. Simoneit | Environmental Engineering Science. 2004. 21: pp. 705-721 |
| 25 | Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets | Johansson, L.S., B. Leckner, L. Gustavsson, D. Cooper, C. Tullin, A. Potter | Atmospheric Environment. 2004. 38: pp. 4183-4195 |
| 26 | Modeling of aerosol formation during biomass combustion in grate furnaces and comparison with measurements | Joller, M., T. Brunner, I. Obernberger | Energy and Fuels. 2005. 19: pp. 311-323 |
| 27 | Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarbons. An experimental study | Kozinski, J.A., R. Saade | Fuel. 1998. 77: pp. 225-237 |
| 31 | Dioxin emissions from wood combustion | Schatowitz, B., G. Brandt, F. Gafner, E. Schlumpf, R. Bühler, P. Hasler, T. Nussbaumer | Chemosphere. 1994. 29: pp. 2005 - 2013 |
| 32 | Effect of co-combustion of sewage sludge and biomass on emissions and heavy metals behaviour | Spliethoff, H., W. Scheurer, K.R.G. Hein | Process safety and environmental protection: Transactions of the institution of chemical engineers, Part B. 2000. 78: pp. 33-39 |
| 33 | Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner | Tissari, J., O. Sippula, J. Kouki, K. Vuorio, J. Jokiniemi | Energy and Fuels. 2008. 22: pp. 2033-2042 |

Annexe 4. Émissions types relevées dans la littérature

| Composant | Unités | Biomasse | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|--------|-----------|---------------|-----|------|--------|------|------|-----------------|------|------|-------|------|-----------------|------|--------|-----|------|
| | | Bois* | | | Paille de blé | | | Avoine | | | Avoine + Tourbe | | | Colza | | Écorce de colza | | Blé | | |
| | | min | max | Réf.** | min | max | Réf. | min | max | Réf. | min | max | Réf. | max | Réf. | max | Réf. | min | max | Réf. |
| CO ₂ | % | 0,6 | 14,8 | 6; 11; 25 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ppm | 96 | 6002 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | mg/m ³ | 2400 | 110000 | 15 | | | | | | | | | | | | | 6100 | 120000 | 15 | |
| | g/kg*** | 29,3 | 49,8 | 9; 27 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CO | ppm | 23 | 1400 | 11; 27 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | g/m ³ | 0,094 | 27 | 6; 15; 31 | | | | | | | | | | | | | 0,22 | 3,1 | 15 | |
| | g/kg | 0,4 | 4,16 | 33 | | | 1,6 | 6,8 | 33 | 0,51 | 2,85 | 33 | 1,49 | 33 | 0,74 | 33 | | | | |
| | mg/MJ | 30 | 16400 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| O ₂ | % | 3,3 | 19,1 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Particules | PT | mg/m ³ | 20,7 | 950 | 35; 20 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | mg/MJ | 12 | 2200 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | P10 | g/kg | 0,21 | 0,4 | 33 | | | 0,4 | 0,67 | 33 | 0,72 | 0,85 | 33 | 0,27 | 33 | | | | | |
| | P1 | g/kg | 0,21 | 0,38 | 33 | | | 0,38 | 0,64 | 33 | 0,7 | 0,83 | 33 | 0,26 | 33 | | | | | |
| | P2,5 | g/kg | 0,88 | 9,3 | 12; 22; 37 | | | | | | | | | | | | | | | |
| NO _x | NO _x | g/kg | 1,1 | 0,63 | 33 | | | 3,27 | 4,95 | 33 | 3,08 | 5,01 | 33 | 8,33 | 33 | 7,15 | 33 | | | |
| | | mg/MJ | 28 | 180 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | NO | ppm | 22 | 359 | 11; 35 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | mg/m ³ | 0,1 | 270 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | NO ₂ | g/kg | 0,6 | 0,82 | 9; 27 | | | | | | | | | | | | | | | |
| mg/m ³ | | | | | 0,3 | 9 | 6 | | | | | | | | | | | | | |
| SO ₂ | g/kg | 0,05 | 0,3 | 9; 33 | | | 1,59 | 2,26 | 33 | 1,52 | 2,55 | 33 | 7,27 | 33 | 5,08 | 33 | | | | |
| | mg/Nm ³ | | | | 0,06 | 200 | 6 | | | | | | | | | | | | | |
| HCl | g/kg | 0,005 | 0,02 | 33 | | | 0,31 | 0,42 | 33 | 0,21 | 0,35 | 33 | 0,16 | 33 | 0,08 | 33 | | | | |
| | mg/m ³ | | | | 0,3 | 24 | 6 | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------|-------|--------|--------|--|-----|------|----|--|--|--|--|--|-------|-----|------|----|--|--|
| PCDD/PCDF | pg/MJ | 5,86 | 4523 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | mg/gOC | 0,069 | 9,117 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ng/g 2,3,7,8-TE | 1 | 10 | 14 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ng TE/m ³ | 0,019 | 0,214 | 31 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ng/m ³ | | | | | 0,6 | 200 | 6 | | | | | | | | | | | |
| | ng TE/kg | 0,23 | 2,57 | 31 | | 35 | 80,5 | 13 | | | | | | | | | | | |
| HAP | ppm | 8,5 | 36,8 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | mg/kg | 203 | 250 | 9 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | mg/gOC | 0,008 | 3,894 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | µg/m ³ | 1,3 | 1631,7 | 15; 35 | | | | | | | | | | | 200 | 8000 | 15 | | |
| | mg/MJ | 0,06 | 64 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| CH4 | mg/MJ | <0,55 | 4800 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | mg/m ³ | 2,7 | 470 | 15 | | | | | | | | | | 5,5 | 750 | 15 | | | |
| | mg/kg | | 4120 | 37 | | | | | | | | | | | | | | | |
| COVnM | mg/MJ | <0,00 | 780 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | mg/m ³ | <0,03 | 80 | 15 | | | | | | | | | | <0,03 | 300 | 15 | | | |
| | mg/kg | | 383 | 37 | | | | | | | | | | | | | | | |
| HC | g/kg | | 2,8 | 27 | | | | | | | | | | | | | | | |

*L'information de plusieurs essences de bois est recompilée (sciure, copeaux, écorce, granules, bûches et déchets).

**Référence.

***masse du composant par rapport à la masse du combustible.

Annexe 5. Normes ou guides européens et américains pour biocombustibles solides et leur analyse

Europe

Terminologie, définitions et descriptions

CEN/TS 14588:2003 Biocombustibles solides - Terminologie, définitions et descriptions

Spécifications, classification et qualité du combustible

CEN/TS 14961 :2005 Biocombustibles solides - Spécifications et classes du combustible

CEN/TS 15234:2006 Biocombustibles solides - Assurance de la qualité du combustible

Échantillonnage

CEN/TS 14778-1:2005 Biocombustibles solides - Échantillonnage - Partie 1: Méthodes pour échantillonner

CEN/TS 14778-2:2005 Biocombustibles solides - Échantillonnage - Partie 2: Méthodes pour échantillonner le matériel particulaire transporté en camions

CEN/TS 14779:2005 Biocombustibles solides - Échantillonnage — Méthodes pour préparer des plans et des certificats d'échantillonnage

CEN/TS 14780:2005 Biocombustibles solides - Méthodes pour la préparation d'échantillons

Méthodes d'analyses physiques et mécaniques

CEN/TS 14774-1:2004 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination la teneur en humidité - Méthode du four - Partie 1: humidité totale - Méthode de référence

CEN/TS 14774-2:2004 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la teneur en humidité - Méthode du four - Partie 2: humidité totale- Méthode simplifiée

CEN/TS 14774-3:2004 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la teneur en humidité - Méthode du four - Partie 3: humidité des échantillons d'analyses générales

CEN/TS 14775:2004 Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en cendres

CEN/TS 14918:2005 Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination du pouvoir calorifique

CEN/TS 15103:2005 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la densité apparente

CEN/TS 15148:2005 Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination du contenu en matière volatile

CEN/TS 15149-1:2006 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la distribution des particules - Partie 1: Méthode de l'écran oscillant avec une ouverture de tamis de 3,15 mm

CEN/TS 15149-2:2006 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la distribution de la grosseur des particules - Partie 2: Méthode de l'écran vibreur avec des ouvertures de 3,1 mm et moins.

CEN/TS 15149-3:2006 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la distribution de la grosseur des particules - Partie 3: Méthode de l'écran rotatif

CEN/TS 15150:2005 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la densité des particules

CEN/TS 15210-1:2005 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la durabilité mécanique de granules et de briquettes - Partie 1: Granules

CEN/TS 15210-2:2005 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination de la durabilité mécanique de granules et de briquettes - Partie 2: Briquettes

CEN/TS 15370-1 Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination du comportement des

cendres et des cendres fondantes - Partie I: Méthode des températures caractéristiques

Méthodes d'analyses chimiques

- CEN/TS 15104:2005 Biocombustibles solides - Détermination du contenu total de carbone, hydrogène et azote - Méthodes instrumentales
- CEN/TS 15105:2005 Biocombustibles solides - Méthodes pour la détermination du contenu d'eau soluble, du chlorure, sodium et potassium
- CEN/TS 15289:2006 Biocombustibles solides - Détermination du contenu total des sulfures et chlorures
- CEN/TS 15290:2006 Biocombustibles solides - Détermination des éléments majeurs
- CEN/TS 15297:2006 Biocombustibles solides - Détermination des éléments mineurs
- CEN/TS 15296:2006 Biocombustibles solides - Calcul de l'analyse à bases différentes
- CEN/TS 15289 Biocombustibles solides - Détermination du contenu total des sulfures et chlorures

Normes en développement

- 00335031 Biocombustibles solides - Guide pour le développement et l'implémentation de l'assurance qualité pour les biocombustibles solides (en développement)
- 00335032 Méthode pour la détermination de la distribution de la grosseur des particules de granules désintégrées (en développement)
- 00335033 Biocombustibles solides - Guide pour l'assurance qualité du système (en développement)
- 00335034 Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination des propriétés particulières de pontage et biocombustibles (en développement)

Plusieurs normes ont été adoptées par différents pays européens comme des normes nationales (Autriche, Belgique, Danemark, Allemagne, etc.)

États-Unis

- ASTM D 871 (1982) Méthode standard du test pour l'analyse de l'humidité des combustibles de bois
- ASTM E 897 (1988) Test standard pour l'analyse de la matière volatile dans l'analyse d'échantillons des combustibles de bois
- ASTM D 1102 Méthode d'essai pour l'analyse des cendres dans le bois
- ASTM D 873 (1982) Méthode standard pour l'analyse de la densité apparente de biomasses densifiées