

PATRICK BRASSARD

**ÉTUDE DES ÉMISSIONS GAZEUSES ET  
PARTICULAIRES DE LA COMBUSTION DE  
BIOMASSES AGRICOLES ET FORESTIÈRES**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en génie agroalimentaire  
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DES SOLS ET DE GÉNIE AGROALIMENTAIRE  
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2012

## Résumé

Il existe actuellement un intérêt marqué pour la combustion de biomasses agricoles au Québec. Cependant, la réglementation rend difficile la combustion de cultures lignocellulosiques en raison d'un manque de connaissances concernant les émissions. Ce projet a comme but de caractériser et de comparer les émissions de la combustion de biomasses agricoles (panic érigé, saule et fraction solide de lisier de porc) et forestières (mélange de bois d'épinette noir et de pin gris). Les particules des émissions ont été échantillonnées et les concentrations de CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> et HCl ont été analysées par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, puis transformées en émissions. L'analyse statistique démontre que les émissions des biomasses agricoles sont semblables à celles du bois pour plupart des composés émis (CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O et HCl), cependant des différences significatives sont détectées pour le SO<sub>2</sub>, le NO<sub>2</sub> et les particules (P<0,05).

## **Abstract**

The interest for biomass as a renewable energy source has risen in the last few years. However, combustion of agricultural biomass is limited in the province of Quebec due to lack of knowledge on its emissions. The purpose of this study was to characterize and compare gaseous and particulate (PM) emissions from the combustion of agricultural (switchgrass, willow, and dried solid fraction of pig manure) and forest (wood mixture of black Spruce and jack Pine) biomass. PM in combustion gases was sampled and concentrations of CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> and HCl were analysed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and converted into emissions. Results were statistically analysed by the SAS MIXED procedure. Emissions of CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, and HCl showed no significant differences between biomasses but significant differences were detected for SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and PM (P<0,05).

## Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Dr. Denis Bussières de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) qui m'a permis d'être responsable de ce projet passionnant et qui a été mon directeur de recherche pendant les premiers mois de ma maîtrise à l'UQAC. Il a terminé sa contribution en tant que co-directeur tout en me prodiguant de précieux conseils. Je remercie Dr. Robert Lagacé de l'Université Laval qui a accepté de prendre le relais en tant que directeur de recherche dans le programme de génie agroalimentaire, pour m'avoir consacré de son temps.

Je remercie également Dr. Stéphane Godbout de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) qui a été mon co-directeur de recherche dans les premiers mois de ma maîtrise et qui m'a été d'un grand support jusqu'à la fin. Dr. Godbout m'a permis d'intégrer l'équipe Mésanges<sup>MD</sup> de l'IRDA et ce fut un plaisir de travailler sur ce projet de recherche avec des gens aussi passionnés et compétents. Sur le plan scientifique, j'aimerais donc remercier monsieur Joahnn Palacios, professionnel de recherche avec qui j'ai collaboré étroitement pour la réalisation de ce projet de même que Frédéric Pelletier, qui a été l'un des instigateurs du projet. Sur le plan technique, je me dois de remercier Jean-Pierre Larouche, chimiste responsable de l'analyse des gaz, M. Jacques Labonté et Cédric Morin, spécialistes en instrumentation, et Michèle Grenier, statisticienne. J'adresse aussi mes remerciements aux stagiaires français, Mathieu Biton et plus particulièrement, Benjamin Prost, qui m'a été d'une grande aide lors des essais expérimentaux. Je ne pourrais passer sous silence tout le travail effectué par l'équipe de l'IRDA à Deschambault : Michel Côté, Michel Noël, Christian Gauthier et Harold Dussablon, leur aide à la réalisation du projet fut indispensable.

Enfin, j'adresse un merci spécial à ma famille : mes parents France et Serge et ma sœur Catherine, qui m'ont supporté tout au long de mes études et accueilli à la maison lorsque j'avais besoin d'un peu de réconfort. Le support financier, les encouragements et les conseils judicieux de mes parents furent une source de motivation d'une valeur inestimable.

*À mes parents, sans qui je ne serais où j'en  
suis aujourd'hui, à mes proches qui ne sont  
plus de ce monde et dont leur présence me  
manque, et aux générations futures, pour  
que l'environnement dans lequel nous vivons  
soit préservé pour encore longtemps...*

## Table des matières

Résumé .....	ii
Abstract.....	iii
Remerciements .....	iv
Table des matières .....	vi
Liste des tableaux .....	viii
Liste des figures.....	ix
Introduction .....	1
1. Revue de littérature.....	4
1.1 Les ressources en énergie .....	4
1.2 La biomasse .....	5
1.3 La combustion de la biomasse.....	7
1.4 L'énergie issue de la biomasse .....	8
1.5 Émissions issues de la combustion de la biomasse .....	10
1.5.1 Les émissions issues d'une combustion complète.....	11
1.5.2 Les émissions issues d'une combustion incomplète .....	14
1.6 Cadre normatif au Québec.....	16
2. Hypothèses, but et objectifs.....	18
3. Méthodologie.....	19
3.1 Choix des biomasses.....	19
3.2 Montage expérimental .....	21
3.2.1 Combustion.....	21
3.2.2 Instruments de mesure .....	22
3.2.3 Méthode de calcul des émissions .....	25
3.3 Analyse des granules et des cendres.....	31
3.4 Plan expérimental .....	32
3.4.1 Essais préliminaires .....	32
3.4.2 Essais finaux.....	33
3.5 Modèle d'analyse statistique .....	34
4. Résultats et discussion.....	36
4.1 Analyse des granules .....	36
4.2 Résultats des tests préliminaires.....	38
4.3 Résultats des tests finaux.....	40
4.3.1 Analyse de la concentration des gaz.....	40
4.3.2 Analyse des émissions.....	42
4.3.3 Observations générales.....	57
Conclusions .....	58
Recommandations .....	62
Bibliographie .....	64
ANNEXE A. Photos du montage expérimental .....	70
ANNEXE B. Protocole détaillé d'une journée de combustion .....	74
ANNEXE C. Fiche technique du capteur de pression.....	76
ANNEXE D. Courbes de calibration des iris .....	78
ANNEXE E. Analyse de données des essais préliminaires .....	82
ANNEXE F. Calcul des émissions (exemple).....	84

ANNEXE G. Analyse statistique .....	90
ANNEXE H. Analyse des cendres .....	96

## Liste des tableaux

Tableau 1. Composition des biomasses selon la littérature (% base sèche).....	7
Tableau 2. Émissions de la combustion de biomasses dans la littérature .....	10
Tableau 3. Valeurs limites d'émissions de particules d'appareils utilisant comme combustible du bois (MDDEP, 2011) .....	17
Tableau 4. Valeurs limites d'émissions de particules d'appareils utilisant d'autres combustibles que du bois (MDDEP, 2011).....	17
Tableau 5. Calendrier des essais préliminaires - émissions gazeuses .....	33
Tableau 6. Calendrier des essais finaux – émissions gazeuses et particulaires.....	34
Tableau 7. « Analyse immédiate» des biomasses .....	36
Tableau 8. Composition des biomasses en éléments oxydés (en % b.h.).....	37
Tableau 9. « Analyse ultime» des biomasses .....	38
Tableau 10. Résultats des essais préliminaires - Concentrations en CO (ppm <sub>v</sub> ).....	39
Tableau 11. Résultats des essais préliminaires dans les conditions optimales.....	39
Tableau 12. Résultats des essais finaux pour la combustion du bois .....	41
Tableau 13. Résultats des essais finaux pour la combustion de la FSLP .....	41
Tableau 14. Résultats des essais finaux pour la combustion du panic érigé .....	42
Tableau 15. Résultats des essais finaux pour la combustion du saule.....	42
Tableau 16. Résultats des tests aux effets fixes pour les gaz et l'opacité .....	44
Tableau 17. CH <sub>4</sub> : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance.....	46
Tableau 18. CO : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance .....	48
Tableau 19. CO <sub>2</sub> : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance.....	49
Tableau 20. HCl : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance .....	50
Tableau 21. NH <sub>3</sub> : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance .....	50
Tableau 22. N <sub>2</sub> O : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance .....	51
Tableau 23. NO <sub>2</sub> : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance .....	52
Tableau 24. SO <sub>2</sub> : Comparaison des émissions (g kg <sup>-1</sup> ) à chaque puissance .....	53
Tableau 25. Comparaison des émissions de particules (mg m <sup>-3</sup> ) .....	55
Tableau 26. Comparaison de l'opacité (%) de la fumée à chaque puissance.....	55
Tableau 27. Comparaison de la concentration d'O <sub>2</sub> (%) à chaque puissance .....	56
Tableau B1. Protocole d'une journée de combustion.....	75
Tableau E1. Calcul des valeurs extrêmes lors des essais préliminaires .....	83
Tableau F1. Données brutes du 7 avril 2011 .....	85
Tableau F2. Données brutes du 26 avril 2011 .....	85
Tableau G1. Tableau des données pour l'analyse statistique (en g kg <sup>-1</sup> ) .....	91
Tableau G2. Nombre d'observations et écart type .....	92
Tableau G3. Informations sur le modèle .....	92
Tableau G4. Tests de comparaisons multiples - contrastes .....	93
Tableau G5 Comparaisons multiples sur les moyennes .....	93
Tableau G6 Tests sur les effets fixes .....	94
Tableau H1. Propriétés des cendres récupérées suite à la combustion des biomasses.....	97

## Liste des figures

Figure 1. Procédés de conversion thermochimique de la biomasse (Demirbas, 2009).....	9
Figure 2. Cheminée verticale à la sortie du poêle .....	26
Figure 3. Schéma du montage expérimental préliminaire en vue de dessus .....	27
Figure 4. Schéma du montage expérimental final en vue de dessus .....	27
Figure 5. Moyennes des émissions de CH <sub>4</sub> pour chaque biomasse à trois puissances.....	47
Figure 6. Moyennes des émissions de CO pour chaque biomasse à trois puissances .....	48
Figure 7. Moyennes des émissions de NO <sub>2</sub> pour chaque biomasse à trois puissances.....	52
Figure 8. Moyennes des émissions de SO <sub>2</sub> pour chaque biomasse à trois puissances .....	54
Figure 9. Moyennes de concentration d'O <sub>2</sub> pour chaque biomasse à 3 puissances .....	56
Figure A1. Montage expérimental – vue de face et de côté .....	71
Figure A2. Montage expérimental – vue de derrière (instruments d'analyse des gaz) .....	71
Figure A3. Instruments d'analyse des gaz.....	72
Figure A4. Intersection entre les 2 cheminées.....	72
Figure A5. Capteur de pression Kimo branché aux bornes de l'iris 1. ....	73
Figure A6. Biomasses.....	73
Figure C1. Fiche technique du capteur de pression (Kimo Instruments, 2011).....	77
Figure D1. Courbe de calibration de l'iris 1 (1 <sup>re</sup> calibration).....	79
Figure D2. Courbe de calibration de l'iris 1 (2 <sup>e</sup> calibration).....	79
Figure D3. Courbe de calibration de l'iris 2 (1 <sup>re</sup> calibration).....	80
Figure D4. Courbe de calibration de l'iris 2 (2 <sup>e</sup> calibration).....	80
Figure G1. Résidus du modèle .....	94

## Introduction

La baisse des réserves de pétrole associée à la hausse des prix des combustibles fossiles, la croissance de la demande énergétique mondiale, les changements climatiques et la sensibilité environnementale de la population sont des défis actuels modifiant nos économies (Lachance, 2010). Les ressources renouvelables et les nouvelles technologies vertes qui sont développées et améliorées sont un atout pour y répondre. Parmi celles-ci, la combustion de la biomasse dans des fournaies ou des chaudières s'avère être une solution efficace pour produire une énergie propre.

Il existe présentement un intérêt réel pour l'utilisation de certaines biomasses agricoles à titre de combustibles dans les chaudières à biomasse afin de remplacer les sources d'énergies fossiles. Cette avenue favorise l'utilisation d'une ressource délaissée et permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) (Réseau des ingénieurs du Québec et Éco Ressources Consultants, 2012; Demirbas, 2009). Cependant, au Québec, le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère de la loi sur la qualité de l'atmosphère (MDDEP, 2011) interdit la combustion de biomasse autre que le bois dans les appareils de combustion de moins de 3 MW. Contrairement au bois, il existe peu d'information sur les caractéristiques des effluents gazeux et particulaires provenant de la combustion de biomasses agricoles. Des connaissances à ce sujet permettraient de comparer les émissions de la combustion de ces biomasses à celles de la combustion du bois, et éventuellement, d'accepter leur combustion au même titre que le bois dans les chaudières ou fournaies de moins de 3 MW. Ainsi, cela permettrait aux agriculteurs de diversifier leurs sources de revenus en utilisant leurs terres marginales inutilisées afin de cultiver des plantes énergétiques et en valorisant des produits qui sont considérés à ce jour comme des déchets inutilisables.

Les travaux de recherche effectués spécifiquement dans le cadre de ce projet avaient comme but de caractériser et de comparer les émissions gazeuses et particulaires de la combustion de biomasses dans une unité de combustion de moins de 3 MW. Ainsi, les émissions de la combustion (dans un poêle à granules de 17,58 kW) de trois biomasses sélectionnées parmi différentes biomasses disponibles au Québec (le saule, le panic érigé

et la fraction solide de lisier de porc) devaient être comparées aux émissions d'une biomasse forestière de référence (le bois). Les concentrations de CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, HCl et H<sub>2</sub>O dans les gaz de combustion ont été analysées par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Les concentrations ont ensuite été transformées en émissions sur base sèche. Une évaluation semi quantitative des émissions de particules a été réalisée à l'aide de filtres en fibre de verre insérés dans la sonde d'échantillonnage. Une analyse statistique comparative a par la suite été réalisée à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS. Une discussion de cette analyse a été faite. Des recommandations pour des travaux futurs ont enfin été proposées. Les données recueillies permettront de répondre aux interrogations des intervenants du milieu et éventuellement, de modifier le règlement interdisant la combustion de biomasses lignocellulosiques dans les appareils d'une capacité de moins de 3 MW.

Ce projet fait partie d'un projet de plus grande envergure, réalisé à l'IRDA, ayant comme but ultime la certification des biomasses en vue d'encadrer leur utilisation comme combustibles. Une revue de littérature sur les méthodes de mesures et les normes de combustion dans plusieurs pays a été réalisée au préalable (Godbout *et al.*, 2010). Puis, conjointement aux expérimentations réalisées pour atteindre les objectifs de ce projet de maîtrise, il aura été possible de réaliser un bilan thermique, car le poêle était installé dans une chambre calorimétrique. Les pertes de chaleur provenant de la chambre, la chaleur perdue par l'isolation de la chambre et la chaleur évacuée dans les gaz de combustion ont été calculées et une comparaison des quatre biomasses a été faite. Les détails de cet aspect du projet sont traités dans le rapport réalisé par Brassard (2011). Un autre aspect de cette phase du projet était la caractérisation des odeurs issues de l'entreposage des combustibles et de la combustion. Un rapport décrivant les techniques d'échantillonnage et d'analyse des odeurs et exposant les résultats a été réalisé par El Cadhi (2011). Puis, une étude portant sur l'analyse du cycle de vie de la combustion des biomasses dont il est question dans ce projet a été réalisée par Prost (2011). Enfin, diverses solutions ont été étudiées afin de valoriser les cendres issues de la combustion des biomasses. Les cendres volantes et les cendres de grille ont été analysées en laboratoire et leur composition a fait

l'objet d'une analyse comparative avec les normes à atteindre afin de pouvoir les incorporer au ciment (Palacios *et al.*, 2011).

# 1. Revue de littérature

## 1.1 Les ressources en énergie

C'est dans le contexte de favoriser l'utilisation d'une source d'énergie plus verte que ce projet a été mis de l'avant. Les différentes sources d'énergie disponibles peuvent être séparées principalement en trois classes distinctes : les énergies fossiles, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Les scientifiques sont unanimes sur un point : les énergies renouvelables devront inévitablement devenir une source d'énergie de substitution aux énergies fossiles. «Rien n'est plus important pour l'avenir de l'humanité que la course pour remplacer le pétrole et le charbon par des énergies propres», estime Ernest Moniz, conseiller scientifique du président des États-Unis, Barack Obama (Borde, 2011). Il en rajoute en affirmant que pour que l'aventure de l'humanité puisse se poursuivre, le monde devra rapidement se baser sur des énergies renouvelables n'émettant pas ou produisant peu de gaz à effet de serre.

L'énergie fossile représentait plus de 87% de toute l'énergie consommée mondialement en 2010. Le pétrole (34%), le gaz naturel (24%) et le charbon (30%) étaient les plus utilisés (Williams *et al.*, 2011). Les réserves connues de pétrole se situaient entre 1200,7 billions et 1266 billions de barils en 2005 (Kreith et Goswami, 2007). La demande journalière, qui ne cesse d'augmenter, se situait aux alentours de 89,5 millions de barils par jour en 2011 et devrait atteindre 91 millions de barils par jour en 2012, selon *l'Agence internationale de l'énergie* (AFP, 2011). Les scientifiques s'entendent tous pour dire que la production de pétrole atteindra un sommet mais ne savent pas exactement quand. Quant à l'énergie nucléaire, dont les principales sources sont l'uranium et le thorium, elle occupait 5,3% de la consommation d'énergie dans le monde en 2010. L'augmentation de l'utilisation de l'énergie nucléaire suscite des inquiétudes quant aux déchets nucléaires et à d'autres impacts environnementaux qu'elle peut entraîner. Enfin, les énergies renouvelables, incluant la biomasse commerciale, l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, l'énergie solaire et la géothermie comptaient pour 7,8% de toute l'énergie consommée en 2010. De ces sources d'énergie, est exclue la biomasse utilisée comme source d'énergie traditionnelle dans les pays en développement (Williams *et al.*, 2011). L'utilisation des

sources d'énergie renouvelables en remplacement des énergies fossiles pour produire de l'électricité fait partie des stratégies pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et combattre les changements climatiques (Kreith et Goswami, 2007)

## 1.2 La biomasse

Il est fréquent d'entendre dire que la biomasse est une source d'énergie renouvelable et verte. Contrairement aux énergies fossiles, comme le pétrole ou le charbon, qui nécessitent des milliers d'années pour se constituer, la biomasse se renouvelle rapidement. La plante provient d'une réaction entre le CO<sub>2</sub> présent dans l'air, l'eau et l'énergie solaire (McKendry, 2001). Le premier élément composant la biomasse, le glucose, est ainsi formé et de l'oxygène (O<sub>2</sub>) est libéré. Il s'agit de la photosynthèse.

Les biomasses, qui sont des ressources renouvelables, sont définies comme étant des matières organiques d'origine biologique récente (Kreith et Goswami, 2007). Cette définition assez large exclue toutes les sources d'énergie fossile. Plus précisément, le terme général biomasse est défini comme étant la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (comprenant les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux (Amie Assouth *et al.*, 2005). Mise dans le contexte de la production énergétique, la biomasse est la matière organique de laquelle de l'énergie peut être obtenue par combustion ou fermentation.

Il existe quelques façons différentes de classifier les biomasses. Van Loo et Koppejan (2008) identifient trois principales sources de biomasses pouvant être utilisées pour la combustion : les résidus, les cultures énergétiques et les déchets du bois. Cependant, une façon simple de classer les biomasses est présentée ci-dessous. La classe de la biomasse forestière englobe tous les dérivés du bois. La classe des biomasses agricoles inclut tous les déchets et les cultures provenant des industries agricoles et alimentaires. La troisième classe regroupe tous les déchets urbains. Au Québec, seule la combustion de la biomasse forestière est acceptée dans les petites unités de combustion de moins de 3 MW (MDDEP, 2011).

### 1- La biomasse forestière :

- les résidus de coupe (par exemple, les branches, les arbres et les souches);
- les résidus de l'industrie du bois d'œuvre (par exemple, les sciures et les écorces);

### 2- La biomasse agricole :

- les résidus lignocellulosiques des récoltes (par exemple, la paille);
- les cultures lignocellulosiques dédiées (par exemple, le panic érigé et le miscanthus);
- les cultures de bois à rotation courte (par exemple, le saule à croissance rapide).
- le fumier;
- les sous-produits d'industries agroalimentaires (par exemple, les noyaux d'olives).

### 3- La biomasse urbaine :

- les déchets municipaux, commerciaux et industriels.

Les caractéristiques de la biomasse peuvent être rapportées selon leurs composés organiques, une analyse immédiate ou une analyse ultime. L'analyse organique présente le pourcentage de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et d'autres composés organiques de la biomasse. L'analyse ultime présente la composition de la biomasse en pourcentage de différents éléments (le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N) et les cendres). L'analyse immédiate présente la proportion de matière volatile, de carbone fixe et de cendres dans la biomasse. La matière volatile est la partie du combustible solide qui est perdue (y compris l'humidité) une fois que l'échantillon a été chauffé à 950°C pendant sept minutes. Le carbone fixe représente la masse restante après le relâchement des matières volatiles, excluant les cendres et l'humidité. Enfin, l'analyse élémentaire des cendres expose la composition chimique des cendres, élément par élément. Le tableau 1 présente un aperçu des analyses immédiate, ultime, élémentaire et organique du panic érigé, du saule et du bois mou relevées dans la littérature.

Tableau 1. Composition des biomasses selon la littérature (% base sèche)

	Panic érigé			Saule			Bois mou		
	min	max	Réf.	min	max	Réf.	min	max	Réf.
<b>Analyse immédiate</b>									
<b>Carbone fixe</b>	13,6	15,2	7;10	15,9	16,3	1;10	17,0	17,0	9
<b>M. volatile</b>	73,0	81,6	10;7	75,7	82,5	10;1	82,0	84,2	6;9
<b>Cendres</b>	4,6	8,97	10;2	1,0	1,71	10;2	0,3	1,0	6;9
<b>Analyse ultime</b>									
<b>C</b>	46,7	49,7	2;1	49,0	51,6	2;10	50,0	50,8	6;1
<b>H</b>	5,4	6,10	7;1	5,5	6,2	10;3	5,9	6,0	6;1
<b>O</b>	37,4	44,3	4;10	41,8	44,0	2;3	41,2	44,0	6;1
<b>N</b>	0,45	0,80	10;5	0,38	0,61	10;2	0,10	0,23	6;1
<b>S</b>	0,10	0,19	10;2	0,03	0,07	10;2	0,00	0,06	6;1
<b>Cl</b>	0,08	0,50	1;7	0,01	0,03	3;1	0,01	0,04	6;1
<b>Analyse élémentaire (cendres)</b>									
<b>SiO<sub>2</sub></b>	57,2	65,2	7;2	2,35	4,39	2;5	36,3	36,3	8
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,80	4,51	7;2	1,41	1,52	2;5	4,70	4,7	8
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,24	0,24	2	0,05	1,35	2;5	0,30	0,3	8
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,37	2,03	7;2	0,73	1,02	2;5	1,50	1,5	8
<b>CaO</b>	5,6	11,1	7;2	41,2	54,1	2;5	32,0	32,0	8
<b>MgO</b>	3,0	4,80	7;2	2,47	4,18	2;5	4,40	4,4	8
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,30	0,58	2;7	0,75	0,94	5;2	2,30	2,3	8
<b>K<sub>2</sub>O</b>	9,1	11,6	7;2	12,5	15,0	5;2	8,50	8,5	8
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,44	0,44	2	1,83	3,57	2;5	1,70	1,7	8
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	4,5	5,50	7;2	1,36	7,40	5;2	4,80	4,8	8
<b>Analyse organique</b>									
<b>Lignine</b>	5	20	9	-	-	-	27	30	9
<b>Cellulose</b>	30	50	9	-	-	-	35	40	9
<b>Hémicellulose</b>	10	40	9	-	-	-	25	30	9
<b>Pouvoir calorifique supérieur (PCS)</b>									
<b>(MJ kg<sup>-1</sup>)</b>	16,4	18,1	7;2	18,7	19,6	10;2	19,0	20,0	6;1

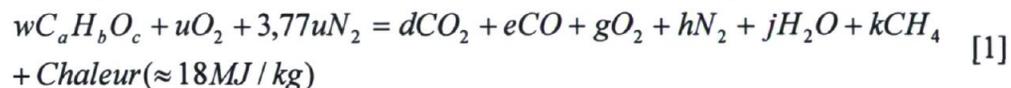
Références : (1) Vassilef *et al.*(2009) ; (2) Jenkins *et al.*(1998); (3) Obernberger *et al.*(2006); (4) Demirbas (2003); (5) Harding (2008); (6) Beauchemin et Tampier (2008); (7) Lemus *et al.*(2002); (8) ECN (2011); (9) McKendry (2001); (10) Williams *et al.*(2011).

### 1.3 La combustion de la biomasse

Le processus de combustion implique un grand nombre de réactions chimiques complexes (Van Loo et Koppejan, 2008). Il s'agit d'un processus d'oxydation du carburant dans le but de produire de la chaleur à température élevée, sans générer de carburants gazeux, liquides ou solides intermédiaires (Demirbas, 2009).

La combustion est un processus chimique qui relâche de l'énergie (sous forme de chaleur) à partir d'un mélange air-carburant. Pour que la combustion survienne, le carburant, l'oxygène et la chaleur doivent être présents simultanément et la température d'ignition doit être atteinte. La quantité d'air requise dépend des caractéristiques chimiques et physiques du carburant (Demirbas, 2009). Sous l'influence de la chaleur, les liens chimiques du carburant sont défaits. Plusieurs facteurs ont une influence directe sur la conversion thermochimique de la biomasse. Le pouvoir calorifique, la teneur en eau, l'énergie volumique, la teneur en cendres et en matière volatile, le carbone fixe, la dimension et la forme du combustible (Jeanmart et Tchouate, 2005) sont tous des facteurs influant la qualité de la combustion.

Voici l'équation chimique générale représentant la combustion du bois (CSA B415.1-10, 2010) :



où

w = moles de combustible sec par 100 moles de gaz de combustion sec;

a = fraction des atomes de carbone contenus dans le combustible;

b = fraction des atomes d'hydrogène contenus dans le combustible;

c = fraction des atomes d'oxygène contenus dans le combustible;

u = moles d'oxygène admises par 100 moles de gaz de combustion sec;

d = moles de CO<sub>2</sub> par 100 moles de gaz de combustion sec;

e = moles de CO par 100 moles de gaz de combustion sec;

g = moles de O<sub>2</sub> par 100 moles de gaz de combustion sec;

h = moles de N<sub>2</sub> par 100 moles de gaz de combustion sec;

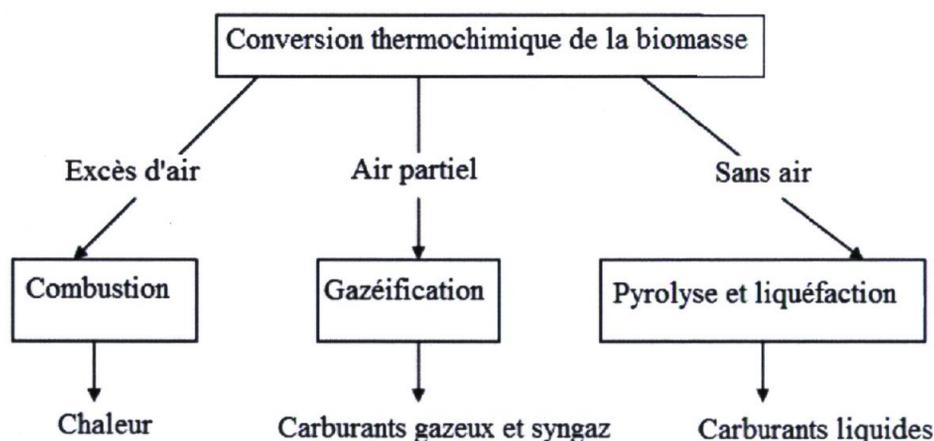
j = moles de H<sub>2</sub>O par 100 moles de gaz de combustion sec;

k = moles de CH<sub>4</sub> par 100 moles de gaz de combustion sec.

#### 1.4 L'énergie issue de la biomasse

L'énergie peut être disponible sous forme de travail ou de chaleur. Dans le cas de la combustion directe de la biomasse, c'est sous forme de chaleur que l'énergie est utilisée.

En 2003, près de 86% des 421 quadrillions de kilojoules d'énergie produite des sources primaires d'énergie provenait de la combustion (Som et Datta, 2008). Cependant, il s'agit de la combustion de combustibles fossiles en grande partie. La figure 1 présente les trois différents procédés de conversion thermochimique de la biomasse. La biomasse peut être brûlée pour produire de la chaleur et de l'électricité, elle peut être gazéifiée en méthane, en hydrogène et en monoxyde de carbone et elle peut être transformée en carburant liquide (Demirbas, 2009). La combustion s'effectue avec un ratio d'excès d'air supérieur à l'unité et produit principalement de la chaleur. La gazéification s'effectue avec un ratio d'excès d'air inférieur à l'unité et produit du biogaz. La pyrolyse et la liquéfaction sont des procédés qui ne requièrent pas d'air et produisent un combustible liquide (de la bio huile).



**Figure 1. Procédés de conversion thermochimique de la biomasse (Demirbas, 2009)**

Le type de biomasse, ses caractéristiques physiques et sa composition chimique influencent le processus complet de l'utilisation de la biomasse en tant que source d'énergie (Van Loo et Koppejan, 2008). La valeur calorifique dépend principalement de la teneur en humidité et elle décroît linéairement avec une augmentation d'humidité. De plus, la valeur calorifique décroît avec une augmentation du taux de cendres. En effet, une augmentation de 1% de la teneur en cendres diminue la valeur calorifique de 0,2 MJ/kg (Jenkins *et al.*, 1998). Le contenu en carbone, en hydrogène et en oxygène modifie

aussi la valeur calorifique de la biomasse. Plus la proportion de carbone dans la biomasse est élevée, plus la valeur calorifique sera élevée.

### 1.5 Émissions issues de la combustion de la biomasse

Les valeurs d'émission de certains gaz pour la combustion du bois, de l'avoine, du colza et du panic érigé sont présentées au tableau 2. Pour le bois, plusieurs données sont disponibles dans la littérature, et ce dans plusieurs unités de mesure. Lorsqu'il est question des autres biomasses, les données sont beaucoup plus fragmentaires.

**Tableau 2. Émissions de la combustion de biomasses dans la littérature**

Gaz	Unités	Bois <sup>1</sup>		Avoine <sup>1</sup>		Colza <sup>1</sup>	Panic érigé <sup>2</sup>	
		min	- max	min	- max	max	min	- max
CO <sub>2</sub>	%	0,6	- 14,8		-			
	mg m <sup>-3</sup>	2 400	- 110000		-			
	g kg <sup>-1</sup>	29,3	- 49,8		-			
CO	ppm	23	- 1 400		-			
	g m <sup>-3</sup>	0,094	- 27		-		0,133	- 0,914
	g kg <sup>-1</sup>	0,4	- 4,16	1,60	- 6,80	1,49		
	mg MJ <sup>1</sup>	30	- 16 400		-			
PT	mg m <sup>-3</sup>	20,7	- 950		-			36
	mg MJ <sup>1</sup>	12	- 2 200		-			
PM <sub>10</sub>	g kg <sup>-1</sup>	0,21	- 0,4	0,40	- 0,67	0,27		
NO <sub>x</sub>	mg m <sup>-3</sup>						290	326
	g kg <sup>-1</sup>	0,63	- 1,1	3,27	- 4,95	8,33		
	mg MJ <sup>1</sup>	28	- 180		-			
NO	ppm	22	- 359		-			
NO <sub>2</sub>	g kg <sup>-1</sup>	0,6	- 0,82		-			
SO <sub>x</sub>	g kg <sup>-1</sup>	0,05	- 0,3	1,59	- 2,26	7,27		
	mg m <sup>-3</sup>						22	65
HCl	g kg <sup>-1</sup>	0,005	0,02	0,31	0,42	0,16		
	mg m <sup>-3</sup>						0,8	- 29
CH <sub>4</sub>	mg m <sup>-3</sup>	2,7	- 470		-			
	mg kg <sup>-1</sup>		4120		-			

(1) Godbout *et al.*, 2010 (2) GreenPellets, 2011

### 1.5.1 Les émissions issues d'une combustion complète

Lors d'une combustion complète, les éléments du combustible (C, H, N et S) réagissent avec l'oxygène contenu dans l'air pour former plusieurs composés. Les composés décrits ci-dessous sont ceux provenant d'une combustion complète (Van Loo et Koppejan, 2008).

#### Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Le CO<sub>2</sub> est le produit le plus important de la combustion de la biomasse. Il provient de l'oxydation du carbone contenu dans le carburant. Les émissions de CO<sub>2</sub> issues de la combustion de la biomasse sont considérées neutres, ce qui signifie que la plante qui sera brûlée a absorbé autant de CO<sub>2</sub> lors de sa croissance qu'elle en émet pendant sa combustion.

#### Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Les émissions de NO<sub>x</sub> de la combustion de la biomasse proviennent de trois processus distincts (Van Loo et Koppejan, 2008). Ces gaz proviennent principalement de la conversion de l'azote du carburant en NO (>90%) puis en NO<sub>2</sub> (<10%) suivant une série de réactions chimiques. Le NO formé est subséquentement transformé en NO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les NO<sub>x</sub> peuvent aussi être formés par la conversion de l'azote présent dans les gaz post combustion sous forme de NO, en réaction avec l'oxygène et sous l'effet de la chaleur. Enfin, dans une moindre mesure lors de la combustion de la biomasse en comparaison avec la combustion de combustibles fossiles, la conversion rapide de l'azote dans l'air réagissant avec des radicaux hydrocarbonés tel le CH résulte aussi en la formation de NO<sub>x</sub>. Il y aurait une relation logarithmique entre la concentration de NO<sub>x</sub> émis et la concentration en azote dans le combustible (Van Loo et Koppejan, 2008). Le contenu en azote, responsable de la formation d'oxyde d'azote, ne devrait pas dépasser 0,6% (base sèche) (Prochnow *et al.*, 2009).

#### Protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)

Les émissions de N<sub>2</sub>O résultent de l'oxydation complète de l'azote dans le carburant (Van Loo et Koppejan, 2008). Même si les émissions de N<sub>2</sub>O sont très faibles lors de la

combustion de la biomasse, elles contribuent à l'effet de serre en raison du potentiel de réchauffement global élevé du  $N_2O$  qui est 296 fois plus grand que le  $CO_2$  (GIEC, 2001).

### **Oxydes de soufre ( $SO_x$ )**

Les oxydes de soufre sont le résultat d'une oxydation complète du soufre présent dans la biomasse (Van Loo et Koppejan, 2008). Plus de 95% se retrouve sous forme de  $SO_2$  alors que moins de 5% s'oxyde en  $SO_3$  à des températures plus basses. Obernberger *et al.* (2001) ont démontré qu'entre 57 et 65% du soufre dans la biomasse est oxydé en  $SO_x$ , le reste se retrouvant dans les cendres. Une petite fraction de soufre se transforme en sel ( $K_2SO_4$ ) ou en  $H_2S$  à des températures plus basses. Le soufre peut donc être aussi responsable de la formation de dépôts et de la corrosion des équipements.

### **Chlorure d'hydrogène (HCl)**

La combustion de biomasses herbacées, dont le contenu en chlore (jusqu'à 2%) est relativement élevé comparativement au bois (environ 0,1%), peut émettre une certaine quantité de HCl. Le chlore présent dans la biomasse ne sera pas totalement converti en HCl. En effet, une grande partie sera retenue dans les sels (KCl, NaCl) et pourra rester dans les cendres ou être émise sous forme d'aérosols, menant à des dépôts sur les parois de la fournaise et des conduits d'évacuation des gaz (Van Loo et Koppejan, 2008). Le chlore (Cl) peut aussi réagir avec les composés organiques pour former des dioxines (Williams *et al.*, 2011). Les émissions de HCl pourraient être réduites en lessivant le chlore du combustible. Par exemple, la coupe du panic érigé à l'automne et la récolte au printemps est un bon moyen pour diminuer le contenu en chlore de la biomasse par lessivage (Brodeur *et al.*, 2008).

### **Métaux lourds**

Toutes les biomasses contiennent une certaine quantité de métaux lourds (Cu, Pb, Cd, Hg, Cr, As) habituellement en très faible quantité. Ces derniers demeureront dans les cendres, seront évaporés, fixés à la surface des particules ou contenus à l'intérieur des cendres volantes. Les métaux lourds peuvent être toxiques et cancérigènes pour l'être humain lorsque présents en trop grande quantité dans l'organisme.

## Particules

Les particules peuvent provenir soit d'une combustion complète ou d'une combustion incomplète. Elles sont généralement regroupées en trois catégories (Godbout *et al.*, 2010):

- Les particules totales (PT) : particules atmosphériques d'un diamètre maximal de 100  $\mu\text{m}$ .
- Les particules grossières ( $\text{PM}_{10}$ ) : particules atmosphériques de 10  $\mu\text{m}$  et moins;
- Les particules fines ( $\text{PM}_{2,5}$ ) : particules atmosphériques de 2,5  $\mu\text{m}$  et moins

Dans la plupart des normes, c'est cette dernière classification qui est considérée. Par exemple, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande que les valeurs moyennes annuelles de particules dans l'air ne dépassent pas 10  $\mu\text{m m}^{-3}$  pour les  $\text{PM}_{2,5}$ , ce qui est deux fois moins que le seuil établi pour les  $\text{PM}_{10}$  de 20  $\mu\text{m m}^{-3}$  (Villeneuve, 2009). Le Dr. Reeves (2012) rapporte que selon plusieurs études, une hausse du taux de  $\text{PM}_{2,5}$  dans l'atmosphère entraîne une augmentation des maladies cardio-vasculaires et diminue l'espérance de vie de la population.

Van Loo et Koppejan (2008) classifient quant à eux les particules selon leur processus de formation. Les particules issues d'une combustion complètes, aussi appelées cendres volantes, sont séparées en deux groupes. D'abord, les particules d'un diamètre de plus de 1  $\mu\text{m}$ , qui résultent de cendres entraînées dans les gaz de combustion. Puis, les aérosols (particules d'un diamètre de moins de 1  $\mu\text{m}$ ), qui consistent en des composés comme les sels ( $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), résultant d'une réaction entre divers éléments (K, Na, Cl et S) relâchés pendant la combustion dans la phase gazeuse. Les aérosols peuvent causer des problèmes d'encrassement et de corrosion dans les appareils de combustion.

Diverses technologies de réduction de particules comme les filtres à manche, les filtres électrostatiques et les multi-cyclones ont été développés (Pascual *et al.*, 2012). Cependant, la mise en place de ces technologies nécessite du temps et des investissements trop élevés pour les utilisateurs de petites unités de combustion de moins de 100 kW.

### **1.5.2 Les émissions issues d'une combustion incomplète**

Le manque d'oxygène, un mélange air-carburant inadéquat dans la chambre de combustion, une température de combustion trop basse et un temps de résidence trop court sont des conditions qui peuvent résulter en une combustion incomplète. En plus des gaz de combustion complète, plusieurs composés spécifiques sont produits lors d'une combustion incomplète (Van Loo et Koppejan, 2008). Voici une brève description de ceux-ci.

#### **Monoxyde de carbone (CO)**

Le monoxyde de carbone est le deuxième plus important composé émis après le dioxyde de carbone. Le CO est normalement oxydé en CO<sub>2</sub> s'il y a assez d'oxygène de disponible dans la chambre de combustion. Le taux auquel le CO est oxydé en CO<sub>2</sub> dépend aussi de la température. Plus la température est élevée, moins la concentration en CO sera élevée. Un excès d'air trop grand refroidira la combustion et augmentera la quantité de CO émise. Le CO est donc un excellent indicateur de la qualité de la combustion. Ce gaz est problématique pour la santé humaine, principalement pour les gens atteints d'asthme, car il réduit l'absorption d'oxygène en se fixant à l'hémoglobine du sang.

#### **Méthane (CH<sub>4</sub>)**

Le méthane est un gaz à effet de serre important contribuant au réchauffement climatique dont le potentiel de réchauffement global (PRG) est de 23 (GIEC, 2001). Plusieurs processus de formation du méthane lors de la combustion de la biomasse ont été proposés (Ndiema *et al.*, 1998). Selon eux, la formation de méthane proviendrait d'une décarboxylation de l'acide acétique (CH<sub>3</sub>COOH) en CH<sub>4</sub> et en CO<sub>2</sub> ou de la décarboxylation d'acétaldéhyde (CH<sub>3</sub>CHO) en CH<sub>4</sub> et en CO. Le méthane est, comme le monoxyde de carbone, un indicateur d'une combustion incomplète résultant d'une température de combustion trop basse, d'un temps de résidence trop court ou d'un manque d'oxygène.

### **Composés organiques volatils non méthaniques (COVNM)**

Il s'agit de composés gazeux contenant du carbone à l'exception du CO<sub>2</sub>, du CO, du CH<sub>4</sub> et des HAP. Ils sont des intermédiaires dans l'oxydation des combustibles. Ils peuvent être adsorbés, se condenser et former des particules (EEA, 2009). Ils sont aussi le résultat d'une température de combustion trop basse, d'un temps de résidence trop court ou d'un manque d'oxygène.

### **Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)**

Certains HAP ont un effet cancérogène pour l'homme et peuvent être responsables du smog lorsque toutes les conditions propices sont réunies. Les émissions de HAP proviennent sensiblement du même mécanisme de formation que les COVNM (Godbout *et al.*, 2010).

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

Le plus souvent appelés dioxines et furanes, ce sont des groupes de composants très toxiques, mutagènes et liés à la suppression du système immunitaire. La formation de dioxines et furanes est influencée par plusieurs facteurs, dont le contenu en chlore du combustible et les conditions de combustion. En général, les émissions de PCDD et de PCDF provenant de la combustion de biomasses sont faibles et bien en dessous des limites d'émission causant des problèmes pour la santé.

### **Ammoniac (NH<sub>3</sub>)**

De l'ammoniac peut être émis en petite quantité en raison d'une combustion incomplète, lorsque la température est trop basse. Il se fixe aux sulfates et aux nitrates dans l'atmosphère pour former des particules fines (Godbout *et al.*, 2010). Le NH<sub>3</sub> a donc plusieurs effets négatifs. Il contribue notamment aux précipitations acides, est responsable de la corrosion des équipements et entraîne des problèmes de santé en affectant le système respiratoire.

### **Ozone troposphérique (O<sub>3</sub>)**

L'ozone se crée lorsque les NO<sub>x</sub> et les COV réagissent au soleil et à l'air stagnant. Il s'agit donc d'un polluant secondaire. Il s'agit d'un gaz à effet de serre responsable du smog et de dommages à certaines cultures. Il a aussi de graves conséquences sur la santé humaine.

### **Particules**

Les particules provenant d'une combustion incomplète sont les suies, les résidus carbonés et les hydrocarbures lourds condensés. Ce sont donc des résidus carbonés qui sont entraînés avec le flux de gaz. Tout comme les autres gaz de combustion incomplète, les particules peuvent résulter d'une température de combustion trop basse, d'un temps de résidence trop court ou d'un manque d'oxygène. Ces particules causent les mêmes problèmes que les particules issues d'une combustion complète.

#### **1.6 Cadre normatif au Québec**

En raison des pressions de toutes sortes et de la volonté à développer la filière des biomasses agricoles comme source d'énergie durable et source de revenus, différents pays ont récemment entrepris des démarches afin d'assouvir l'actuelle demande de procédures de certification des biomasses et des méthodes d'évaluation d'équipements de combustion (Godbout *et al.*, 2010). Au Québec, les émissions de combustion sont légiférées selon le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA) (c. Q-2, r. 4.1). En juin 2011, le gouvernement de Québec a mis à jour le RAA et permet maintenant l'installation d'appareils de combustion utilisant des granules produites à partir de cultures lignocellulosiques (MDDEP, 2011). Toutefois, selon le règlement, l'appareil de combustion doit être d'une puissance nominale égale ou supérieure à 3 MW et respecter les valeurs limites des critères listés au tableau 3. De plus, les valeurs limites correspondant à l'émission de particules sont encore plus strictes pour la combustion de granules lignocellulosiques que pour la combustion du bois ou des résidus de bois (tableaux 3 et 4).

**Tableau 3. Valeurs limites d'émissions de particules d'appareils utilisant comme combustible du bois (MDDEP, 2011)**

Puissance nominale (MW)	Valeurs limites (mg m <sup>-3</sup> R de gaz sec)	
	Nouvel appareil	Appareil existant
< 3	150	600
≥ 3 et < 10	150	340
≥ 10	70	100

**Tableau 4. Valeurs limites d'émissions de particules d'appareils utilisant d'autres combustibles que du bois (MDDEP, 2011)**

Puissance nominale (MW)	Valeurs limites (mg m <sup>-3</sup> R de gaz sec)	
	Nouvel appareil	Appareil existant
< 3	---	---
≥ 3	70	100

Il existe une grande divergence quant aux normes encadrant la combustion de la biomasse au Québec et dans le reste du Canada (Villeneuve, 2009). Par exemple, le Québec est la seule province canadienne où il est impossible d'utiliser des biomasses autres que le bois comme combustible dans les appareils de combustion d'une puissance nominale inférieure à 3 MW (MDDEP, 2011).

## 2. Hypothèses, but et objectifs

Le but de ce projet était de quantifier et de comparer les émissions gazeuses et particulaires issues de la combustion de biomasses agricoles et forestières. Pour ce faire, il fallait atteindre les objectifs spécifiques suivants :

- sélectionner quatre biomasses, dont une biomasse forestière servant de témoin;
- mettre en place un montage expérimental permettant la caractérisation des émissions gazeuses et particulaires issues de la combustion de biomasses dans une petite unité de combustion de moins de 3 MW;
- quantifier les concentrations ( $\text{ppm}_v$ ) de différents gaz dans l'effluent gazeux et les convertir en émissions ( $\text{g kg}^{-1}_{\text{biomasse}}$ ) sur base sèche, à température et pression normale;
- quantifier les émissions de particules issues de la combustion des quatre biomasses et mesurer l'opacité de la fumée;
- réaliser l'analyse statistique sur les éléments mesurés à l'aide du logiciel SAS afin de comparer les émissions de la combustion des biomasses agricoles sélectionnées à celles de la biomasse forestière.

Les hypothèses à vérifier étaient les suivantes:

- Les émissions de gaz provenant de la combustion de biomasses agricoles ne devraient pas être significativement différentes de celles issues de la combustion de biomasses forestières;
- il devrait y avoir des différences significatives au niveau des émissions de particules : les biomasses dont la composition en cendres est plus grande devraient émettre plus de particules.

## 3. Méthodologie

### 3.1 Choix des biomasses

La première étape de ce projet consistait en la sélection des biomasses. Le critère principal sur lequel s'est basé ce choix était la disponibilité du produit et le potentiel de développement des biomasses au Québec. C'est alors que le saule, le panic érigé et le lisier de porc ont été sélectionnés ainsi que la biomasse de référence : le bois (figure A6, annexe A). C'est sous forme de granules que ces biomasses ont été brûlées. La granule a été sélectionnée car elle est facile d'utilisation dans un poêle à alimentation automatique.

- **Le panic érigé**

La culture du panic érigé, une plante herbacée pérenne à haut rendement, suscite de plus en plus d'intérêt dans le monde agricole québécois. Le panic érigé est une graminée vivace de climat chaud et croît de façon naturelle dans les grandes plaines de l'ouest de l'Amérique du Nord (Brodeur *et al.*, 2008). Étant donné qu'il peut être cultivé dans des sols peu fertiles, son implantation n'entre pas en compétition avec des cultures alimentaires nécessitant les meilleures terres. De plus, cette culture lignocellulosique exige peu de fertilisants et est productive pendant plus de dix ans. Son pouvoir calorifique supérieur (PCS) se situant entre 16 et 18 MJ kg<sup>-1</sup> (tableau 1) est relativement bon lorsque comparé au bois (19-20 MJ kg<sup>-1</sup>). Il a été démontré que le moment de récolte a de l'influence sur la combustion de panic érigé et conséquemment sur les émissions issues de sa combustion. Le panic érigé utilisé pour ce projet fut récolté au printemps après avoir été préalablement fauché à l'automne. La granulation a été faite par VIFAM Pro-services Inc. (Kirkland, Québec). La masse volumique des granules, fournie par le fabricant, était de 468 g L<sup>-1</sup>, leur diamètre était de 6 mm et leur longueur moyenne était 12 mm. Les granules étaient cependant très friables.

- **Le saule**

La culture du saule à croissance rapide est de plus en plus populaire au Québec et est déjà implantée chez certains producteurs. En effet, l'agriculteur cultivant du saule à des fins de

valorisation énergétique se crée une source de revenu supplémentaire. Il peut utiliser ainsi ses terres marginales, ou même mettre en place des bandes riveraines stabilisant les sols et captant les nutriments qui ruissellent à la surface. Le saule est implanté par bouturage à raison de 10 000 à 20 000 plants  $\text{ha}^{-1}$  et sa récolte doit se faire aux trois ou quatre ans à l'aide d'une récolteuse spécialisée. D'ailleurs, une récolteuse de saule a été mise sur le marché par le Groupe Anderson (Chester ville, Québec). En un seul passage, avec un seul opérateur, le BioBaler coupe et densifie la biomasse sous forme de balles rondes compactes (Groupe Anderson, 2011). Le saule granulé utilisé lors des essais de combustion a été fourni par Agriculture et Agroalimentaire Canada. Le diamètre moyen des granules était de 6 mm, la longueur moyenne était de 7 mm et la masse volumique était de  $580 \text{ g L}^{-1}$ .

- **La fraction solide de lisier de porc (FSLP)**

La dernière biomasse agricole sélectionnée est le lisier de porc, un déchet d'origine agricole qui est présent en abondance au Québec. En effet, il y a près de 1395 fermes porcines au Québec, pour un total d'environ 8 millions de porcs. La grande quantité de lisier produit peut s'avérer un problème car les agriculteurs doivent respecter leur plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) et ne possèdent pas toujours suffisamment de terres pour épandre tout le lisier produit. Il serait donc intéressant de trouver une avenue de valorisation du lisier autre que la fertilisation, soit la production d'énergie. Le lisier de porc a suivi une technique de séchage développée par l'IRDA qui utilise la technologie SHOC™ (Système d'Hygiénisation par Oxydation Contrôlée) et qui permet de limiter l'utilisation d'énergie pour abaisser la teneur en eau du lisier (Léveillé *et al.*, 2011). Le produit séché a par la suite été granulé chez VIFAM Pro-services Inc. Les granules de FSLP, d'une masse volumique de  $768 \text{ g L}^{-1}$ , avaient un diamètre de 8,7 mm et une longueur moyenne de 12 mm.

- **Le bois**

Enfin, la biomasse de référence était le bois. Cette biomasse forestière est présente en abondance au Québec. La combustion du bois est déjà bien maîtrisée et est acceptée dans la réglementation. De plus, les poêles aux granules brûlant du bois sont déjà bien

implantés dans plusieurs résidences au Québec et dans certaines institutions publiques. Ce sont des granules d'un mélange d'épinette noire et de pin gris produites par Granules LG à St-Félicien (Québec) qui ont été utilisées. Les granules avaient un diamètre de 6 mm, une longueur moyenne de 21 mm et leur masse volumique était de  $641 \text{ g L}^{-1}$ .

## **3.2 Montage expérimental**

### **3.2.1 Combustion**

Le montage expérimental des essais de combustion a été réalisé dans le bâtiment DC-146 de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) situé au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD). Le local de 7 m par 14 m a été complètement nettoyé et peint afin d'accueillir le montage expérimental et d'entreposer les granules de biomasse.

Le poêle utilisé pour les tests de combustion est le modèle Enviro Omega fabriqué par Sherwood Industries Ltd. en Colombie-Britannique (Canada). Il est conçu pour brûler principalement des granules, mais aussi d'autres types de biomasse comme le maïs. L'appareil a une capacité maximale de  $17,58 \text{ kW}$  ( $60\,000 \text{ BTU heure}^{-1}$ ) et son efficacité est estimée à 80% (Enviro, 2011). Il possède un panneau de contrôle avec cinq niveaux d'ajustement (cinq puissances) permettant de contrôler le débit de granules amenées vers la chambre de combustion par la vis sans fin. De plus, l'ouverture de l'entrée d'air peut être modifiée manuellement à l'aide d'une tige sur le côté du poêle. Pour les fins de l'expérience, cette tige a été graduée à trois niveaux d'entrée d'air : 1/3, 2/3 et maximum. Lors des essais de combustion, le poêle reposait sur une balance (modèle GFK 1320a; précision :  $600 \pm 0,05 \text{ kg}$ , Adam Equipment Inc., Connecticut, États-Unis) et la masse était enregistrée à toutes les cinq minutes à l'aide du logiciel fourni par le fabricant. Afin de déterminer le taux de combustion, il suffisait d'effectuer la différence entre la masse du poêle à la fin et au début de l'essai et de diviser par la durée de l'essai. Afin de ne pas endommager la balance, le poêle était soulevé après chaque essai à l'aide de vis sans fin soudées aux quatre coins de la base du poêle. Afin d'établir le bilan thermique de la combustion, le poêle était installé dans une chambre calorimétrique de  $1,80 \text{ m} \times 1,50 \text{ m} \times 1,90 \text{ m}$  faite de tôle et isolée avec de la mousse de polyuréthane giclée d'environ 53 mm

d'épaisseur, minimisant ainsi les pertes de chaleur. La figure A1 présentée à l'annexe A montre des vues de face et de côté du montage expérimental. Un schéma en vue de dessus du montage expérimental (figure 4) montre les points où la température a été mesurée à l'aide un thermocouple de type T (OMEGA, Québec, Canada) et avec un capteur de température et d'humidité (modèle HC-S3 de Campbell Scientific, Alberta, Canada).

### 3.2.2 Instruments de mesure

L'analyse des gaz de combustion nécessitait l'installation de plusieurs instruments spécialisés (figures A2 et A3, annexe A). Leur mise en place et leur fonctionnement ont été assurés par le chimiste de l'équipe de recherche. Voici les principaux appareils utilisés lors de la caractérisation des gaz:

- *Un analyseur d'opacité (opacimètre)* (modèle EMS750, Environmental Monitor Service, Inc., Connecticut, États-Unis) a été installé afin d'évaluer l'opacité de la fumée. Tout instrument de mesure devait être localisé à une distance équivalente à plus de huit fois le diamètre en aval et à plus de deux fois le diamètre en amont des turbulences visibles dans le conduit vertical de 102 mm (4 pouces) destiné à l'évacuation des gaz de la fournaise. L'emplacement de l'installation (816 mm en aval du coude à la sortie du poêle et 3327 mm en amont de la cheminée horizontale) respecte les conditions (figure 2). À cet endroit, deux tuyaux ont été fixés sur des orifices pratiqués dans le conduit afin de pouvoir installer, à une distance de 612 mm (24 po) l'un en face de l'autre, la source et le détecteur de l'opacimètre. Le principe de cet analyseur repose sur ces deux éléments qui doivent se faire face. La source lumineuse (LED) émet une lumière modulée en fréquence qui traverse un miroir. Celui-ci divise le rayon en 2 parties : la première est envoyée sur un détecteur permettant de mesurer l'intensité du signal émis. L'autre traverse la cheminée, est renvoyée par le réflecteur, traverse de nouveau la cheminée, puis est dirigée vers un second détecteur qui mesure la puissance du signal après absorption. L'opacité donne une idée de la charge particulaire de l'effluent gazeux. Cependant, elle n'est pas directement reliée aux émissions de particules. Par exemple, une particule qui aura un diamètre deux fois plus grand qu'une autre bloquera 4 fois plus

de lumière et sa masse sera environ huit fois plus élevée, en prenant en compte une masse volumique identique. Il faut donc faire preuve de prudence en associant l'opacité aux émissions de particules puisque la grosseur des particules peut varier d'une situation à l'autre.

- *Un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)* (modèle FTLA2000 de ABB Bomem, Canada) permettait l'analyse qualitative et quantitative de neuf principaux gaz ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{SO}_2$ ). Le principe du FTIR est basé sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le gaz analysé. Le spectromètre envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde auxquelles le matériau absorbe et quantifie cette absorption. Chaque longueur d'onde traitée par l'ordinateur correspond à un gaz et l'intensité de l'absorption à la longueur d'onde caractéristique est reliée à la concentration de la substance responsable de l'absorption. Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et une diminution de l'intensité réfléchie ou transmise sera enregistrée. Le domaine infrarouge entre  $4000 \text{ cm}^{-1}$  et  $400 \text{ cm}^{-1}$  (ou entre 2,5 et 25  $\mu\text{m}$ ) correspond au domaine utilisé (Smith, 2011). Le FTIR utilisé était installé sur une table en arrière de la cheminée (figures A2 et A3, annexe A). La sonde d'échantillonnage était insérée dans la cheminée à une distance de 152 mm (6 po) au dessus de l'opacimètre (figure 2), ce qui respecte les mêmes conditions qu'énumérées précédemment. L'échantillon était aspiré à un débit constant d'un litre par minute avec une pompe à diaphragme dans un tube en téflon chauffé puis refoulé par un tube en acier inoxydable chauffé dans la cellule 4Runner de CIC Photonics. À toutes les 5 minutes, une valve placée sur la ligne de prélèvement s'ouvrait pendant 30 secondes pour permettre à un échantillon de gaz de remplir la cellule de l'instrument maintenue sous vide. L'échantillon était immobilisé pendant 2,5 minutes pour permettre au logiciel IRGAS 100 de CIC Photonics (Nebraska, États-Unis) de faire l'acquisition et la quantification des spectres aux 18 secondes environ. Ensuite, la cellule était remise en ligne avec la pompe à vide jusqu'à l'aspiration de l'échantillon suivant.

- *Un analyseur d'O<sub>2</sub>*, (modèle LC CEM, Ametek/Thermox , Pennsylvanie, États-Unis) muni d'une cellule à l'oxyde de zirconium a été installé pour mesurer la concentration en oxygène en continu (figure A3, annexe A). Les cellules qui sont chauffées à 800°C sont sensibles spécifiquement à l'O<sub>2</sub>. La sonde contient un élément de détection constitué d'une cellule au zirconium tubulaire, dotée d'électrodes internes et externes en son centre. L'électrode extérieure est exposée au débit du gaz à analyser entrant par l'extrémité ouverte de la cellule et l'électrode intérieure est exposée à l'air et ainsi à une pression partielle d'oxygène constante. Le zirconium étant un électrolyte qui ne conduit pas les ions oxygène à des températures supérieures à 600 °C, une différence de pressions partielles d'oxygène exercées sur la cellule est détectée.
- *Une station de contrôle et d'acquisition des données (CR-10)* était nécessaire pour transférer et enregistrer les données récupérées par le spectromètre et pour contrôler la valve d'admission de l'échantillon dans la cellule (figure A3, annexe A). Le CR-10 transmettait alors les données à un ordinateur en temps réel. L'ordinateur était muni d'un logiciel qui classait les résultats des concentrations de chaque gaz en ppm<sub>v</sub> dans un fichier Excel.
- *Des filtres en fibre de verre* permettant d'échantillonner les particules ont été insérés dans deux portes filtres en aluminium installés à l'entrée de la sonde de prélèvement des gaz (figure 2). Les évaluations semi quantitatives des concentrations de particules ont été ainsi réalisées en pesant les filtres avant et après les essais de combustion. Les débits de prélèvement ont été mesurés à la pointe de la sonde et étaient d'environ 1 litre minute<sup>-1</sup>. Selon la norme CSA B415.1-10 (CSA, 2010), la mesure des particules doit se faire avec un analyseur de particules et un montage particulier doit être mis en place pour diluer la fumée avant la mesure. Cependant, le matériel est dispendieux et la méthodologie est difficile à respecter. Elle demande par exemple de prélever les échantillons de gaz de façon isocinétique, ce qui suppose que le débit exact à l'endroit de prélèvement est connu. Les conditions n'étant pas remplies, l'évaluation semi-quantitative de la concentration de particules était suffisante dans le cadre de ce projet. Même si les émissions de particules recueillies ne pourraient être retenues pour

valider les émissions par rapport aux normes, l'analyse des particules sur filtre est suffisante pour réaliser l'analyse comparative.

### 3.2.3 Méthode de calcul des émissions

#### Conversion des concentrations de gaz en émissions

Il était important de transformer les données brutes de concentrations ( $\text{ppm}_v$ ) récupérées par le CR-10 en émissions ( $\text{g kg}^{-1}_{\text{biomasse}}$ ) afin de comparer les biomasses entre elles. L'équation 2 (Environnement Canada, 2009) a été utilisée pour calculer les émissions de gaz, connaissant le débit des gaz de combustion et le taux de combustion de la biomasse. Un exemple de calculs pour les émissions du bois à la puissance 5 est présenté à l'annexe F.

$$\text{Émissions} = \frac{\frac{C_i}{1\,000\,000} \times \rho_{\text{air}} \times Q_{\text{sec,TPN}} \times \left( \frac{MM_i}{MM_{\text{air}}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \times 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right)}{T.C.} \quad [2]$$

où

$C_i$  = concentration de la substance  $i$  dans les gaz de combustion ( $\text{ppm}_v$ );

$\rho_{\text{air}}$  = masse volumique de l'air =  $1,29 \text{ kg m}^{-3}$ ;

$Q_{\text{sec, TPN}}$  = débit des gaz de combustion ( $\text{m}^3 \text{ minute}^{-1}$ );

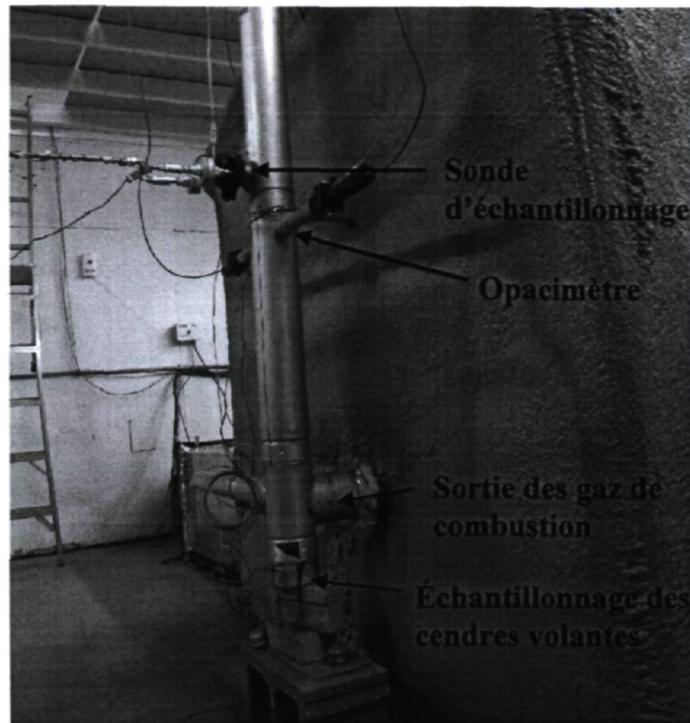
$MM_i$  = masse molaire de la substance  $i$  ( $\text{g mol}^{-1}$ );

$MM_{\text{air}}$  = masse molaire de l'air =  $29,95 \text{ g mol}^{-1}$  (Environnement Canada, 2009);

T.C. = Taux de combustion ( $\text{kg}_{\text{biomasse}} \text{ h}^{-1}$ ).

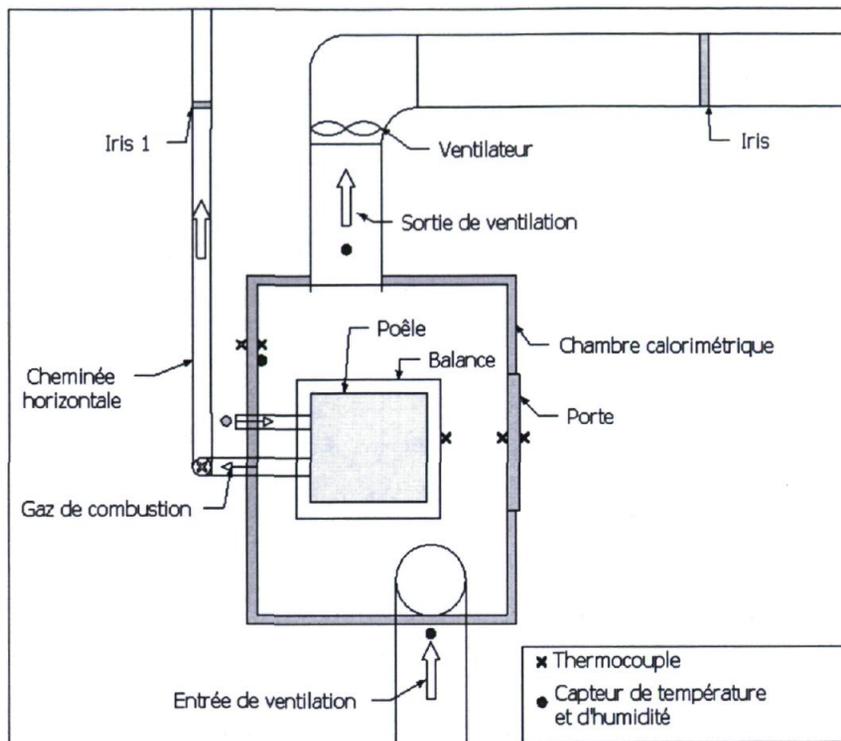
#### Calcul du débit des gaz de combustion

Afin de calculer les émissions, le débit des gaz évacués par la cheminée devait être connu. L'instrument utilisé pour déterminer les débits est l'iris. Il s'agit d'une plaque à orifice insérée dans le conduit, créant une différence de pression qui est mesurée à ses bornes (figure A5, annexe A). Cette différence de pression est obtenue sous forme de signal électrique (en mV) par un capteur de pression de marque Kimo® (modèle CP-50, annexe C) (Kimo Instruments, 2011) branché en aval et en amont de l'iris et relié à la station d'acquisition de données. Les données étaient enregistrées à toutes les 10 minutes.

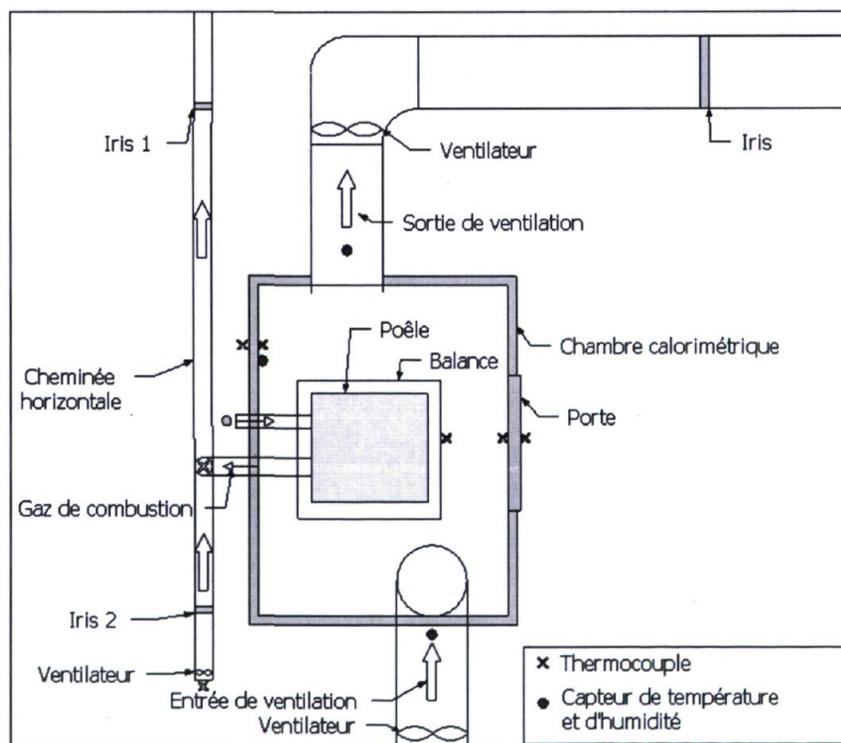


**Figure 2. Cheminée verticale à la sortie du poêle**

Lors des essais préliminaires, le débit de la fumée pouvait être mesuré directement à l'iris 1 (figure 3). Cependant, le montage expérimental a été légèrement modifié après les essais préliminaires en vue des essais finaux (figures 4). Lors des essais préliminaires, la fumée provenant de la cheminée verticale était évacuée directement par la cheminée horizontale (figures 3 et A4, annexe A). En raison d'une distance trop grande à parcourir et d'une restriction créée par l'iris installé dans la cheminée horizontale, la fumée s'évacuait difficilement et des retours de fumée avaient lieu, principalement à l'allumage. Pour régler ce problème, une section de cheminée horizontale a été ajoutée en amont de la précédente et un ventilateur a été installé à l'entrée de cette cheminée horizontale de 152 mm de diamètre (6 po), procurant un débit d'air frais en provenance du grenier (figure 4) variant entre 1,27 et 1,58 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. Alors, un mélange d'air frais et de fumée était évacué. Le débit d'air frais était mesuré par un iris installé dans la cheminée horizontale en amont de la cheminée verticale et un iris installé en aval servait à mesurer le débit du mélange de la fumée et de l'air frais. Le débit de la fumée a donc été trouvé indirectement en calculant la différence entre ces deux débits.



**Figure 3. Schéma du montage expérimental préliminaire en vue de dessus**



**Figure 4. Schéma du montage expérimental final en vue de dessus**

L'orifice nécessite une courbe de calibration permettant d'associer chaque signal électrique à une vitesse, et du même coup, à un débit. L'iris 1 (servant à mesurer le débit du mélange de fumée et d'air de dilution) et l'iris 2 (servant à mesurer le débit d'air de dilution provenant du grenier) ont été conçus et calibrés sur place. Pour ce faire, un ventilateur était placé à l'extrémité d'un tuyau de la même grosseur que l'iris. Celui-ci était situé à une distance d'au moins quatre fois le diamètre en aval de l'iris, puis le rotamètre, à une distance d'au moins deux fois le diamètre du tuyau après l'iris. Deux calibrations (cal. 1 et cal. 2) ont été réalisées et la moyenne arithmétique des deux a été retenue pour déterminer la vitesse. Les figures D2 à D5 (Annexe D) présentent les courbes de calibration pour ces deux iris. Les équations 3 à 6 sont les équations de calibration permettant de déterminer la vitesse dans la cheminée ( $V_{\text{iris}}$ ) (pieds minute<sup>-1</sup>) en fonction de la tension ( $T_{\text{CR10}}$ ) en millivolts.

$$V_{\text{iris.1, cal.1}} = 460,61 \times \ln(T_{\text{CR10}}) - 2\,628,0 \quad [3]$$

$$V_{\text{iris.1, cal.2}} = 497,04 \times \ln(T_{\text{CR10}}) - 3\,030,1 \quad [4]$$

$$V_{\text{iris.2, cal.1}} = 256,27 \times \ln(T_{\text{CR10}}) - 1\,585,5 \quad [5]$$

$$V_{\text{iris.2, cal.2}} = 271,77 \times \ln(T_{\text{CR10}}) - 1\,725,5 \quad [6]$$

Le débit de calibration a alors été calculé en multipliant la vitesse des gaz par la section de la cheminée à l'aide de l'équation 7 :

$$Q_{\text{cal}} = V \times A \times 0,028317 \frac{\text{m}^3}{\text{pieds}^3} = V \times (\pi \times r_{\text{chem}}^2) \times 0,028317 \frac{\text{m}^3}{\text{pieds}^3} \quad [7]$$

où

$Q_{\text{cal}}$  = débit des gaz selon les conditions de calibration (m<sup>3</sup> minute<sup>-1</sup>);

$V$  = vitesse des gaz dans la cheminée calculée à l'aide des équations 3 à 6 (pieds min<sup>-1</sup>);

$r_{\text{chem}}$  = rayon de la cheminée = 0,25 pied.

La calibration a été effectuée avec l'air à une température de 15 °C. Étant donné que l'orifice devait être utilisé dans d'autres conditions (à une température plus élevée), une

correction pour la température devait être utilisée. L'équation 8 a été utilisée pour calculer le débit réel ( $Q_{réel}$ ) dans les conditions expérimentales à partir des débits trouvés à l'aide des courbes de calibration ( $Q_{cal}$ ) (Cloutier et Lazure, 2003).

$$Q_{réel} = Q_{cal} \times \sqrt{(T_{réelle}/T_{cal})} \quad [8]$$

où

$Q_{réel}$  = débit réel dans les conditions expérimentales ( $m^3 \text{ minute}^{-1}$ );

$T_{réelle}$  = température à l'iris lors de la combustion (K);

$T_{cal}$  = température lors de la calibration = 288 K.

Le débit réel à l'iris 2 a été déterminé à l'aide de la température réelle à l'iris 2 qui a été mesurée à l'aide d'un thermocouple de type T. Pour le débit réel à l'iris 1, la température à cet endroit n'a pas été mesurée directement. Elle a été estimée à l'aide de la température des gaz de combustion mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K au niveau de la sonde d'échantillonnage et de la température de l'air de dilution (température à l'iris 2) selon l'équation 9 :

$$T_{réelle,iris.1} = \frac{T_{gaz} \times Q_{cal,gaz}}{Q_{cal,iris.1}} + \frac{T_{irsi2} \times Q_{cal,iris.2}}{Q_{cal,iris.1}} \quad [9]$$

où

$T_{réelle,iris1}$  = approximation de la température réelle à l'iris 1 ( $^{\circ}C$ );

$T_{gaz}$  = température des gaz de combustion à la sonde d'échantillonnage ( $^{\circ}C$ );

$Q_{cal,iris2}$  = débit à l'iris 2 selon les conditions de calibration ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ );

$Q_{cal,iris1}$  = débit à l'iris 1 selon les conditions de calibration ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ );

$Q_{cal,gaz}$  = débit des gaz selon les conditions de calibration ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ ) =  $Q_{cal,iris1} - Q_{cal,iris2}$ .

Connaissant le débit réel aux deux iris, il fallait convertir chacun de ces débits à la température et à la pression normale (TPN) (273,15 K et 1 atm.) sur base sèche selon l'équation 11 (Environnement Canada, 2009). La fraction de vapeur d'eau à l'iris 2 a été obtenue à partir du taux d'humidité relative relevé par le capteur de température et

d'humidité de l'air ambiant. La fraction de vapeur d'eau à l'iris 1 n'ayant pas été mesurée directement, elle a été estimée selon l'équation 10 :

$$FV_{H_2O, iris.1} = \frac{FV_{H_2O, gaz} \times Q_{cal,gaz}}{Q_{cal,iris.1}} + \frac{FV_{H_2O, iris.2} \times Q_{cal,iris.2}}{Q_{cal,iris.1}} \quad [10]$$

où

$FV_{H_2O, iris.1}$  = fraction de vapeur d'eau à l'iris 1;

$FV_{H_2O, iris.2}$  = fraction de vapeur d'eau à l'iris 2;

$FV_{H_2O, gaz}$  = fraction de vapeur d'eau dans les gaz de combustion =  $C_{H_2O} / 1\,000\,000$ .

$$Q_{iris (sec,TPN)} = Q_{réel} \frac{273,15}{(273,15 + T_{réelle})} \times \frac{P_{réelle}}{1atm} \times (1 - FV_{H_2O}) \quad [11]$$

Où

$Q_{iris (sec, TPN)}$  = débit à l'iris à TPN et sur base sèche ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ );

$P_{réelle}$  = pression réelle à l'iris (estimées à 1 atm);

$FV_{H_2O}$  = fraction de vapeur d'eau à l'iris.

Une fois les débits à l'iris 1 et à l'iris 2 calculés, le débit des gaz à la sortie du poêle a été obtenu à l'aide de l'équation 12 :

$$Q_{gaz} = Q_{iris.1 (sec,TPN)} - Q_{iris.2 (sec,TPN)} \quad [12]$$

où

$Q_{gaz}$  = débit des gaz de combustion à la sortie du poêle ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ );

$Q_{iris.1 (sec,TPN)}$  = débit à l'iris 1 à TPN et sur base sèche ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ );

$Q_{iris.2 (sec,TPN)}$  = débit à l'iris 2 à TPN et sur base sèche ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ ).

### Émissions de particules

Deux filtres en fibre de verre étaient insérés dans des portes-filtres en aluminium installés à l'entrée de la sonde d'échantillonnage (figure 2). L'échantillon était prélevé à un débit

de 1 litre minute<sup>-1</sup> et les filtres étaient pesés au début et à la fin de la journée de combustion. Il était ainsi possible de calculer les émissions de particules moyennes pour la journée en mg m<sup>-3</sup>. Il s'agit cependant d'une évaluation semi-quantitative car l'échantillonnage n'était pas fait de façon isocinétique (c'est-à-dire à la même vitesse que l'effluent gazeux).

### **3.3 Analyse des granules et des cendres**

Un échantillon de granules pour chaque biomasse a été analysé. Puis, avant chaque journée de combustion, les cendres de la journée de combustion précédente étaient prélevées. Pour ce faire, le poêle était d'abord nettoyé pour prélever toutes les cendres de grille qui étaient pesées et un échantillon était conservé à des fins d'analyse. Ensuite, la cheminée était ramonée et les cendres volantes étaient prélevées à la base de la cheminée (figure 2). L'échantillon était pesé et conservé pour l'analyse. Ainsi, un échantillon pour chaque type de cendres a été prélevé à chaque journée de combustion.

L'analyse des granules et des cendres a été faite en laboratoire. La spectrométrie de fluorescence X (XRF) a été réalisée dans les laboratoires du Ministère des transports du Québec (MTQ) pour l'analyse des oxydes de différents éléments. Les autres analyses ont été réalisées dans les laboratoires de l'IRDA. Les compositions ultimes en carbone et en azote ont été déterminées par combustion à l'aide de la méthode gravimétrique (méthode IRDA-341). La méthode IRDA AS-308 a été utilisée pour déterminer la composition de l'échantillon en chlore (Cl). La méthode consiste en la détermination des ions chlorures extraits à l'eau avec dosage par titrimétrie au nitrate d'argent. Pour l'analyse immédiate, la méthode E711-87 (ASTM, 2004) de la bombe calorimétrique a servi à évaluer la capacité calorifique des biomasses. Enfin, la méthode C311-11 (ASTM, 2011) a été utilisée pour déterminer la teneur en cendres à 1100°C et à 750 °C ainsi que la teneur en matière sèche à l'étuve à 98°C.

### 3.4 Plan expérimental

#### 3.4.1 Essais préliminaires

Les essais préliminaires avaient comme objectifs de se familiariser avec le fonctionnement du poêle, de tester le montage expérimental dans les différentes conditions de combustion et de déterminer les paramètres afin d'obtenir une combustion optimale pour chaque biomasse. Ainsi, les concentrations (en ppm<sub>v</sub>) de CO, de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub>, de SO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> ont été mesurées à l'aide du FTIR lors de la combustion des quatre biomasses. Chaque biomasse a été testée à trois puissances (2, 3 et 5). La décision de tester l'unité de combustion à trois différentes puissances s'est basée sur la norme ASTM E 2779-10 (2010) qui suggère de prendre la moyenne de trois puissances lors de l'échantillonnage des particules. La plupart des études prennent en compte seulement l'utilisation de la puissance nominale. Cependant, en condition réelle, le poêle ne fonctionnera pas uniquement à cette puissance nominale car les besoins en énergie sont variables (Verma *et al.*, 2010). L'objectif était de définir quel était l'ajustement idéal, c'est-à-dire le taux d'entrée d'air pour lequel la concentration de CO moyenne dans l'effluent gazeux était la plus faible, à chaque puissance. Ainsi, trois différents débits d'air (ajustement de l'ouverture à 1/3, 2/3 et au maximum) ont été testés. Pour chaque combinaison biomasse / puissance / entrée d'air, la combustion se déroulait pendant deux heures. La première heure était réservée à la stabilisation de la combustion alors que les données de la deuxième heure étaient conservées pour l'analyse. Les essais préliminaires pour chaque biomasse se sont donc déroulés sur deux jours consécutifs (tableau 5). L'ordre dans lequel les biomasses ont été testées a été attribué aléatoirement. Cela représente au total huit journées d'expérimentations préliminaires. La méthodologie est basée sur les normes ASTM E2779-10 (ASTM, 2010) et CSA B415.1-10 (CSA, 2010).

**Tableau 5. Calendrier des essais préliminaires - émissions gazeuses**

Jour	Date (2011)	Biomasse
1	3 mars	FSLP
2	9 mars	FSLP
3	10 mars	Saule
4	15 mars	Saule
5	16 mars	Panic érigé
6	21 mars	Panic érigé
7	22 mars	Bois
8	23 mars	Bois

### 3.4.2 Essais finaux

Après les tests préliminaires, les essais de combustion avec analyse complète des émissions gazeuses et particulaires ont eu lieu. Une analyse statistique des émissions de gaz ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) et de particules ainsi que de l'opacité et du taux d'oxygène ( $\text{O}_2$ ) a été réalisée à l'aide de la procédure MIXED de SAS.

La combustion des quatre biomasses a été réalisée à trois puissances. Pour chaque biomasse, deux ou trois journées de combustion ont été réalisées. Durant une journée, un seul type de biomasse a été brûlé à trois puissances et l'entrée d'air a été ajustée pour chaque puissance selon les résultats des essais préliminaires. Le calendrier des opérations est présenté au tableau 6 et l'horaire détaillé d'une journée type de combustion se retrouve au tableau B1 de l'annexe B.

**Tableau 6. Calendrier des essais finaux – émissions gazeuses et particulaires**

Date (2011)	Biomasse	Combinaisons Puissance/Entrée d'air <sup>1</sup>
30 mars	Bois	5/2 – 3/3 – 2/1
4 avril	Panic	5/2 – 3/3 – 2/2
5 avril	FSLP	5/1 – 3/1 – 2/1
6 avril	Saule	5/1 – 3/2 – 2/3
7 avril	Bois	5/2 – 3/3 – 2/1
11 avril	Saule	5/1 – 3/2 – 2/3
12 avril	Panic	5/2 – 3/3 – 2/2
13 avril	Saule	5/1 – 5/2 – 5/3
14 avril	FSLP	5/1 – 3/1 – 2/1
26 avril	Bois	5/2 – 3/3 – 2/1
27 avril	FSLP	5/1 – 3/1 – 2/1
28 avril	Panic	5/2 – 3/3 – 2/2

(1) Entrée d'air maximale : 1; Entrée d'air 2/3 : 2; Entrée d'air 1/3 : 3

### 3.5 Modèle d'analyse statistique

Pour l'analyse statistique, les mesures des émissions lors de la combustion d'une même biomasse à trois puissances lors d'une journée ont été considérées comme des mesures répétées. La structure des corrélations entre les trois mesures (trois puissances) devait être modélisée. Le but de l'analyse statistique était de comparer les émissions de gaz issues de la combustion de quatre types de biomasse à trois puissances différentes.

Un modèle linéaire mixte normal a été ajusté aux émissions des gaz avec la procédure MIXED de SAS (Littell *et al.*, 2006) :

$$y_{ijk} = \mu + \beta_i + \gamma_j + (\beta\gamma)_{ij} + e_{ijk} \quad [13]$$

où

$y_{ijk}$  = émission de gaz ( $\text{g kg}^{-1}$ ) lors de la combustion de la biomasse  $i$  à la puissance  $j$  pour la répétition  $k$ ;

$\mu$  = paramètre de référence;

$\beta_i$  = effet fixe de la biomasse  $i$ ;

$\gamma_j$  = effet fixe de la puissance  $j$ ;

$(\beta\gamma)_{ij}$  = interaction entre la biomasse et la puissance;

$e_{ijk}$  = erreur résiduelle.

Il a été supposé que les erreurs  $e_{ijk}$  obéissent à une loi normale de moyenne 0 et de variance  $\sigma^2$ . Pour certaines variables, la variance n'était pas homogène et variait en fonction de la biomasse. Le cas échéant, une variance différente pour chaque biomasse a été ajustée avec l'option «GROUP=Biomasse» de l'énoncé «REPEATED». Les degrés de liberté ont été calculés par l'approximation de Kenward-Roger. Une structure de corrélation a également été introduite dans le modèle afin de tenir compte des corrélations entre les mesures d'émissions produites à trois puissances pour une même biomasse avec l'option type=UN (non structurée), CS (symétrie composée) ou VC (décomposition de la variance) de l'énoncé «REPEATED» (Littell *et al.*, 2006).

Les tests de Fisher (tests de F) ont été effectués pour les effets fixes de la biomasse, de la puissance et de l'interaction entre ces deux facteurs. Les moyennes ajustées au modèle «LSMEANS» ont été calculées pour chaque biomasse selon la puissance. Dans les cas où l'interaction était significative, il fallait explorer les moyennes «LSMEANS» de l'effet biomasse x puissance et faire les comparaisons (contrastes) entre les biomasses en fixant la puissance. Lorsque l'interaction n'était pas significative et que l'effet principal de la biomasse était significatif, il était possible de comparer les moyennes de l'effet principal des biomasses. Afin de comparer les moyennes des émissions, les tests de comparaison (contrastes) ont été effectués à l'aide de l'énoncé «ESTIMATE». Toutes les biomasses étaient alors comparées deux à deux à chaque puissance. Lorsque  $Pr < 0,05$ , il y a une différence significative entre les émissions des deux biomasses. Le même test a été fait pour évaluer les différences significatives entre les moyennes globales d'émissions de chaque biomasse. Ces résultats sont donnés par la procédure mixed de SAS dans le tableau «DIFFERENCES OF LEAST SQUARES MEANS» (tableau G5, annexe G).

## 4. Résultats et discussion

### 4.1 Analyse des granules

Le tableau 7 (analyse immédiate), le tableau 8 (analyse des éléments oxydés) et le tableau 9 (analyse ultime) présentent les résultats des analyses de granules qui ont été réalisées en laboratoire.

D'abord, l'analyse immédiate des combustibles (tableau 7) démontre que la teneur en matière sèche des quatre biomasses est semblable, se situant entre 92,0 et 94,5 %. Puis, il existe une relation inverse entre la teneur en matière volatile et la teneur en cendre. En effet, selon les résultats obtenus, plus la teneur en cendres est élevée, plus la teneur en matière volatile est faible. La FSLP a une teneur en cendres très élevée par rapport aux autres biomasses (8,8% comparativement à 0,36% pour le bois à 1100°C). La densité des granules de FSLP est relativement élevée comparativement aux autres biomasses, ce qui peut créer des problèmes à l'allumage. Enfin, le pouvoir calorifique supérieur (PCS) de la FSLP est faible à 15,6 MJ kg<sup>-1</sup> lorsque comparé au PCS des trois autres biomasses.

**Tableau 7. « Analyse immédiate » des biomasses**

	Unités	Bois	FSLP	Panic	Saule
<b>Matière Sèche</b>	%	94,50	92,00	92,80	92,40
<b>Matière volatile</b>	%	99,64	91,20	96,01	96,30
<b>Cendres (1100°C)</b>	%	0,36	8,80	3,99	3,70
<b>Cendres (750°C)</b>	%	0,54	8,80	3,65	2,76
<b>Densité</b>	g cm <sup>-3</sup>	1,10	1,26	0,94	1,03
<b>PCS</b>	MJ kg <sup>-1</sup>	17,9	15,6	18,7	18,0

Au tableau 8, l'analyse des éléments oxydés, représentant le pourcentage de chaque élément oxydé sur la masse totale de l'échantillon, montre quelques résultats intéressants. En effet, il faut noter que le bois est la biomasse qui contient la plus faible proportion de presque tous les éléments, ce qui est normal car sa teneur en cendres est la plus faible. La présence du SO<sub>3</sub> provenant de l'analyse par rayons X est la seule indication pour évaluer la présence de soufre dans le combustible, la composition en soufre de l'analyse ultime n'ayant pas pu être réalisée en laboratoire. En se référant à la teneur en SO<sub>3</sub>, il est

possible d'en déduire que la teneur en soufre de la FSLP est beaucoup plus élevée que pour les trois autres biomasses alors que la teneur en soufre du bois est la plus faible.

**Tableau 8. Composition des biomasses en éléments oxydés (en % b.h.)**

<b>Élément</b>	<b>Bois</b>	<b>FSLP</b>	<b>Panic</b>	<b>Saule</b>
Na <sub>2</sub> O	0,0105	0,3435	0,0335	0,0340
MgO	0,0276	0,6984	0,1529	0,1587
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0137	0,1800	0,1683	0,1529
SiO <sub>2</sub>	0,0407	0,9860	2,4048	0,7159
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0065	1,4642	0,1570	0,2154
SO <sub>3</sub>	0,0083	0,8335	0,0895	0,1446
K <sub>2</sub> O	0,0471	1,3211	0,2286	0,5884
CaO	0,1532	1,9453	0,6242	1,3675
TiO <sub>2</sub>	0,0004	0,0094	0,0093	0,0055
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0055	0,5205	0,0618	0,0528
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0000	0,0009	0,0001	0,0001
CrO <sub>3</sub>	0,0002	0,0033	0,0010	0,0009
MnO	0,0151	0,0251	0,0097	0,0132
CoO	0,0000	0,0002	0,0001	0,0000
NiO	0,0000	0,0009	0,0002	0,0001
CuO	0,0001	0,0217	0,0006	0,0010
ZnO	0,0015	0,0386	0,0036	0,0269
SrO	0,0005	0,0043	0,0018	0,0037
ZrO <sub>2</sub>	0,0000	0,0010	0,0003	0,0007
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000
BaO	0,0013	0,0007	0,0021	0,0041
PbO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

L'analyse ultime (tableau 9) est incomplète car en plus des teneurs en chlore (Cl), en carbone (C) et en azote (N), elle devrait inclure les teneurs en hydrogène (H), en oxygène (O) et en soufre (S) de la biomasse. Le matériel disponible en laboratoire était insuffisant et il aurait été trop dispendieux de se procurer les instruments à cette étape-ci de l'étude. Il en ressort de cette analyse que les teneurs en chlore et en azote de la FSLP sont très importantes, ce qui peut se répercuter sur les émissions. De plus, la teneur en carbone relativement basse de ce combustible est reliée à son faible pouvoir calorifique.

**Tableau 9. « Analyse ultime » des biomasses**

Élément	Unités	Bois	FSLP	Panic	Saule
Cl	mg kg <sup>-1</sup>	13,8	3 053	129,0	34,4
C	%	47,1	40,5	43,5	45,1
N	%	0,108	2,26	0,624	0,584

#### 4.2 Résultats des tests préliminaires

Les données brutes ont d'abord été soumises à un test afin d'éliminer les données extrêmes. Il s'agit de la méthode des quartiles, dans laquelle une valeur inférieure (équation 14) et une valeur supérieure (équation 15) sont calculées. Lorsque la valeur évaluée se situait entre ces deux valeurs limites, elle était conservée, sinon, elle était rejetée. La moyenne était ensuite calculée avec les données restantes. Un exemple de calculs est présenté à l'annexe E.

$$\text{Limite inférieure} = Q_1 - (1,5 * (Q_3 - Q_1)) \quad [14]$$

$$\text{Limite supérieure} = Q_3 + (1,5 * (Q_3 - Q_1)) \quad [15]$$

Ce sont ces données, pour le CO, qui sont présentées au tableau 10. Pour chaque biomasse et chaque puissance, le débit d'air sélectionné est celui pour lequel la concentration en CO dans les gaz de combustion est la plus faible (données en gras). Ainsi, c'est dans ces conditions que la combustion est la plus efficace. Malgré cette analyse de données, il faut mettre un bémol sur les débits d'air retenus. En effet, même si la valeur de concentration en CO la plus faible a été sélectionnée, les moyennes sont souvent proches l'une de l'autre et se situent dans le même intervalle de confiance à 95 %. Ainsi, au tableau 10, pour chaque biomasse et à chaque puissance, les concentrations en CO auxquelles ont été attribuées des lettres identiques se situent dans le même intervalle de confiance. Par exemple, les émissions de CO du bois à la puissance 5 et à l'entrée d'air maximale ( $544 \pm 219$  ppm) sont dans le même intervalle de confiance que pour l'entrée d'air 2/3 ( $490 \pm 211$  ppm) mais c'est cette dernière qui a été sélectionnée. Dans chaque cas, une décision devait être prise et ce sont les valeurs les plus faibles qui indiquent à quelle combinaison puissance / entrée d'air les tests finaux de combustion auront été effectués.

Les résultats de toutes les variables analysées lors des essais préliminaires uniquement dans les conditions de combustion optimales (aux entrées d'air déterminées au tableau 10) sont présentés au tableau 11.

**Tableau 10. Résultats des essais préliminaires - Concentrations en CO (ppm<sub>v</sub>)**

Paramètre de combustion		Biomasse			
Puissance	Débit d'air	Bois	FSLP	Panic	Saule
<b>max (5)</b>	<b>max.</b>	544 a	<b>422 a</b>	69 a	577 ab
	<b>2/3</b>	<b>490 a</b>	.	<b>56 a</b>	627 b
	<b>1/3</b>	1140 b	477 a	86 a	<b>516 a</b>
<b>int. (3)</b>	<b>max.</b>	134 c	<b>170 a</b>	100 a	319 a
	<b>2/3</b>	86 b	269 b	102 a	<b>284 a</b>
	<b>1/3</b>	<b>60 a</b>	509 c	<b>93 a</b>	341 a
<b>faible (2)</b>	<b>max.</b>	<b>157 a</b>	<b>336 a</b>	154 a	437 a
	<b>2/3</b>	264 b	415 a	<b>140 a</b>	372 a
	<b>1/3</b>	170 a	501 a	189 a	<b>315 a</b>

Pour chaque biomasse et à chaque puissance, les concentrations en CO auxquelles ont été attribuées des lettres identiques sont situées dans le même intervalle de confiance à 95%.

**Tableau 11. Résultats des essais préliminaires dans les conditions optimales**

Bio-masse	Puis.	TC	Entrée d'air	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Opa-cité	O <sub>2</sub>
	Niv.	kg h <sup>-1</sup>	taux	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%
<b>Bois</b>	<b>5</b>	<b>3,54</b>	<b>2/3</b>	6,1	490	45 044	6,1	53 599	10,9	18,6
	<b>3</b>	<b>1,50</b>	<b>1/3</b>	1,8	60	28 740	5,3	28 744	1,44	16,0
	<b>2</b>	<b>1,00</b>	<b>max.</b>	3,5	157	21 083	3,3	19 011	1,52	15,7
<b>FSLP</b>	<b>5</b>	<b>3,00</b>	<b>max.</b>	3,2	422	29 791	66,7	37 134	41,5	13,9
	<b>3</b>	<b>1,80</b>	<b>max.</b>	1,9	170	19 975	44,6	24 484	8,81	18,6
	<b>2</b>	<b>1,11</b>	<b>max.</b>	1,6	336	16 514	---	---	---	---
<b>Panic érigé</b>	<b>5</b>	<b>2,59</b>	<b>2/3</b>	1,5	56	27 284	19,3	41 634	4,61	17,7
	<b>3</b>	<b>1,43</b>	<b>1/3</b>	1,5	93	21 330	19,0	25 504	---	---
	<b>2</b>	<b>0,98</b>	<b>2/3</b>	2,6	140	15 331	17,3	20 223	5,03	17,7
<b>Saule</b>	<b>5</b>	<b>3,23</b>	<b>1/3</b>	3,1	516	32 939	15,3	40 720	40,5	11,2
	<b>3</b>	<b>1,68</b>	<b>2/3</b>	2,6	284	21 407	14,9	26 011	56,3	18,3
	<b>2</b>	<b>1,13</b>	<b>1/3</b>	4,1	315	15 208	15,0	20 488	55,5	18,9

### 4.3 Résultats des tests finaux

#### 4.3.1 Analyse de la concentration des gaz

Les tableaux 12 à 15 présentent les résultats des essais finaux. Pour chaque biomasse, chaque tableau présente quelques paramètres de combustion importants : le taux de combustion (calculé en divisant la masse totale de biomasse brûlée par l'intervalle de temps), la température des gaz de combustion (mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K au niveau de la sonde d'échantillonnage) et le débit des gaz de combustion (qui est la différence entre le débit à l'iris 1 et le débit à l'iris 2).

Chaque tableau présente par la suite les concentrations pour les différents gaz ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCL}$ ) et la teneur en  $\text{H}_2\text{O}$ . Il s'agit du résultat de la moyenne de deux valeurs (deux journées) pour le bois et de trois valeurs pour les autres biomasses. En raison d'un problème technique survenu lors de la première journée de combustion, seulement deux valeurs sont disponibles pour le bois. Ces valeurs moyennes de concentration pour chaque biomasse à chaque puissance sont elles-mêmes le résultat de la moyenne arithmétique d'une dizaine de valeurs. En effet, pour chaque puissance, les données de 50 minutes de combustion étaient retenues et une valeur était enregistrée par le FTIR aux cinq minutes, pour un total de dix valeurs.

Contrairement aux essais préliminaires, le calcul des moyennes a été réalisé avec l'ensemble des valeurs obtenues sans supprimer de valeurs extrêmes détectées. Cette décision a été prise car une donnée qui était extrême pour une journée ne l'était pas nécessairement en prenant l'ensemble des données pour les trois journées de combustion. De plus, il est considéré que la combustion n'est pas nécessairement homogène, c'est-à-dire qu'il peut y avoir, à un instant donné, un dégagement plus important d'un gaz en particulier. En prenant l'ensemble des valeurs, cela représente bien la réalité.

À partir des résultats présentés aux tableaux 12 à 15, les concentrations de gaz ont été transformées en émissions selon la méthodologie détaillée à la section 3.2. Un exemple de calcul pour les émissions de  $\text{CH}_4$  de la combustion du bois à la puissance 5 est

présenté à l'annexe F. L'analyse comparative des résultats transformés en émissions est présentée à la section suivante.

**Tableau 12. Résultats des essais finaux pour la combustion du bois**

Paramètre	Unités	Puissance			Moyenne
		5	3	2	
<b>Puissance</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	
<b>Taux d'entrée d'air</b>		<b>2/3</b>	<b>1/3</b>	<b>1</b>	
Taux de combustion	kg h <sup>-1</sup>	3,25	1,83	1,20	2,09
Température des gaz	°C	173	126	107	135
Débit des gaz	m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>	0,63	0,53	0,60	0,59
[CH <sub>4</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	<b>18,2*</b>	0,4	6,1	8,2
[CO]	ppm <sub>v</sub>	1 119	124	269	504
[CO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	50 955	31 527	21 870	34 784
[NH <sub>3</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	0,3	1,8	2,9	1,7
[N <sub>2</sub> O]	ppm <sub>v</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0
[NO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	1,4	1,1	1,4	1,3
[SO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	10,1	5,3	5,5	7,0
[HCl]	ppm <sub>v</sub>	0,3	0,2	0,2	0,2
Teneur en H <sub>2</sub> O	%	6,2	4,7	3,3	4,7

\* Les calculs sont présentés à l'annexe F

**Tableau 13. Résultats des essais finaux pour la combustion de la FSLP**

Paramètre	Unités	Puissance			Moyenne
		5	3	2	
<b>Puissance</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	
<b>Taux d'entrée d'air</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	
Taux de combustion	kg h <sup>-1</sup>	3,08	1,86	1,05	2,00
Température des gaz	°C	159	125	93	126
Débit des gaz	m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>	0,74	0,72	0,68	0,71
[CH <sub>4</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	5,5	0,1	2,6	2,7
[CO]	ppm <sub>v</sub>	963	292	410	555
[CO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	41 738	26 387	16 732	28 286
[NH <sub>3</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	0,2	0,1	0,1	0,2
[N <sub>2</sub> O]	ppm <sub>v</sub>	1,0	0,3	0,5	0,6
[NO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	1,9	2,5	7,8	4,1
[SO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	106,9	62,8	39,5	69,7
[HCl]	ppm <sub>v</sub>	0,2	0,1	0,2	0,2
Teneur en H <sub>2</sub> O	%	5,3	4,5	3,2	4,3

**Tableau 14. Résultats des essais finaux pour la combustion du panic érigé**

Paramètre	Unités	Puissance			Moyenne
		5	3	2	
<b>Puissance</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	
<b>Taux d'entrée d'air</b>		<b>2/3</b>	<b>1/3</b>	<b>2/3</b>	
Taux de combustion	kg h <sup>-1</sup>	2,62	1,53	0,98	1,71
Température des gaz	°C	145	99	80	108
Débit des gaz	m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>	0,80	0,60	0,67	0,69
[CH <sub>4</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	0	0	2	1
[CO]	ppm <sub>v</sub>	141	77	172	130
[CO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	36 087	22 938	14 700	24 575
[NH <sub>3</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	0,2	0,1	0,0	0,1
[N <sub>2</sub> O]	ppm <sub>v</sub>	0,1	0,1	0,0	0,1
[NO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	2,1	7,6	10,5	6,7
[SO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	21,5	13,8	12,3	15,9
[HCl]	ppm <sub>v</sub>	0,2	0,2	0,2	0,2
Teneur en H <sub>2</sub> O	%	4,7	3,6	2,5	3,6

**Tableau 15. Résultats des essais finaux pour la combustion du saule**

Paramètre	Unités	Puissance			Moyenne
		5	3	2	
<b>Puissance</b>		<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	
<b>Taux d'entrée d'air</b>		<b>1/3</b>	<b>2/3</b>	<b>1/3</b>	
Taux de combustion	kg h <sup>-1</sup>	2,98	1,99	1,33	2,10
Température des gaz	°C	156	135	94	128
Débit des gaz	m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>	0,70	0,67	0,52	0,63
[CH <sub>4</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	82,8	0,6	2,0	28,4
[CO]	ppm <sub>v</sub>	1 973	455	407	945
[CO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	41 435	28 128	21 669	30 411
[NH <sub>3</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	0,2	0,5	0,1	0,3
[N <sub>2</sub> O]	ppm <sub>v</sub>	0,6	0,3	0,3	0,4
[NO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	2,3	4,3	5,4	4,0
[SO <sub>2</sub> ]	ppm <sub>v</sub>	13,6	4,7	4,9	7,8
[HCl]	ppm <sub>v</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0
Teneur en H <sub>2</sub> O	%	5,5	4,0	3,1	4,2

#### 4.3.2 Analyse des émissions

Le tableau 16 présente les résultats des tests aux effets fixes réalisés à l'aide de SAS. Les effets de la biomasse, de la puissance et de l'interaction entre ces deux facteurs pour les différents gaz et pour l'opacité ont été testés. En analysant les résultats de ces tests, les émissions de CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, et N<sub>2</sub>O ne présentent aucune différence significative pour

les trois effets fixes ( $Pr < 0,05$ ). Il ne devrait donc pas y avoir de différence significative détectée lors des tests de comparaisons multiples pour ces gaz. En ce qui concerne le  $CH_4$ , le  $CO$ , le  $NO_2$ , le  $SO_2$ , l' $O_2$  et l'opacité, des différences peuvent être observées car au moins un effet fixe est significatif. Les tests de comparaisons multiples (contrastes) réalisés l'aide de l'énoncé ESTIMATE du logiciel SAS ont alors été explorés afin de déterminer à quelle puissance et pour quelles biomasses des différences significatives existent.

Les résultats des tests de comparaison sont présentés pour chaque gaz dans un tableau comparatif des émissions des quatre biomasses à chaque puissance. Les moyennes de deux ou trois répétitions d'émissions de gaz (en  $g\ kg^{-1}_{\text{biomasse}}$ ), d'opacité (en %), de particules (en  $mg\ m^{-3}$ ) et d' $O_2$  (%) sont présentées. Pour une colonne (puissance ou moyenne globale), les moyennes pour lesquelles la même lettre fut attribuée ne sont pas significativement différentes. Au contraire, si deux biomasses ne possèdent pas la même lettre à une certaine puissance, cela signifie que leurs moyennes sont significativement différentes. Enfin, lorsque des différences significatives sont observées, les résultats des émissions sont illustrés sous forme de graphique. Cela permet de visualiser les effets de la biomasse et de la puissance ainsi que l'interaction entre ces deux paramètres.

**Tableau 16. Résultats des tests aux effets fixes pour les gaz et l'opacité**

Composé	Effet	D.l. num.	D.l. dén.	F	Pr > F
<b>CH<sub>4</sub></b>	Biomasse	3	7	4,16	0,0549
	Puissance	2	14	44,59	<0,0001 *
	Puissance*Biomasse	6	14	5,70	0,0035 *
<b>CO</b>	Biomasse	3	7,9	2,98	0,0974
	Puissance	2	7,07	6,36	0,0263 *
	Puissance*Biomasse	6	7,07	1,14	0,4256
<b>CO<sub>2</sub></b>	Biomasse	3	7	0,42	0,7436
	Puissance	2	14	3,65	0,0531
	Puissance*Biomasse	6	14	2,10	0,1182
<b>NH<sub>3</sub></b>	Biomasse	3	7,77	2,51	0,1350
	Puissance	2	7,6	3,15	0,1008
	Puissance*Biomasse	6	7,6	1,93	0,1968
<b>HCl</b>	Biomasse	3	7,01	0,87	0,4991
	Puissance	2	8,89	2,04	0,1869
	Puissance*Biomasse	6	8,89	0,42	0,8492
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Biomasse	3	7	0,68	0,5936
	Puissance	2	14	0,65	0,5368
	Puissance*Biomasse	6	14	0,67	0,6741
<b>NO<sub>2</sub></b>	Biomasse	3	6,97	2,58	0,1368
	Puissance	2	8,54	18,46	0,0008 *
	Puissance*Biomasse	6	8,54	4,82	0,0199 *
<b>SO<sub>2</sub></b>	Biomasse	3	7	187,83	<0,0001 *
	Puissance	2	14	9,66	0,0023 *
	Puissance*Biomasse	6	14	2,18	0,1073
<b>O<sub>2</sub></b>	Biomasse	3	7	6,78	0,0177 *
	Puissance	2	14	234,50	<0,0001 *
	Puissance*Biomasse	6	14	3,22	0,0335 *
<b>Opacité</b>	Biomasse	3	7	0,26	0,8505
	Puissance	2	7	23,04	0,0008 *
	Puissance*Biomasse	6	7	4,64	0,0321 *

D.l. num.: Degrés de liberté au numérateur ; D.l. dén.: Degrés de liberté au dénominateur ; \* : significatif au seuil  $\alpha = 0,05$ .

- **Méthane (CH<sub>4</sub>)**

Le fichier de données brutes et les résultats de la procédure mixed de SAS sont présentés à l'annexe G pour le CH<sub>4</sub>. Chaque valeur d'émission représente la moyenne arithmétique des résultats d'une dizaine d'échantillons analysés par le FTIR. La distribution des résidus de l'analyse de la variance sur les données brutes de la variable CH<sub>4</sub> ne respectait pas les hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance, l'un des quatre postulats de l'analyse de la variance. La variance des résidus augmentait de façon exponentielle avec les valeurs prédites. Pour satisfaire les postulats sur lesquels repose la validité des tests statistiques, l'analyse de la variance a alors été effectuée sur la transformation  $\ln(\text{CH}_4 + 0,0005)$ , la valeur 0,0005 ayant été ajoutée pour éliminer les zéros. Les conclusions de l'analyse de la variance sont donc valides pour les données transformées en logarithme.

Le test aux effets fixes pour le CH<sub>4</sub> démontre que la puissance et l'interaction puissance-biomasse ont un effet significatif ( $Pr < 0,05$ ) (tableau 16). Pour ce qui est de l'effet puissance, cela signifie que les émissions varient de façon significative pour au moins une biomasse lorsque la puissance change. L'effet de la biomasse a aussi tendance à être significatif au seuil  $\alpha = 0,1$ . L'interaction étant significative, il faut en conclure que la variation des émissions selon la puissance est significative pour au moins une biomasse. La figure 5 illustre bien l'interaction relative aux émissions du saule, qui sont plus élevées que les émissions du panic érigé, du bois et de la FSLP à la puissance 5 et plus faibles que les émissions des autres biomasses à la puissance minimale.

Ensuite, les tests de comparaison entre les biomasses pour chaque puissance ont été effectués par des contrastes à l'aide de l'énoncé ESTIMATE du logiciel SAS (tableau G4, annexe G). Les résultats des tests de comparaison sont présentés au tableau 17. Aux puissances 2 et 3, il n'y a aucune différence significative entre les émissions de méthane pour chaque biomasse. À la puissance 5, les émissions du panic érigé sont significativement différentes des émissions des trois autres biomasses ( $Pr < 0,05$ ). Les émissions de la combustion du saule à la puissance 5 sont beaucoup plus importantes que pour le bois et la FSLP, cependant, une seule valeur fait augmenter la moyenne. C'est

pour cette raison qu'il n'existe aucune différence significative à ce niveau. Globalement, le test de comparaisons multiples sur les moyennes (tableau G5, annexe G) démontre que les émissions de CH<sub>4</sub> issues de la combustion du saule et du bois sont significativement plus élevées que celles du panic érigé. Cela contredit d'une certaine façon l'hypothèse suggérant que les émissions de la combustion du panic érigé, de la FSLP et du saule ne seraient pas différentes de celles du bois. Cependant, cela ne pose aucun problème car les émissions du bois sont significativement plus élevées et non plus faibles.

Le méthane étant un produit de combustion incomplète, ces résultats peuvent démontrer que la combustion du panic érigé était effectuée dans de meilleures conditions que les autres biomasses, particulièrement à la puissance 5. Le taux d'entrée d'air a donc bien été sélectionné pour le panic érigé. De plus, selon la littérature, les émissions de combustion incomplète dépendent de plusieurs autres facteurs, dont la température du foyer de combustion et le mélange air-carburant (Van Loo et Koppejan, 2008). La faible masse volumique des granules de panic érigé, favorisant le mélange air-carburant, peut expliquer sa bonne efficacité de combustion. De plus, le taux de combustion du panic érigé, qui relativement plus faible que les autres biomasses à la puissance 5 (tableaux 12 à 15), augmente le temps de résidence des granules dans la chambre de combustion, ce qui favorise une combustion complète.

**Tableau 17. CH<sub>4</sub> : Comparaison des émissions (g kg<sup>-1</sup>) à chaque puissance**

CH <sub>4</sub>	Puissance			Moyenne
	2	3	5	
<b>Bois</b>	0,134 a	0,005 a	0,146 b	0,095 b
<b>FSLP</b>	0,085 a	0,002 a	0,053 b	0,046 ab
<b>Panic</b>	0,058 a	0,002 a	0,003 a	0,021 a
<b>Saule</b>	0,035 a	0,008 a	0,680 b	0,241 b

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$ ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes

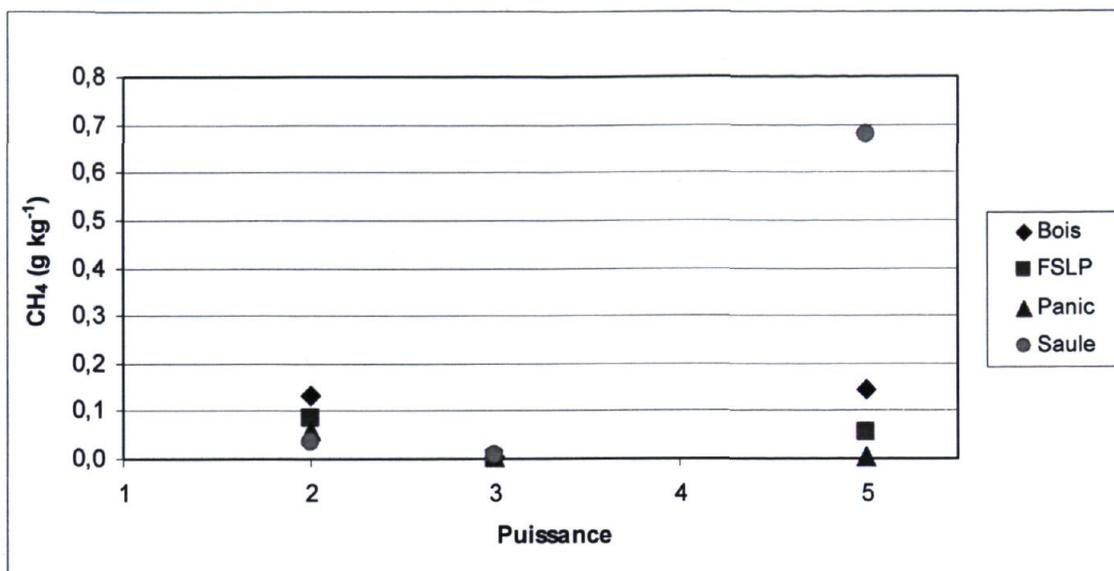


Figure 5. Moyennes des émissions de CH<sub>4</sub> pour chaque biomasse à trois puissances

- **Monoxyde de carbone (CO)**

Pour les émissions de monoxyde de carbone, seule la puissance a un effet significatif sur les émissions selon le test aux effets fixes (tableau 16). L'effet biomasse a aussi tendance à être significatif ( $Pr < 0,1$ ). Alors, les moyennes des émissions de CO pour chaque biomasse à chaque puissance ont été comparées à l'aide de contrastes. Les moyennes d'émissions sont illustrées à la figure 6 et les résultats des tests de comparaison sont présentés au tableau 18. Aux puissances 2 et 5, aucune différence significative n'a été détectée entre les moyennes des différentes biomasses. À la puissance 3, les émissions du panic érigé et du bois sont semblables et significativement plus faibles que celles de la FSLP et du saule. De plus, les émissions de la combustion du saule sont significativement plus élevées que pour toutes les autres biomasses. Globalement, il en ressort du test statistique que les émissions de CO de la combustion du panic érigé sont significativement plus faibles que celles du saule. Cependant, aucune différence significative n'a été détectée entre les émissions moyennes de CO des biomasses agricoles et du bois.

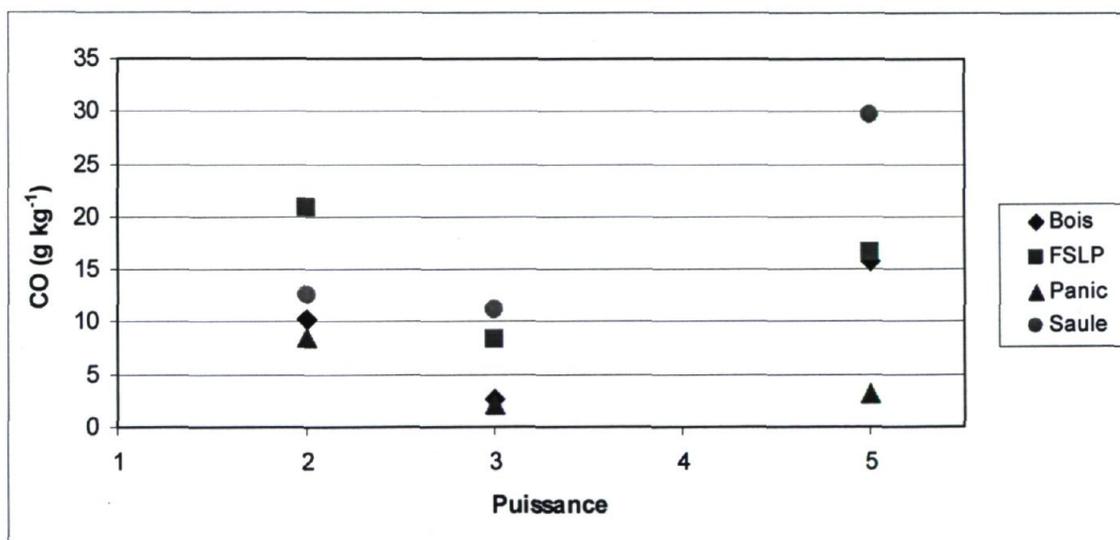
Le monoxyde de carbone est comme le méthane, un produit de combustion incomplète. L'analyse statistique permet de conclure que la combustion du saule et de la FSLP à la puissance 3 n'avait pas lieu dans des conditions aussi bonnes que pour les deux autres

biomasses. De plus, tout comme les émissions de  $\text{CH}_4$ , les émissions de CO de la combustion du panic érigé sont toujours parmi les plus faibles, ce qui confirme sa bonne efficacité de combustion.

**Tableau 18. CO : Comparaison des émissions ( $\text{g kg}^{-1}$ ) à chaque puissance**

CO	Puissance			
	2	3	5	Moyenne
<b>Bois</b>	10,24 a	2,59 a	15,70 a	9,51 ab
<b>FSLP</b>	20,78 a	8,22 b	16,54 a	15,18 ab
<b>Panic</b>	8,48 a	2,18 a	3,10 a	4,59 a
<b>Saule</b>	12,57 a	11,10 c	29,72 a	17,80 b

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$  ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes



**Figure 6. Moyennes des émissions de CO pour chaque biomasse à trois puissances**

- **Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ )**

Le dioxyde de carbone est le gaz de combustion complète qui est émis en plus grande quantité lorsque le carbone de la biomasse est oxydé par l'oxygène présent dans la chambre de combustion (Van Loo et Koppejan, 2008). Le test sur les effets fixes démontre qu'aucun effet n'est significatif au seuil  $\alpha = 0,05$  pour le  $\text{CO}_2$  (tableau 16). Entre 1079 et 1171  $\text{g kg}^{-1}$  sont émis en moyenne, ce qui est beaucoup plus élevé que les valeurs répertoriées dans la littérature (tableau 2). Même si la FSLP contient moins de carbone que les autres biomasses (tableau 9), les émissions de  $\text{CO}_2$  lors de la combustion

de la FSLP ne sont pas significativement différentes des émissions de la combustion du bois, la biomasse qui contient le plus de carbone.

**Tableau 19. CO<sub>2</sub> : Comparaison des émissions (g kg<sup>-1</sup>) à chaque puissance**

CO <sub>2</sub>	Puissance			Moyenne
	2	3	5	
<b>Bois</b>	1 242 a	1 039 a	1 125 a	1 135 a
<b>FSLP</b>	1 223 a	1 159 a	1 133 a	1 171 a
<b>Panic</b>	1 145 a	1 026 a	1 256 a	1 142 a
<b>Saule</b>	1 059 a	1 079 a	1 099 a	1 079 a

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$  ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes

- **Chlorure d'hydrogène (HCl)**

Pour le HCl, les tests aux effets fixes (tableau 16) ne rapportent aucune différence significative. Les émissions (tableau 20) se situant près des valeurs rapportées dans la revue de littérature pour le bois (entre 0,005 et 0,02 g kg<sup>-1</sup>) (tableau 2) ne présentent aucune différence significative, peu importe la puissance.

Les conclusions de l'analyse du HCl sont un peu surprenantes. La composition en chlore du panic et de la FSLP étant plus élevée (tableau 9), il aurait été probable de s'attendre à des émissions de HCl significativement plus élevées pour ces biomasses que pour le bois et le saule. Comme aucune différence significative n'a été détectée, le chlore se retrouve certainement ailleurs. Une quantité importante se retrouve dans les cendres. En effet, la proportion de Cl dans les cendres de la FSLP est plus grande que pour les autres biomasses (tableau H1, annexe H). Une certaine quantité de chlore peut aussi avoir été émise sous forme d'aérosols, de HAP ou de PCDD/PCDF, des composantes qui n'ont pas été mesurées.

**Tableau 20. HCl : Comparaison des émissions (g kg<sup>-1</sup>) à chaque puissance**

HCl	Puissance			Moyenne
	2	3	5	
<b>Bois</b>	0,0088 a	0,0061 a	0,0056 a	0,0068 a
<b>FSLP</b>	0,0115 a	0,0056 a	0,0036 a	0,0069 a
<b>Panic</b>	0,0135 a	0,0062 a	0,0056 a	0,0084 a
<b>Saule</b>	0,0010 a	0,0012 a	0,0006 a	0,0010 a

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$ ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes.

- **Ammoniac (NH<sub>3</sub>)**

Le NH<sub>3</sub> est un gaz de combustion incomplète qui est émis en très faible quantité lorsque la température de combustion est trop basse (Van Loo et Koppejan, 2008). Les résultats des tests aux effets fixes ne sont pas significatifs au seuil  $\alpha = 0,05$  (tableau 16), il n'y a donc aucune différence significative entre les émissions de chaque biomasse (tableau 21). Cependant, lors de la combustion du bois, les émissions de NH<sub>3</sub> ont tendance à diminuer lorsque la puissance augmente. Cela confirme la relation directe qui existe entre les émissions de NH<sub>3</sub> et la température car la température de combustion augmente avec la puissance.

**Tableau 21. NH<sub>3</sub> : Comparaison des émissions (g kg<sup>-1</sup>) à chaque puissance**

NH <sub>3</sub>	Puissance			Moyenne
	2	3	5	
<b>Bois</b>	0,057 a	0,022 a	0,003 a	0,027 a
<b>FSLP</b>	0,002 a	0,003 a	0,003 a	0,002 a
<b>Panic</b>	0,001 a	0,002 a	0,002 a	0,002 a
<b>Saule</b>	0,002 a	0,007 a	0,002 a	0,004 a

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$  ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes.

- **Protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)**

Le test aux effets fixes n'a détecté aucune différence significative entre les émissions de N<sub>2</sub>O (tableau 16). Il n'y a donc pas de différence significative entre les émissions des biomasses à chaque puissance (tableau 22).

Même s'il n'y a pas de différence significative, un fait important à noter est que les émissions de N<sub>2</sub>O pour le bois sont nulles. C'est probablement en raison d'une très faible

proportion d'azote dans le bois comparativement aux autres biomasses (tableau 9). Conséquemment, la concentration de N<sub>2</sub>O dans les gaz était en-dessous de la valeur détectable par le FTIR. D'autre part, l'azote contenu dans la biomasse se retrouve dans d'autres composés, tels le NH<sub>3</sub> et les NO<sub>x</sub>.

**Tableau 22. N<sub>2</sub>O : Comparaison des émissions (g kg<sup>-1</sup>) à chaque puissance**

N <sub>2</sub> O	Puissance			
	2	3	5	Moyenne
<b>Bois</b>	0,000 a	0,000 a	0,000 a	0,000 a
<b>FSLP</b>	0,028 a	0,013 a	0,026 a	0,023 a
<b>Panic</b>	0,002 a	0,004 a	0,002 a	0,003 a
<b>Saule</b>	0,015 a	0,013 a	0,017 a	0,015 a

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$ ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes.

- **Dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)**

Pour le NO<sub>2</sub>, l'effet puissance et l'effet de l'interaction entre cette dernière et la biomasse sont significatifs selon les tests aux effets fixes (tableau 16). Il est possible de visualiser ceci à la figure 7 où la différence entre la moyenne des émissions de chaque biomasse est beaucoup plus grande à la puissance 2 qu'aux puissances 3 et 5. Le test de comparaisons multiples effectué à l'aide du logiciel SAS montre alors quelques différences significatives à la puissance 2 et à la moyenne globale (tableau 23). En effet, à la puissance minimale, les émissions du bois et du saule sont significativement plus faibles que celles du panic érigé alors que les émissions de la FSLP ne se démarquent pas des autres biomasses. En moyenne, seules les émissions du panic érigé sont significativement plus élevées que celles du bois, ce qui va à l'encontre de la première hypothèse. Il n'y a aucune différence significative aux puissances 3 et 5.

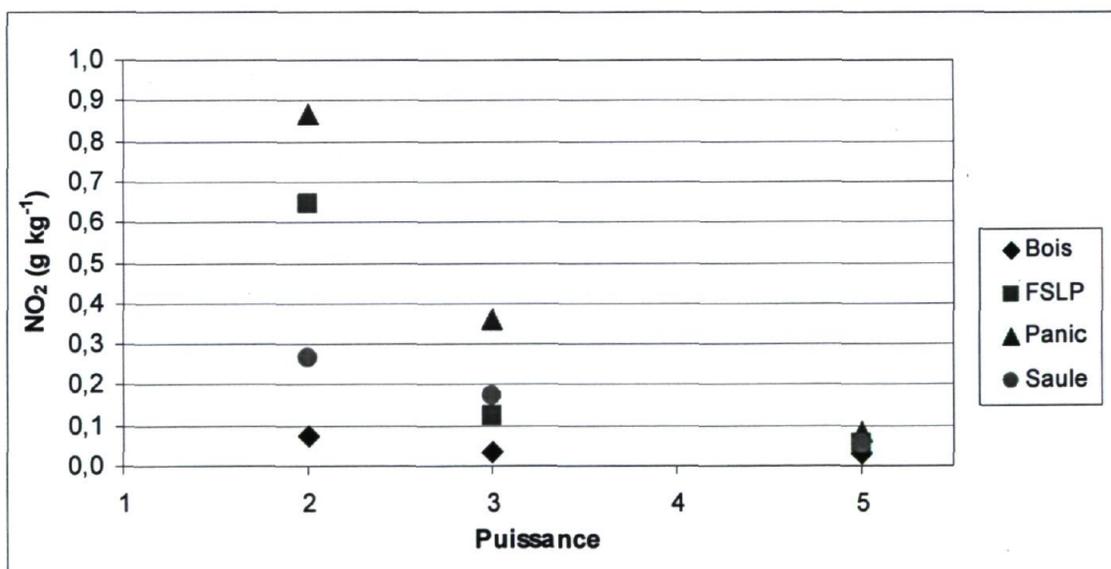
Le bois et le saule, qui contiennent la plus faible quantité d'azote, sont les biomasses qui émettent le moins de NO<sub>2</sub>, ce qui est tout à fait normal car il existe vraisemblablement une relation entre le contenu en azote du combustible et les émissions de NO<sub>x</sub>, soit logarithmique (Van Loo et Koppejan, 2008) ou directement proportionnelle (Johansson *et al.*, 2004). La FSLP étant la biomasse qui contient le plus d'azote, il aurait donc été probable que sa combustion émette le plus de NO<sub>2</sub>. Cependant, d'autres paramètres sont à

considérer, comme le taux d'entrée d'air du poêle et la température de combustion. En effet, les résultats démontrent que les conditions de combustion ont un impact réel sur les émissions de  $\text{NO}_2$ . Lorsque le taux de combustion ainsi que la température de combustion sont plus élevés, les émissions de  $\text{NO}_2$  de chaque biomasse sont plus faibles et moins de différences sont remarquées entre elles (figure 7).

**Tableau 23.  $\text{NO}_2$  : Comparaison des émissions ( $\text{g kg}^{-1}$ ) à chaque puissance**

$\text{NO}_2$	Puissance			
	2	3	5	Moyenne
<b>Bois</b>	0,074 a	0,034 a	0,031 a	0,046 a
<b>FSLP</b>	0,643 ab	0,125 a	0,053 a	0,274 ab
<b>Panic</b>	0,868 b	0,357 a	0,085 a	0,437 b
<b>Saule</b>	0,266 a	0,174 a	0,052 a	0,164 ab

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$  ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes.



**Figure 7. Moyennes des émissions de  $\text{NO}_2$  pour chaque biomasse à trois puissances**

- **Dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ )**

Les résultats des tests aux effets fixes exposés au tableau 16 indiquent que l'effet biomasse et l'effet puissance sont significatifs. Globalement, les résultats des tests de comparaisons effectués à l'aide de SAS démontrent que les émissions de  $\text{SO}_2$  de la combustion du bois et du saule sont les plus faibles alors qu'aucune différence significative n'a été détectée entre les deux (tableau 24). Les émissions de la combustion

du panic érigé sont significativement plus élevées que celles du bois et du saule alors que la combustion de la FSLP émet significativement plus de SO<sub>2</sub> que les trois autres biomasses. La figure 8 illustre bien ces différences qui varient très peu selon la puissance, des conclusions identiques étant tirées pour chacune d'entre elles (tableau 24).

Les résultats concordent bien avec la composition des biomasses. En effet, la FSLP, qui contient beaucoup plus de soufre que les autres biomasses (tableau 9), émet beaucoup plus de SO<sub>2</sub>. Le panic érigé et le saule contiennent sensiblement la même proportion de soufre. Cependant, les émissions de SO<sub>2</sub> du panic érigé sont significativement plus élevées. L'hypothèse retenue est qu'une proportion plus importante de soufre a été maintenue dans les cendres lors de la combustion du saule. Cela est confirmé par la composition chimique des cendres, où le contenu en SO<sub>3</sub> des cendres de la combustion du saule est plus élevé que le contenu en SO<sub>3</sub> des cendres de la combustion du panic érigé (tableau H1, annexe H). Un fait intéressant à remarquer en ce qui concerne les émissions de SO<sub>2</sub> est que peu importe la puissance, les différences significatives détectées sont les mêmes. Ainsi, il est possible d'affirmer qu'en tout temps, la combustion de la FSLP émettra plus de SO<sub>2</sub> que la combustion des trois autres biomasses.

**Tableau 24. SO<sub>2</sub> : Comparaison des émissions (g kg<sup>-1</sup>) à chaque puissance**

SO <sub>2</sub>	Puissance			Moyenne
	2	3	5	
<b>Bois</b>	0,451 a	0,264 a	0,328 a	0,348 a
<b>FSLP</b>	4,226 c	4,005 c	4,222 c	4,151 c
<b>Panic</b>	1,413 b	0,900 b	1,093 b	1,135 b
<b>Saule</b>	0,347 a	0,265 a	0,517 a	0,377 a

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$  ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes.

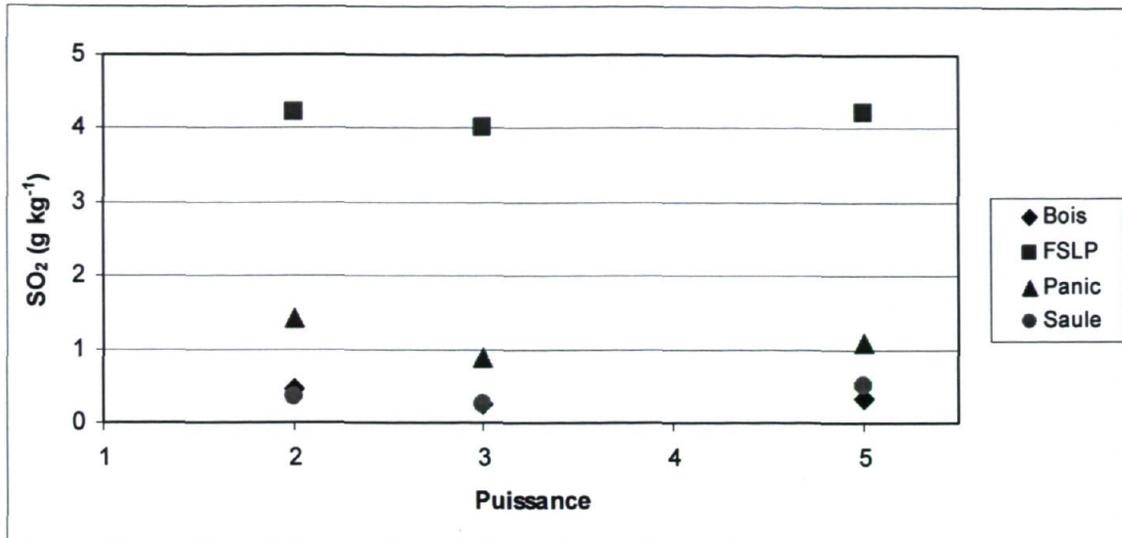


Figure 8. Moyennes des émissions de  $\text{SO}_2$  pour chaque biomasse à trois puissances

- **Particules**

Les émissions de particules ont été comptabilisées différemment des gaz. En effet, pour le panic érigé, le saule et la FSLP, il y a eu deux journées d'échantillonnage, et pour le bois, une seule journée. Une analyse comparative par contrastes a été réalisée à l'aide de SAS et les résultats pour les moyennes sont présentés au tableau 25. Il en ressort que les émissions de particules de la FSLP sont significativement plus élevées que pour les trois autres biomasses.

Ces résultats correspondent à l'hypothèse qui a été posée. En effet, la composition en cendres de la FSLP étant très élevée comparativement aux autres biomasses (tableau 7), les émissions de particules sont donc plus importantes. D'autre part, même si le taux de cendres du panic érigé et du saule est plus élevé que pour le bois, les émissions de particules ne sont pas significativement différentes. Enfin, il faut noter qu'il s'agit d'une évaluation semi-quantitative, les particules n'ayant pas été échantillonnées de façon isocinétique. Il faut donc éviter de comparer ces valeurs aux normes en vigueur exposées à la section 1.6.

**Tableau 25. Comparaison des émissions de particules ( $\text{mg m}^{-3}$ )**

	jour 1	jour 2	moyenne
<b>Bois</b>	-	37	37 a
<b>FSLP</b>	145	137	141 b
<b>Panic</b>	31	46	39 a
<b>Saule</b>	67	58	63 a

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$ ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes.

- **Opacité**

L'opacité a été mesurée à l'aide d'un opacimètre optique (voir méthodologie). Selon la section IV du Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (MDDEP, 2011), la concentration des composés dégagés dans l'atmosphère par une source fixe ne doit pas être telle qu'elle excède 20 % d'opacité. Les résultats respectent bien ces exigences (tableau 26). Les tests aux effets fixes réalisés à l'aide de SAS démontrent que l'effet biomasse n'est pas significatif alors que l'effet puissance est très significatif (tableau 16). Cela est confirmé par les contrastes dont les résultats sont présentés au tableau 26. En effet, lorsque la puissance est fixée, il n'y a aucune différence significative entre les biomasses. La tendance observée est que l'opacité augmente avec l'augmentation de la puissance, ce qui pouvait être prévisible car plus de matière est brûlée lorsque la puissance augmente.

**Tableau 26. Comparaison de l'opacité (%) de la fumée à chaque puissance**

Opacité	Puissance			Moyenne
	2	3	5	
<b>Bois</b>	0,72 a	1,00 a	9,23 a	3,65
<b>FSLP</b>	3,01 a	2,56 a	3,38 a	2,98
<b>Panic</b>	5,60 a	6,05 a	7,46 a	6,37
<b>Saule</b>	0,00 a	0,63 a	4,94 a	1,86

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$ ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes

- **Oxygène ( $\text{O}_2$ )**

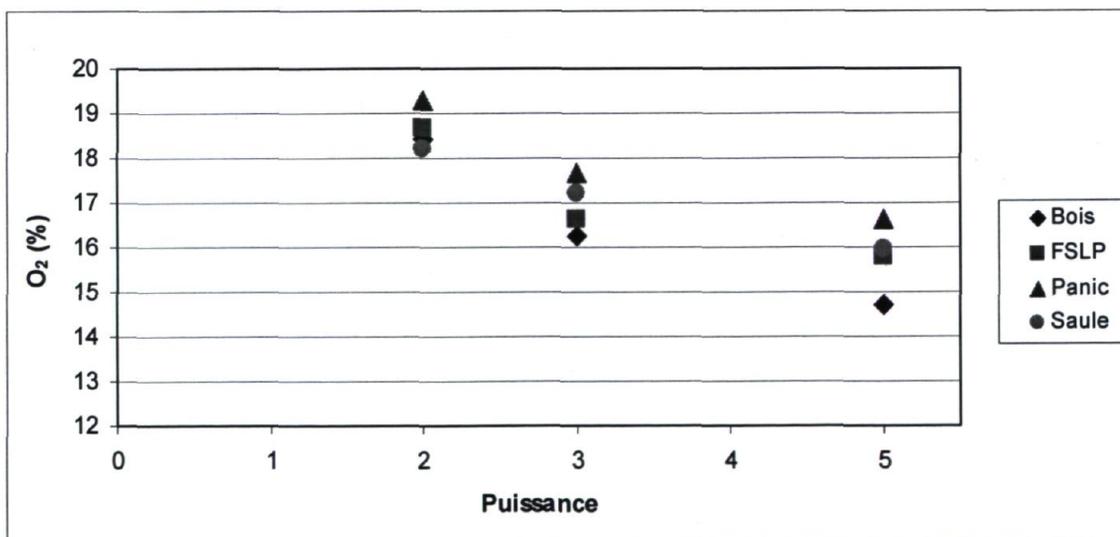
Le taux d'oxygène dans les gaz de combustion a été analysé à l'aide d'un analyseur d' $\text{O}_2$  à l'oxyde de zirconium (voir méthodologie). Seule l'analyse statistique aux trois puissances a été réalisée. Au tableau 16, les résultats du test sur les effets fixes montrent

que l'effet puissance et l'interaction puissance-biomasse sont significatifs. L'analyse des contrastes fait ressortir quelques différences significatives même si les valeurs sont très proches les unes des autres (tableau 27). L'important ici est de remarquer, à la figure 9, la tendance qu'a le taux d'oxygène dans les gaz à diminuer avec l'augmentation de la puissance. Cela peut être expliqué car lorsque le taux de combustion est plus élevé, une plus grande quantité d'oxygène est nécessaire pour oxyder les différents composés de la biomasse comme le carbone, l'azote, le soufre et l'hydrogène qui sont libérés en plus grande quantité.

**Tableau 27. Comparaison de la concentration d'O<sub>2</sub> (%) à chaque puissance**

O <sub>2</sub>	Puissance			Moyenne
	2	3	5	
<b>Bois</b>	18,42 ab	16,24 a	14,73 a	16,46
<b>FSLP</b>	18,66 ab	16,64 ab	15,80 ab	17,03
<b>Panic</b>	19,29 b	17,67 b	16,62 b	17,86
<b>Saule</b>	18,19 a	17,19 ab	15,96 b	17,11

Niveau de signification  $\alpha = 0,05$ ; Pour une même puissance, les moyennes d'émissions des biomasses ayant des lettres différentes sont significativement différentes



**Figure 9. Moyennes de concentration d'O<sub>2</sub> pour chaque biomasse à 3 puissances**

### 4.3.3 Observations générales

L'allumage était particulièrement difficile pour les granules de FSLP qui étaient plus denses que les autres biomasses. À la puissance 1, l'allumage était impossible. C'est pour cette raison que la puissance minimale a été fixée au niveau d'ajustement 2 sur le panneau de contrôle du poêle.

La formation de mâchefer, composé de blocs de silice et de minéraux compacts qui se forme lors de la fusion des cendres (Bodineau et Pouet, 2006), a été observée principalement lors de la combustion du panic érigé. En effet, des agglomérations de cendres se formaient dans la chambre de combustion, ce qui est causé par sa température de fusion plus basse que pour les autres biomasses. Les mâchefers risquent d'étouffer la combustion et de boucher l'évacuation des cendres et les entrées d'air.

Les cendres de la FSLP avaient l'aspect d'une poudre de couleur brune et avaient tendance à colmater l'entrée d'air dans la chambre de combustion. Le poêle, qui devenait beaucoup plus encrassé lors de la combustion de la FSLP, était donc plus difficile à nettoyer.

## Conclusions

En conclusion, le but de ce projet, qui était de quantifier et de comparer les émissions gazeuses et particulaires de biomasses agricoles et forestières, a été atteint. Le saule, le panic érigé et la fraction solide de lisier de porc (FSLP) ont été sélectionnés pour leur grand potentiel au Québec et la granule de bois (mélange d'épinette noire et de pin gris) a été choisie comme biomasse forestière de référence. Le montage expérimental mis en place a permis d'obtenir les données attendues pour la combustion de ces quatre biomasses dans un poêle à granules d'une puissance nominale de 17,58 kW. D'abord, les essais préliminaires ont permis de se familiariser avec le montage auquel quelques modifications ont été apportées par la suite. La concentration de quelques gaz ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) a été analysée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Trois taux de combustion (niveaux 2, 3 et 5) et trois taux d'entrée d'air (ouvertures 1/3, 2/3 et maximale) ont été testés pour chacune des quatre biomasses. À chaque puissance, c'est le taux d'entrée d'air pour lequel la concentration de  $\text{CO}$  dans les gaz de combustion lors des essais préliminaires était la plus faible qui a été sélectionné pour procéder aux essais finaux. Lors des essais finaux, deux répétitions pour le bois et trois répétitions pour les autres biomasses ont été réalisées aux trois puissances, au taux d'entrée d'air prédéterminé, pour un total de 11 journées d'expérimentation. En plus des gaz qui ont été mesurés lors des essais préliminaires, le  $\text{NO}_2$ , le  $\text{NH}_3$ , le  $\text{N}_2\text{O}$  et le  $\text{HCl}$  ont été analysés. Les valeurs brutes du FTIR ( $\text{ppm}_v$ ) ont été transformées en émissions ( $\text{g kg}^{-1}_{\text{biomasse}}$ ) à température et pression normale (TPN), sur base sèche. Une évaluation semi-quantitative du taux d'émission de particules a été réalisée en insérant des filtres en fibre de verre dans des portes-filtres en aluminium installés à l'entrée de la sonde d'échantillonnage. De plus, un analyseur d'oxygène et un opacimètre ont été installés pour déterminer le taux d' $\text{O}_2$  et l'opacité de l'effluent gazeux.

Afin de vérifier l'hypothèse affirmant que les émissions gazeuses de la combustion de trois biomasses agricoles (panic érigé, FSLP et saule) ne seraient pas significativement différentes de celles du bois, l'analyse statistique comparative des quatre biomasses a été réalisée individuellement à chaque puissance, pour chaque gaz, à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS. L'hypothèse s'est avérée fautive pour certains gaz, dont le  $\text{SO}_2$

et le  $\text{NO}_2$ . Les différences les plus importantes ont été remarquées pour le  $\text{SO}_2$ . En effet, que ce soit pour n'importe quelle puissance et pour la moyenne globale, le test démontre que les émissions de  $\text{SO}_2$  sont les plus élevées lors de la combustion de la FSLP et que les émissions les plus faibles sont celles de la combustion du bois et du saule. Les émissions du panic érigé se situent au milieu. Les résultats confirment que les émissions de  $\text{SO}_2$  sont directement reliées à la composition en soufre du combustible.

Les résultats pour le HCl respectent l'hypothèse de départ. Même si la composition en chlore du panic érigé et de la FSLP est plus élevée, aucune différence significative n'a été détectée entre les émissions de la combustion des quatre biomasses pour chaque puissance. L'analyse des cendres de combustion démontre que cet élément se retrouve plutôt dans les cendres et les particules.

Les émissions de composés carbonés ( $\text{CH}_4$ , CO et  $\text{CO}_2$ ) sont un bon indicateur de la qualité de la combustion, les deux premiers gaz étant des produits de combustion incomplète et le dernier, un produit de combustion complète. Puisque très peu de différences significatives ont été détectées entre les émissions de ces composés pour les quatre biomasses, il est possible d'affirmer que l'ajustement du poêle quant au taux d'entrée d'air était généralement bon. Pour le  $\text{CH}_4$ , il existe une différence significative à la puissance 5, les émissions de la combustion du panic érigé étant plus faibles que pour les autres biomasses. Globalement, les émissions de  $\text{CH}_4$  de la combustion du panic érigé sont plus faibles que celles de la combustion du saule. Dans le cas du CO, il y a quelques différences significatives à la puissance 3, le panic érigé étant parmi les biomasses pour lesquelles le moins de CO est émis alors que le saule est la biomasse qui en émet le plus. En moyenne, le panic érigé émet donc significativement moins de CO que le saule. Il est possible d'établir un lien entre les émissions de CO et de  $\text{CH}_4$ , deux bons indicateurs de combustion incomplète. Lorsqu'il y a des différences significatives, le panic érigé est toujours parmi les biomasses pour lesquelles le moins de méthane et de monoxyde de carbone sont émis. Cela signifie que pour le panic érigé, les conditions de combustion étaient appropriées. L'hypothèse est respectée pour le  $\text{CH}_4$  et pour le CO presque en tout temps, alors que la combustion du panic érigé, de la FSLP et du saule n'émet pas des quantités plus grandes de ces gaz que la combustion du bois, sauf pour le CO à la

puissance 3. Enfin, pour le CO<sub>2</sub>, aucune différence significative n'a été remarquée. Le CO<sub>2</sub> est le gaz de combustion complète qui est émis en plus grande quantité (entre 1079 et 1171 g kg<sup>-1</sup> en moyenne). Cependant, les émissions de CO<sub>2</sub> ne sont pas considérées comme étant une source de pollution car l'équivalent de ces émissions a été absorbé lors de la croissance de la plante ou de l'arbre par le processus de photosynthèse.

Les composés azotés (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O et NO<sub>2</sub>) présentent peu de différences significatives. À la moyenne globale, seules les émissions de NO<sub>2</sub> du panic érigé ne respectent pas l'hypothèse initiale et sont significativement plus élevées que celles du bois, ces différences survenant surtout en raison des différences importantes détectées à la puissance minimale. Les émissions de N<sub>2</sub>O et de NH<sub>3</sub> des quatre biomasses ne présentent aucune différence significative.

L'hypothèse concernant les émissions de particules s'est avérée véridique. En effet, la conclusion est que la combustion de la FSLP émet significativement plus de particules que la combustion des trois autres biomasses, ce qui est tout à fait normal étant donnée sa composition élevée en cendres. Les émissions de particules de la combustion du panic érigé et du saule, dont la composition en cendres est plus élevée que le bois, ne sont cependant pas significativement plus élevées que lors de la combustion du bois.

Enfin, ce projet aura permis d'acquérir des connaissances et une expertise sur la combustion de la biomasse dans des petites fournaies et sur les méthodes de mesure des émissions gazeuses et particulaires. L'analyse des données recueillies pourra permettre au gouvernement du Québec de prendre une décision concernant l'utilisation de granules de biomasses agricoles dans les petites fournaies de moins de 3 MW, et éventuellement, de modifier la réglementation. Le bilan thermique réalisé à l'aide de la chambre calorimétrique (Brassard, 2011) a démontré qu'il est viable de remplacer le bois par les biomasses testées. Cependant, les résultats de ce projet démontrent qu'il faut porter une attention particulière relativement aux émissions de particules, de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>2</sub> pour la FSLP et le panic érigé. Quant au saule, il ne devrait y avoir aucune crainte quant à la possibilité de brûler cette biomasse dans une fournaie de faible capacité, les comparaisons avec le bois ne démontrant aucune différence significative, autant pour les

gaz que pour les particules. D'autre part, les résultats prouvent que la puissance à laquelle le poêle est utilisé a un impact non négligeable sur les émissions, particulièrement pour le  $\text{NO}_2$ . De plus, différentes caractéristiques de la combustion, telles que la production de cendres en grande quantité, la formation de mâchefer et la corrosion des équipements entrent en ligne de compte lorsqu'il est temps de choisir une biomasse ainsi que l'unité de combustion à utiliser. D'autres études devraient permettre de confirmer les résultats obtenus dans le cadre de ce projet.

## Recommandations

Pour les études subséquentes portant sur la combustion de la biomasse, l'auteur propose les recommandations suivantes :

- les granules des différentes biomasses devraient être homogènes, c'est-à-dire avoir une masse volumique, un diamètre et une teneur en humidité semblables.
- L'analyse ultime des granules devrait inclure l'hydrogène, l'oxygène et le soufre.
- Pour le panic érigé, le temps de récolte semble avoir une influence sur les émissions. Ainsi, les émissions de la combustion du panic érigé récolté à l'automne pourraient être comparées aux émissions de la combustion du panic érigé récolté au printemps. De plus, d'autres cultures lignocellulosiques, telles que le miscanthus et l'alpiste roseau, pourraient être testées dans ces mêmes conditions.
- Les particules devraient être échantillonnées de façon isocinétique et selon la méthode exposée dans la norme CSA-B415.1-10 pour que la mesure soit plus représentative des émissions réelles.
- Des liens entre la température de combustion et les émissions pourraient être établis en installant un thermocouple à l'intérieur de la chambre de combustion.
- Il serait préférable de déterminer le débit de façon directe dans la cheminée sans avoir recours à la dilution, ce qui pourrait diminuer les incertitudes sur les mesures. Pour cela, il faudra trouver un instrument pouvant mesurer de faibles débits à des températures élevées. Le tube de Pitot en S proposé dans la norme CSA-B415.1-10 pourrait être utilisé.
- Une mesure des PCDD / PCDF et des HAP dans les gaz de combustion devrait être faite car ce sont des composés très néfastes pour la santé et pour l'environnement.

- Des standards sur la qualité des granules devraient être établis. Pour ce faire, il faudra établir le lien entre la composition des granules et les émissions lors de la combustion à l'aide d'une modélisation.
- L'ajout d'additifs dans les granules ayant le potentiel de réduire les effets de corrosion et de réduire les émissions de certains gaz devrait être évalué.
- Une analyse statistique multivariée, par exemple, l'analyse par composantes principales (ACP), pourrait être faite. En effet, en regroupant divers paramètres, tels que la température et l'humidité, avec les émissions de gaz dans l'analyse statistique, d'autres conclusions intéressantes pourraient être tirées à partir des données de cette même expérience.

## Bibliographie

- AFP. 2011. «La demande mondiale de pétrole devrait encore augmenter en 2012». L'express, [En ligne]. [http://www.lexpress.fr/actualites/1/economie/la-demande-mondiale-de-petrole-devrait-encore-augmenter-en-2012\\_1011802.html](http://www.lexpress.fr/actualites/1/economie/la-demande-mondiale-de-petrole-devrait-encore-augmenter-en-2012_1011802.html) (page consultée le 10 janvier 2012).
- Amie Assouth, A., J. Carre, J. Delcarte, F. Douard, P. Girard, L. Lacrosse, D. Marchal, J. Martin, A. Napoli, A. Riedacker, D. Rolot, Y. Ryckmans, Y. Shenkel, M. Temmerman et M. Wauthélet. 2005. Guide de la biomasse énergie, 2<sup>e</sup> édition. Collection Points de repère, Belgique, 391 pages.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2004. E 711-87 - Standard Test Method for Gross Calorimetric Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, 8 pages.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2010. E 2779-10 - Standard Test Method for Determining Particulate Matter Emissions from Pellet Heaters, 6 pages.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2011. C 311-11 - Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, 10 pages.
- Beauchemin, P.A. et M. Tampier. 2008. Emissions from wood-fired combustion equipment, [En ligne]. [www.env.gov.bc.ca/epd/industrial/pulp\\_paper\\_lumber/pdf/emissions\\_report\\_08.pdf](http://www.env.gov.bc.ca/epd/industrial/pulp_paper_lumber/pdf/emissions_report_08.pdf) (page consultée le 6 octobre 2011).
- Bodineau, L. et J-C. Pouet. 2006. Étude bibliographique sur la combustion de produits issus de cultures annuelles (blé, paille, maïs), [En ligne]. [http://www.ofme.org/bois-energie/documents/Combustible/Combustion\\_cereales.pdf](http://www.ofme.org/bois-energie/documents/Combustible/Combustion_cereales.pdf) (Page consultée le 23 mars 2011).
- Borde, V., 2011, «Plan de bataille mondial», [En ligne]. [www.lactualite.com/environnement/plan-de-bataille-mondial](http://www.lactualite.com/environnement/plan-de-bataille-mondial) (Page consultée le 23 janvier 2012).
- Brassard, P. 2011. Validation d'une approche par chambre calorimétrique pour établir le bilan thermique de la combustion directe de granules de biomasse agricole et forestière. Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec. 30 pages.
- Brodeur, C., J. Cloutier, D. Crowley, X. Desmeules, S. Pigeon et R-M. St-Arnaud. 2008. La production de biocombustibles solides à partir de biomasse résiduelle ou de cultures énergétiques. Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 16 pages.

- Cloutier Y. et L. Lazure. 2003. Mémento sur l'utilisation des pompes et des débitmètres. Rapport R-352, Montréal, IRSST, 2003, 50 pages.
- CSA. 2010. B415.1-10. Essais de rendement des appareils de chauffage à combustibles solides. 80 pages.
- Demirbas, A. 2003. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science* 30 (2004): 219-230.
- Demirbas, A. 2009. Biofuels: securing the planet's future energy needs (Green Energy and Technology). Springer. 336 pages.
- EEA. 2009. EMEP/EEA air pollutant emissions inventory guidebook – 2009. Dans European Environment Agency, Publications about Europe's environment: published by EEA, [En ligne]. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009> (Page consultée le 22 novembre 2011).
- El Cadhi, R. F. 2011. Analyse et mesure des émissions d'odeurs provenant de l'entreposage et de la combustion de granules de biomasses. Projet de fin d'étude. Institut supérieur agronomique de Chott-Meriem (Sousse), Tunisie. 54 pages.
- ECN (Energy research Centre of the Netherlands). 2011. ECN Phyllis, The composition of biomass and waste, [En ligne]. [www.ecn.nl/phyllis/dataTable.asp](http://www.ecn.nl/phyllis/dataTable.asp) (Page consultée le 23 novembre 2011).
- Enviro. 2011. The Enviro Omega, [En ligne]. <http://www.enviro.com/images/manuals-brochures/brochures/Omega%20Brochure%20June%202008%20low%20res.pdf> (Page consultée le 20 mai 2011).
- Environnement Canada. 2009. Exemples d'émissions : concentrations des gaz à la cheminée, [En ligne]. [www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=Fr&n=30D8D456-1](http://www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=Fr&n=30D8D456-1) (Page consultée le 3 novembre 2011).
- GIEC. 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques. Rapport du Groupe de travail I du GIEC. 97 pages.
- Godbout, S., J. Palacios, F. Pelletier et J-P. Larouche. 2010. Combustion de la biomasse agricole : caractérisation des effluents gazeux et particuliers, revue de normes et élaboration d'un protocole de mesure. Rapport final. IRDA. 63 pages.
- Greenpellets filières biocombustibles. 2011. Synthèse des résultats de la 1<sup>ère</sup> campagne d'essais de combustion, [En ligne]. [www.aile.asso.fr/valorisation-de-la-biomasse/GreenPellets/test-de-combustion](http://www.aile.asso.fr/valorisation-de-la-biomasse/GreenPellets/test-de-combustion) (Page consultée le 20 octobre 2011).

- Groupe Anderson. 2011. Équipement agricole, biomasse et foresterie, [En ligne]. [www.grpanderson.com/fr/biomasse/systeme-biobaler](http://www.grpanderson.com/fr/biomasse/systeme-biobaler) (Page consultée le 11 octobre 2011).
- Harding, N. S. 2008. Characteristics of alternative fuels. *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems*, chapter 3: 83-131.
- Jeanmart, H. et P. Tchouate. 2005. Conversion de la biomasse, filières thermochimiques. [En ligne] [www.bepita.net/materiels/biomasse/Conversion\\_thermochimique.pdf](http://www.bepita.net/materiels/biomasse/Conversion_thermochimique.pdf) (Page consultée le 21 novembre 2011).
- Jenkins, B.M., L.L. Baxter, T.R. Miles jr. et T.R. Miles. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel processing technology* 54: 17-46.
- Johansson, L., Leckner, S.B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin C. et Potter, A. 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment* (38) 4183-4195.
- Kimo Instruments. 2011. Capteur, [En ligne]. [http://www.kimo.fr/produits/157/cp\\_50.html](http://www.kimo.fr/produits/157/cp_50.html) (Page consultée le 24 juillet 2011).
- Kreith, F. et Goswami, D.W. 2007. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, publié par CRC, 1560 pages.
- Lachance, M. 2010. Le chauffage à la biomasse: intérêts économiques et environnementaux. Colloque biomasse AQME/CQVB, Montréal.
- Lemus, R. E.C. Brummer, K.J. Moore, N.E. Molstad, C.L. Burras et M.F. Barker. 2002. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa. *Biomass and bioenergy* 23: 433-442.
- Léveillé, F., D. Zegan et R. Carrier. 2011. Production de solide bioénergétique à partir de la technologie SHOC<sup>MD</sup>. Innoventé, IRDA. 4 pages.
- Littell, Ramon C., Milliken, George A., Stroup, Walter W., and Wolfinger, Russel D., Schabenberger, Oliver (2006). SAS<sup>®</sup> for Mixed Models, Second Edition. Cary, NC : SAS Institute Inc., 2006.
- McKendry, P. 2001. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83: 37-46.
- MDDEP. 2011. Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère, loi sur la qualité de l'environnement, LRQ., c. Q-2. r. 4.1.
- Ndiema, C.K.W., F.M. Mpendazoe et A. Williams. 1998. Emission of pollutants from a biomass stove. *Energy Conversion and Management* 39 (13): 1357-1367.

- Obernberger, I., T. Brunner et G. Bärnthaler. 2006. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. *Biomass and bioenergy* 30:973-982.
- Obernberger, I., T. Brunner et M. Jöller. 2001. Characterisation and formation of aerosols and fly-ashes from fixed-bed biomass combustion, International IEA Seminar, 'Aerosols in biomass combustion', Zurich, Suisse.
- Prochnow, A., M. Heiermann, M. Plöchl, T. Amon et P.J. Hobbs. 2009. Bioenergy from permanent grassland – A review: 2. Combustion. *Bioresource Technology* 100 : 4945-4954.
- Prost, B. 2011. Essais comparatifs de combustion de biomasses agricoles au Québec : Étude des rejets de gaz à effet de serre tout au long du cycle de production, transformation et combustion des biomasse, Mémoire de fin d'études, ISARA-Lyon, France, 89 pages.
- Palacios, J.H., M. Verma, S. Godbout, F. Pelletier, P. Brassard, J-P. Larouche, D. Bussièrès et O. Solomatnikova. 2011. Value-addition of residual ashes from different biomass origins in cement based materials: a comparative study. 7<sup>th</sup> International Symposium on Cement Based Materials for a Sustainable Agriculture (CSBE/SCGAB), Quebec City, Canada, September 18-21<sup>st</sup> 2011.
- Pascual, C., G. Sirvent et J. Salmon. 2012. Contrôle des émissions et assainissement de l'atmosphère : Point de vue de l'exploitant. Présentation dans le cadre de la 2<sup>ième</sup> édition de la conférence « Contrôle des émissions et assainissement de l'atmosphère », CRIQ, Québec, 9 février 2012.
- Reeves, F. 2012. Qualité de l'air et santé cardiaque. Présentation dans le cadre de la 2<sup>ième</sup> édition de la conférence « Contrôle des émissions et assainissement de l'atmosphère », CRIQ, Québec, 9 février 2012.
- Réseau des Ingénieurs du Québec et ÉcoRessources Consultants. 2012. La conversion du chauffage au mazout vers la biomasse au Québec. Site du Réseau des Ingénieurs du Québec, [En ligne]. [www.reseauiq.qc.ca/uploaded/quotient/section/2176/doc\\_5.pdf](http://www.reseauiq.qc.ca/uploaded/quotient/section/2176/doc_5.pdf) (Page consultée le 28 mars 2012).
- Smith, Brian C. 2011. Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy. 2<sup>e</sup> édition. Boca Raton, FL : CRC Press.
- Som, S. K. et A. Datta. 2008. Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes. *Progress in Energy and Combustion Science* 34(3): 351-376.
- Van Loo, S. et J. Koppejan. 2008. The handbook of biomass combustion and co-firing. Édité par Sjaak van Loo et Jaap Koppenjan. Sterling, VA. USA, 442 p.

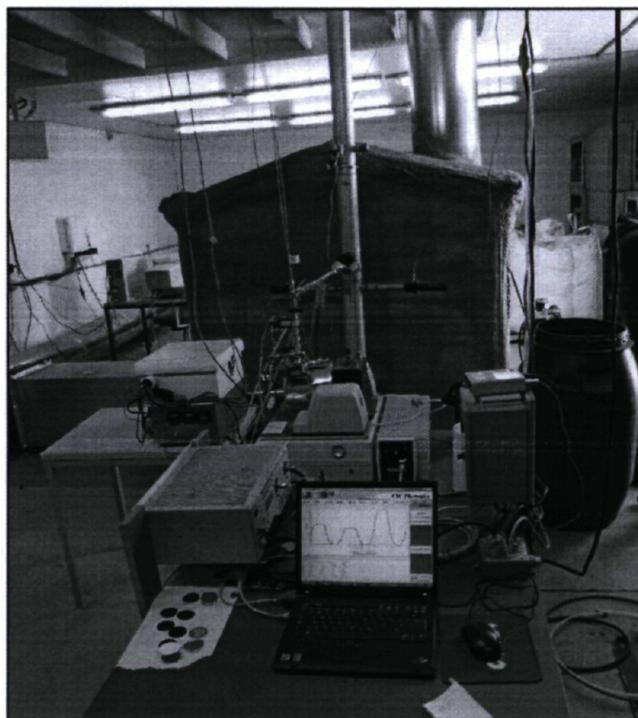
- Vassilev, S.V., D. Baxter, L.K. Anderson et C.G. Vassileva. 2009. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89:913-933.
- Verma, V.K., S. Bram, G. Gauthier et J. De Ruyck. 2010. Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads : part-2. *Biomass and Bioenergy* 35 : 272-279.
- Villeneuve, J., 2009. Normes de combustion de la biomasse au Québec, au Canada, aux Etats-Unis et en Europe. Revue de littérature. Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Williams, A., J.M. Jones, L. Ma et M. Pourkashanian. 2011. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 38: 113-137.



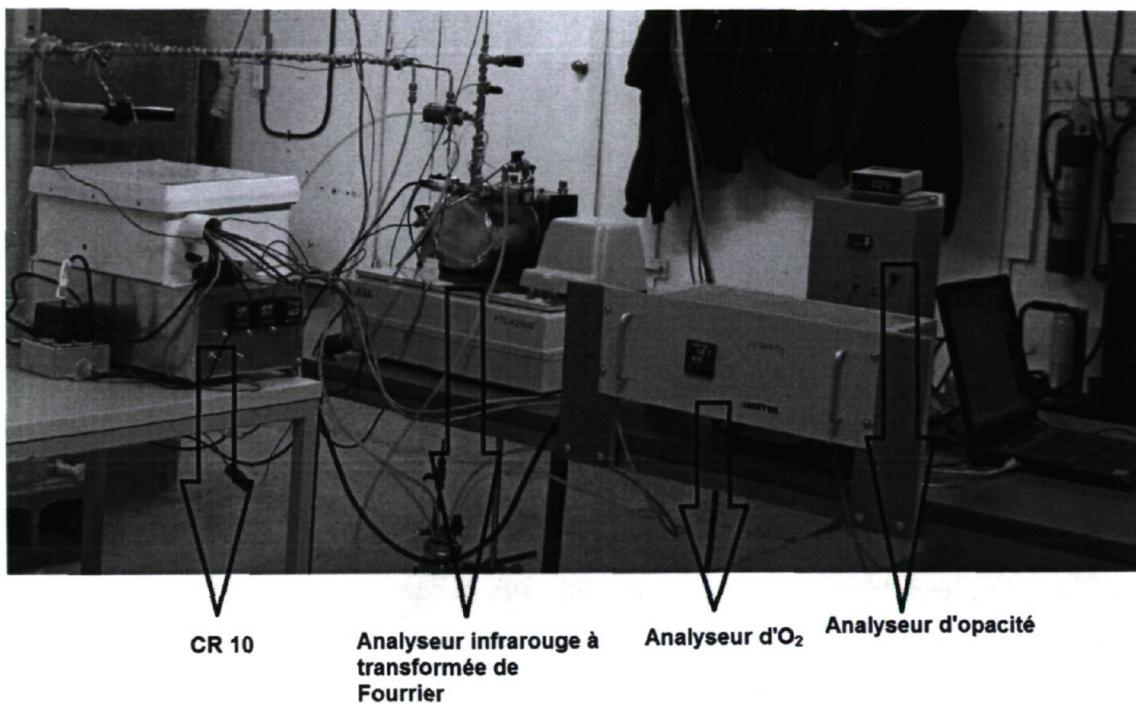
## **ANNEXE A. Photos du montage expérimental**



**Figure A1. Montage expérimental – vue de face et de côté**



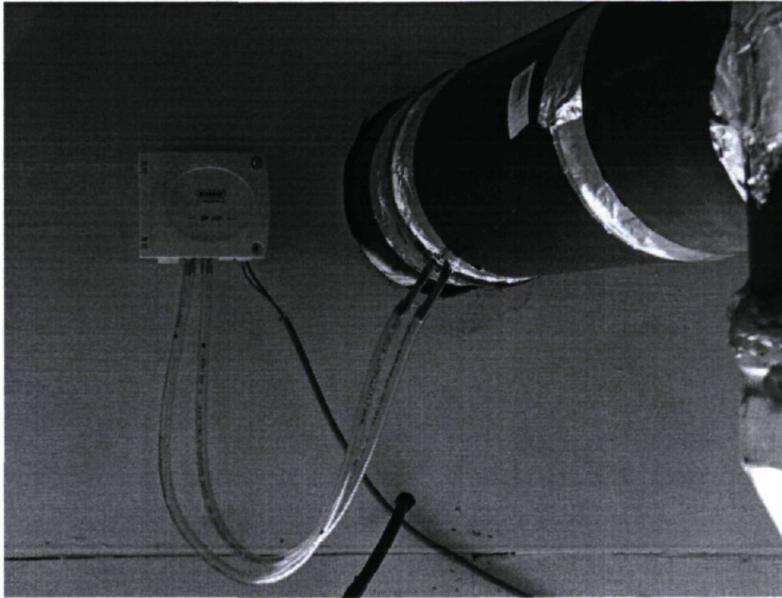
**Figure A2. Montage expérimental – vue de derrière (instruments d'analyse des gaz)**



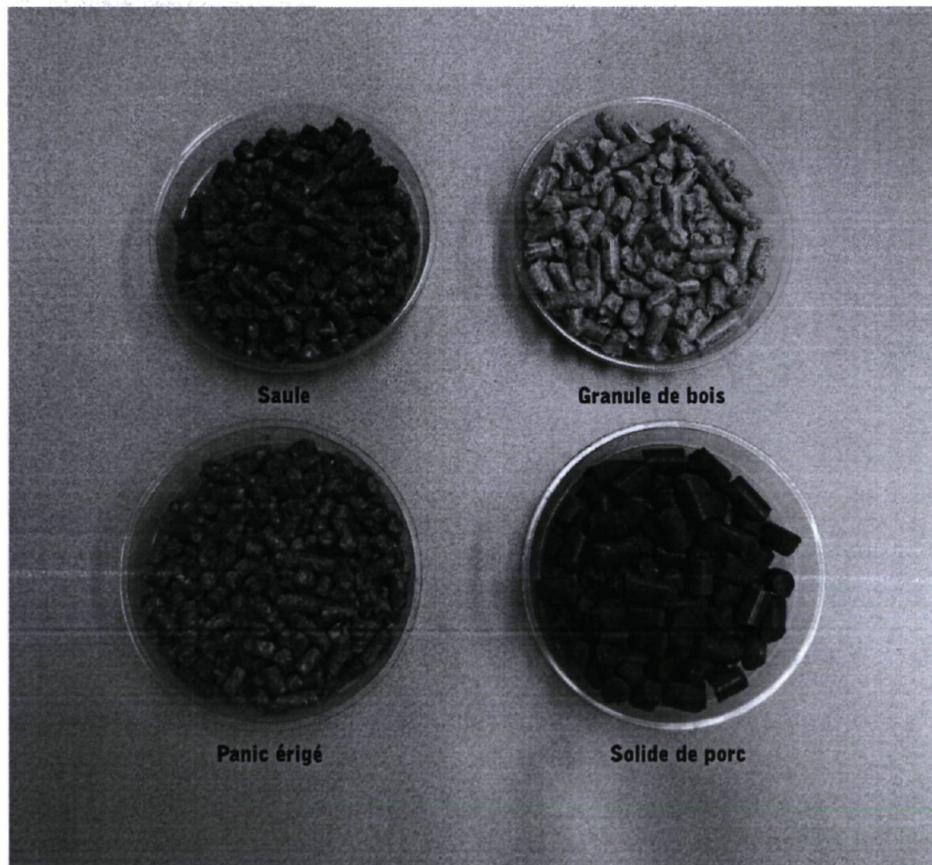
**Figure A3. Instruments d'analyse des gaz**



**Figure A4. Intersection entre les 2 cheminées**



**Figure A5. Capteur de pression Kimo branché aux bornes de l'iris 1.**



**Figure A6. Biomasses**

## **ANNEXE B. Protocole détaillé d'une journée de combustion**

**Tableau B1. Protocole d'une journée de combustion**

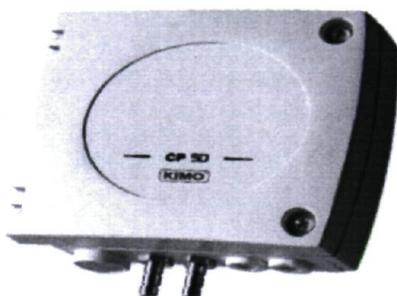
<b>Heure</b>	<b>Tâche</b>	<b>Durée</b>
<b>9h00</b>	Préparation, nettoyage des équipements et ramassage des cendres	1h00
<b>10h30</b>	Allumage, 1 <sup>re</sup> combinaison Puissance/Entrée d'air	1h00
<b>11h30</b>	Début de la prise de données	50 minutes
<b>12h20</b>	2 <sup>e</sup> combinaison Puissance/Entrée d'air, stabilisation	50 minutes
<b>13h10</b>	Prise de données	50 minutes
<b>14h00</b>	3 <sup>e</sup> combinaison Puissance/Entrée d'air, stabilisation	50 minutes
<b>14h50</b>	Prise de données	50 minutes
<b>15h40</b>	Éteignement du poêle	

**Protocole détaillé**

Voici le protocole simplifié des tâches à effectuer pour une journée de combustion type :

- 1- Nettoyer le poêle à l'aide des deux tiges situées sur le dessus et bien nettoyer les parois à l'aide d'un petit balai.
- 2- Enlever le pot et s'assurer de rejeter toutes les cendres dans le cendrier.
- 3- Retirer le cendrier et recueillir toutes les cendres qui sont restées dans le poêle à l'aide d'un balai.
- 4- Nettoyer le conduit de raccordement flexible et recueillir les cendres.
- 5- Ramoner la cheminée et recueillir les cendres volantes qui tombent au fond du "T".
- 6- Peser toutes les cendres et en conserver un échantillon.
- 7- Descendre le poêle sur la balance.
- 8- Mettre suffisamment de granules dans le poêle (environ 1 poche de 20 kg) et noter le poids.
- 9- Appuyer sur le bouton ON/OFF pour allumer le poêle.
- 10- L'ajuster au niveau d'intensité maximal (5).
- 11- Ajuster l'admission d'air au niveau désiré (1/3, 2/3 ou maximum)
- 12- Laisse une heure pour la stabilisation et continuer de suivre la procédure du tableau B1 avec le début de la prise de données jusqu'à l'éteignement du poêle.
- 13- Éteindre le poêle en appuyant sur le bouton ON/OFF et notez le poids.
- 14- Arrêter l'échantillonnage des gaz et la ventilation de la chambre calorimétrique.
- 15- Soulever le poêle de la balance et refermer la porte du cabanon.

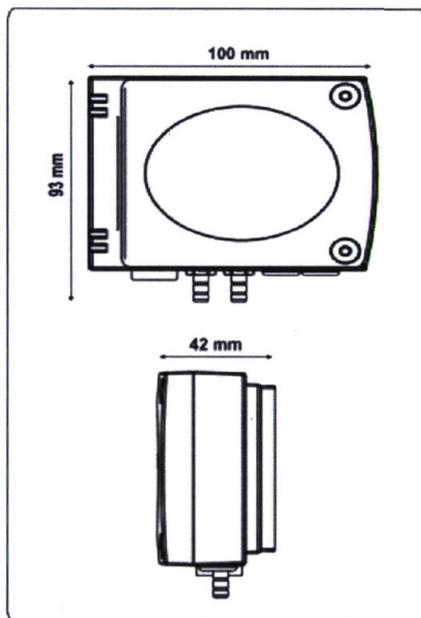
**ANNEXE C. Fiche technique du capteur de pression**



## Capteur de Pression CP 50

- Capteur transmetteur de pression différentielle type CP50
- Gamme de 0/+1000 Pa à -5000/+10 000 Pa
- Echelles intermédiaires et à zéro central configurables
- Sortie 0-10 V ou 4-20 mA, active, alimentation 24 Vac/Vdc (3-4 fils)
- Boîtier ABS IP 65, sans afficheur
- Montage ¼ tour sur platine de fixation murale

### ■ Encombrement du boîtier (Avec support de fixation)



### ■ Caractéristiques du Capteur

#### Pression

Principe de fonctionnement : L'élément sensible de type piézorésistif génère une tension proportionnelle à la pression appliquée au capteur.

Etendue de mesure	de -5000/+10 000 Pa (configurable)
Unités de mesure	Pa, mmH <sub>2</sub> O, mbar, InWg, mmHg
Exactitude *	±2% de la lecture ± 3 mmH <sub>2</sub> O
Temps de réponse	1/e (63%) 0,3 sec.
Autozéro	manuel par bouton poussoir
Type de fluide	air et gaz neutres
Surpression admissible	7500 mmH <sub>2</sub> O

### ■ Caractéristiques du Boîtier

Boîtier	ABS
Classe incendie	HB suivant UL94
Encombrement du boîtier	voir schéma ci-contre
Indice de Protection	IP65
Raccords	cannelés Ø 6,2 mm
Passes-fils	pour câbles Ø 7 mm maxi.
Poids	110 g

### ■ Spécifications Techniques

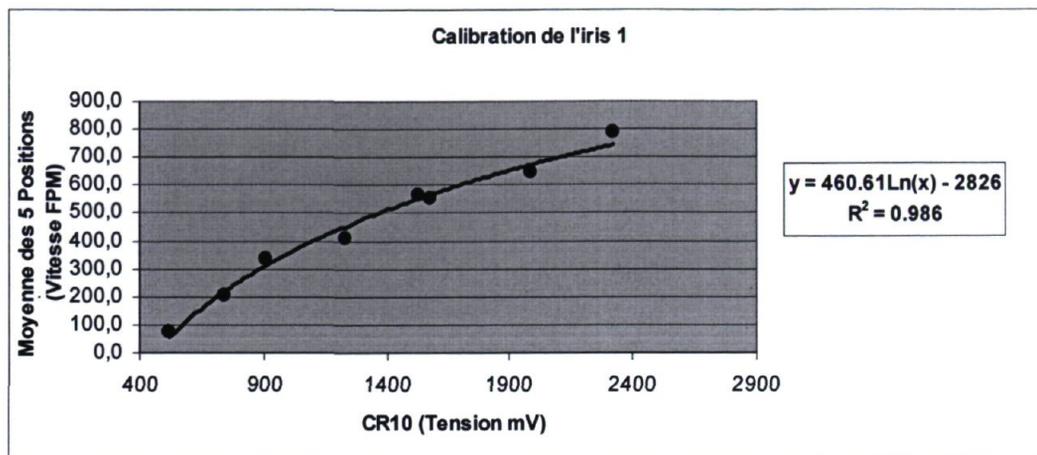
Sortie / Alimentation	capteur actif 0-10 V ou 4-20 mA (alim. 24 Vac/Vdc ± 10%), 3-4 fils charge maximale : 500 Ohms (4-20 mA) charge minimale : 1 K Ohms (0-10 V)
Consommation	2 VA (0-10V)
Compatibilité électro-magnétique	EN 61326
Raccordement électrique	bornier à vis pour câbles Ø 1,5 mm <sup>2</sup> maxi
Communication PC	cordon Kimo RS 232
Température d'utilisation	0 à +50°C
Température de stockage	-10 à +70°C
Environnement	air et gaz neutres

\*Établies dans des conditions de laboratoires, les exactitudes présentées dans ce document seront maintenues sous réserve d'appliquer les compensations d'étalonnage ou de se ramener à des conditions identiques.

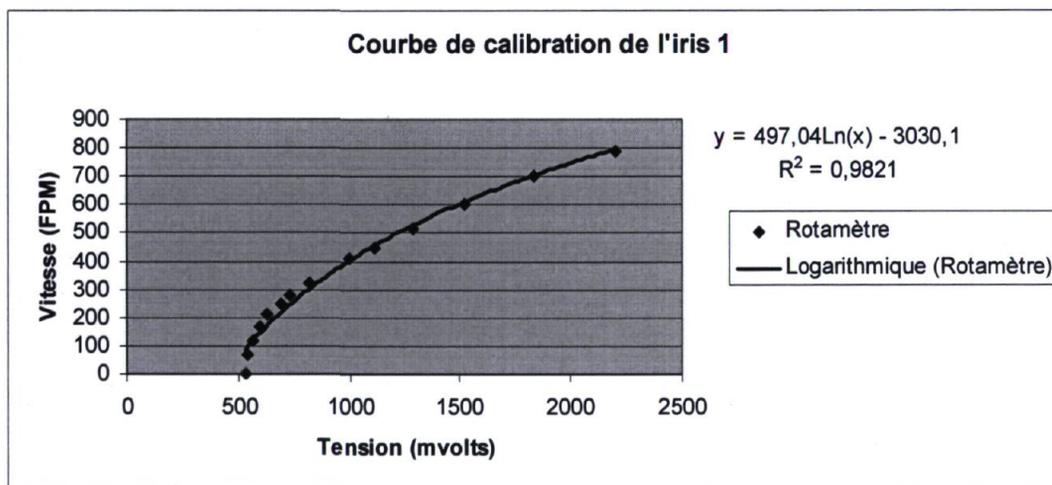
Figure C1. Fiche technique du capteur de pression (Kimo Instruments, 2011)

## **ANNEXE D. Courbes de calibration des iris**

- Iris 1 (dans la cheminée)

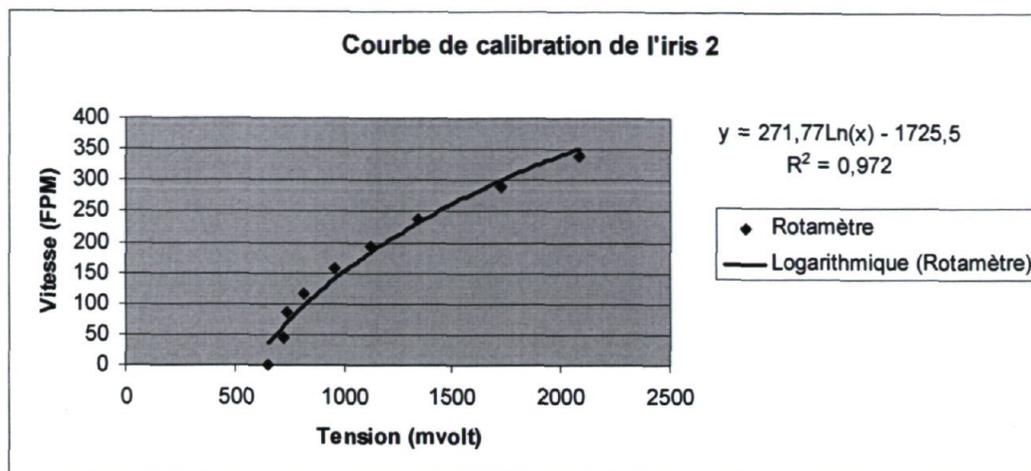


**Figure D1. Courbe de calibration de l'iris 1 (1<sup>re</sup> calibration)**

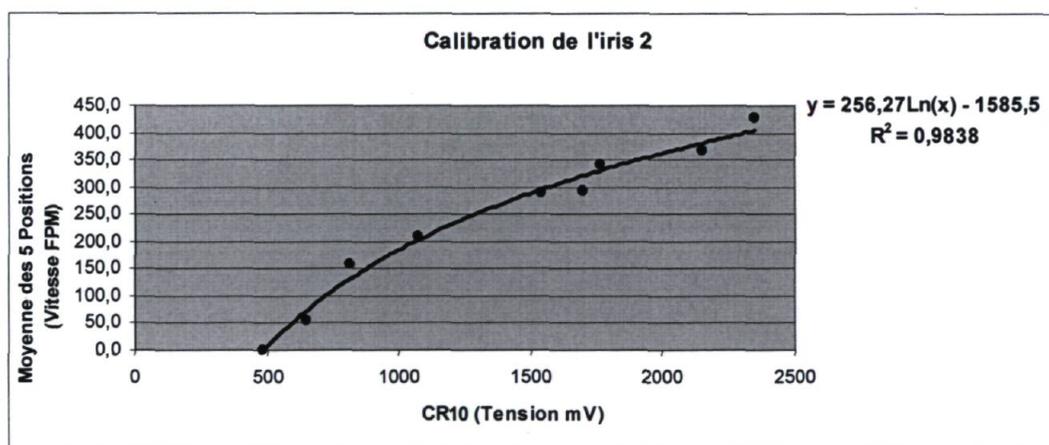


**Figure D2. Courbe de calibration de l'iris 1 (2<sup>e</sup> calibration)**

## Iris 2 (dans la cheminée)



**Figure D3. Courbe de calibration de l'iris 2 (1<sup>re</sup> calibration)**



**Figure D4. Courbe de calibration de l'iris 2 (2<sup>e</sup> calibration)**



## **ANNEXE E. Analyse de données des essais préliminaires**

**Tableau E1. Calcul des valeurs extrêmes lors des essais préliminaires**

SAULE	Puissance 3		
	A1	A2/3	A1/3
	407	197	247
	<b>645</b>	286	365
	292	310	308
	393	175	213
	267	545	467
	205	<b>923</b>	518
	155	365	465
	271	224	171
	559	192	250
		263	178
			518
			497
			371
			206
<b>Moyenne</b>	<b>355</b>	<b>348</b>	<b>341</b>
<b>Moyenne s.e.</b>	<b>319</b>	<b>284</b> ←	<b>341</b>
<b>Q1</b>	267	204	222
<b>Q3</b>	408	351	466
<b>Limite sup.</b>	620	572	833
<b>V.sup</b>	646	923	518
<b>Limite inf.</b>	55	-17	-145
<b>V. inf</b>	155	175	171

(A1) entrée d'Air maximale ; (A2/3) entrée d'air 2/3 ; (A1/3) entrée d'air 1/3.

Exemple de calcul (Sauge, Puissance 3, entrée d'air A1 (max)) :

$$\text{Limite inférieure} = Q_1 - (1,5 * (Q_3 - Q_1)) = 267 - (1,5 * (408 - 267)) = 55$$

$$\text{Limite supérieure} = Q_3 + (1,5 * (Q_3 - Q_1)) = 408 + (1,5 * (408 - 267)) = 620$$

La moyenne des valeurs situées entre la limite inférieure et la limite supérieure est calculée. Seule la valeur 645 est éliminée.

Moyenne sans les extrêmes = **319 ppm<sub>v</sub>**

- À l'entrée d'air 2/3, la valeur 923 est éliminée et la moyenne est donc égale à 284.
- À l'entrée d'air 1/3, aucune valeur n'est éliminée, la moyenne est donc de 341.

$284 < 319 < 341 \rightarrow$  L'entrée d'air 2/3 est donc sélectionnée pour procéder aux essais finaux du saule à la puissance 3.

## **ANNEXE F. Calcul des émissions (exemple)**

Voici un exemple de calcul pour les émissions de CH<sub>4</sub> de la combustion du bois à la puissance 5.

**Données brutes :**

**Tableau F1. Données brutes du 7 avril 2011**

Date/heure	Entrée d'air	Taux comb.	CH <sub>4</sub>
	taux	kg h <sup>-1</sup>	ppm <sub>v</sub>
2011-04-07 11:20	2/3	3,25	12,02
2011-04-07 11:25	2/3		10,53
2011-04-07 11:30	2/3	3,25	2,08
2011-04-07 11:35	2/3		4,61
2011-04-07 11:40	2/3	3,25	33,36
2011-04-07 11:45	2/3		23,05
2011-04-07 11:50	2/3	3,25	1,14
2011-04-07 11:55	2/3		4,17
2011-04-07 12:00	2/3	3,25	69,82
2011-04-07 12:05	2/3		4,03
2011-04-07 12:10	2/3	3,25	7,15
2011-04-07 12:15	2/3		49,89
<b>MOYENNE</b>	2/3	3,25	<b>18,5</b>

**Tableau F2. Données brutes du 26 avril 2011**

Date/heure	Entrée d'air	Taux comb.	CH <sub>4</sub>
	taux	kg h <sup>-1</sup>	ppm <sub>v</sub>
2011-04-26 11:30	2/3	3,24	2,93
2011-04-26 11:35			6,44
2011-04-26 11:40	2/3	3,24	26,07
2011-04-26 11:45			0,74
2011-04-26 11:50	2/3	3,24	3,31
2011-04-26 11:55			1,94
2011-04-26 12:00	2/3	3,24	100,12
2011-04-26 12:05			18,01
2011-04-26 12:10	2/3	3,24	0,85
2011-04-26 12:15			18,46
2011-04-26 12:20	2/3	3,24	
<b>MOYENNE</b>		3,24	<b>17,9</b>

### Calcul des émissions avec les données du 7 avril :

- **Étape 1 : vitesses aux iris en pieds minute<sup>-1</sup> (FPM)**

#### Calibration 1

$$V_{iris.1} = 460,61 \times \ln(T_{CR10}) - 2826$$

$$V_{iris.1} = 460,61 \times \ln(1148) - 2826 = 419,3 \text{ FPM}$$

$$V_{iris.2} = 256,27 \times \ln(T_{CR10}) - 1585,5$$

$$V_{iris.2} = 256,27 \times \ln(1440,9) - 1585,5 = 278,3 \text{ FPM}$$

#### Calibration 2

$$V_{iris.1} = 497,04 \times \ln(T_{CR10}) - 3030,1$$

$$V_{iris.1} = 497,04 \times \ln(1148) - 3030,1 = 471,9 \text{ FPM}$$

$$V_{iris.2} = 271,77 \times \ln(T_{CR10}) - 1725,5$$

$$V_{iris.2} = 271,77 \times \ln(1440,9) - 1725,5 = 251,1 \text{ FPM}$$

#### Moyennes :

$$V_{iris.1} = \frac{419,3 + 471,9}{2} = 445,6 \text{ FPM}$$

$$V_{iris.2} = \frac{278,3 + 251,1}{2} = 264,7 \text{ FPM}$$

- **Étape 2 : calcul du débit de calibration**

$$Q_{iris.1} = V \times A = V \times (\pi \times r_{chem}^2) = 445,6 \text{ pieds}^3/\text{min} \times (\pi \times (0,25 \text{ pieds})^2) = 87,5 \text{ CFM}$$

$$Q_{iris.2} = V \times A = V \times (\pi \times r_{chem}^2) = 264,7 \text{ pieds}^3/\text{min} \times (\pi \times (0,25 \text{ pieds})^2) = 52,0 \text{ CFM}$$

$$Q_{iris.1} (m^3 / \text{min}) = Q_{CFM} \times 0,0283168 = 87,5 \times 0,0283168 = 2,48 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$Q_{iris.2} (m^3 / \text{min}) = Q_{CFM} \times 0,0283168 = 52,0 \times 0,0283168 = 1,47 \text{ m}^3 / \text{min}$$

- **Étape 3 : température approximative aux iris**

$$T_{réelle, iris 1} = \frac{T_{fumée} \times Q_{fumée, cal} + T_{che2} \times Q_{che2, cal}}{Q_{che1, cal}} = \frac{185 \times 1,01}{2,48} + \frac{17 \times 1,47}{2,48} = 95^{\circ} C$$

$T_{réelle, iris 2}$  = Température à l'entrée d'air frais.

- **Étape 4: calcul du débit réel**

$$Q_{réel, iris 1} = Q_{cal} \times \sqrt{(T_{réel} + 273)/(273 + T_{cal})} = 2,48 \times \sqrt{(95 + 273)/(273 + 15)} = 2,80 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$Q_{réel, iris 2} = Q_{cal} \times \sqrt{(T_{réel} + 273)/(273 + T_{cal})} = 1,47 \times \sqrt{(8 + 273)/(273 + 15)} = 1,45 \text{ m}^3 / \text{min}$$

- **Étape 5: calcul du débit sec à TPN (273 K et 1 atm.)**

**Iris 1 :**

$$Q_{sec, TPN} = Q_{réel} \frac{273,15}{(273,15 + T_{réelle})} \times \frac{P_{réelle}}{1atm} \times (1 - \text{fraction vap. d'eau})$$

$$Q_{iris1(sec, TPN)} = 2,80 \times \frac{273,15}{(273,15 + 95)} \times \frac{1atm}{1atm} \times (1 - 0,0292) = 2,01$$

**Iris 2 :**

$$Q_{sec, TPN} = Q_{réel} \frac{273,15}{(273,15 + T_{réelle})} \times \frac{P_{réelle}}{1atm} \times (1 - \text{fraction vap. d'eau})$$

$$Q_{iris2(sec, TPN)} = 1,45 \times \frac{273,15}{(273,15 + 7,8)} \times \frac{1atm}{1atm} \times (1 - 0,0039) = 1,40$$

**Débit de fumée :**

$$Q_{fumée} = Q_{iris1(sec, TPN)} - Q_{iris2(sec, TPN)}$$

$$Q_{fumée} = 2,01 - 1,40 = 0,61 \text{ m}^3 / \text{min}$$

- **Étape 7: calcul des émissions**

$$\dot{E}missions \text{ (g/kg)} = \frac{\frac{18,5}{1000000} \times 1,29 \times 0,61 \times \left( \frac{16,043}{29,95} \times 60 \times 1000 \right)}{3,25} = 0,144 \text{ g/kg}$$

**Émissions du 26 avril :**

Suivant la même procédure que ci-dessus :

$$\dot{E}missions \text{ (g/kg)} = \frac{\frac{17,9}{1000000} \times 1,29 \times 0,65 \times \left( \frac{16,043}{29,95} \times 60 \times 1000 \right)}{3,25} = 0,149 \text{ g/kg}$$

**Moyenne (bois, puissance 5) :**

$$\dot{E}missions \text{ (g/kg)} = \frac{0,144 + 0,149}{2} = 0,146 \text{ g/kg}$$



## **ANNEXE G. Analyse statistique**

- **Fichier SAS complet des résultats de l'analyse statistique de méthane (CH<sub>4</sub>)**

**Tableau G1. Tableau des données pour l'analyse statistique (en g kg<sup>-1</sup>)**

Obs	Date	Biomasse	Puissance	Entrée d'air	CH <sub>4</sub>	ln(CH <sub>4</sub> +0,0005)
1	2011-03-30	Bois	5	2/3	.	.
2	2011-04-04	Panic	2	1	0,1025	-2,2682
3	2011-04-04	Panic	3	1/3	0,0071	-4,8929
4	2011-04-04	Panic	5	2/3	0,0080	-4,7677
5	2011-04-05	FSLP	2	1	0,0376	-3,2571
6	2011-04-05	FSLP	3	1	0,0044	-5,4037
7	2011-04-05	FSLP	5	1	0,0522	-2,9469
8	2011-04-06	Saule	2	1/3	0,0250	-3,6691
9	2011-04-06	Saule	3	1	0,0146	-4,1669
10	2011-04-06	Saule	5	1/3	1,7530	0,5616
11	2011-04-07	Bois	2	1	0,0595	-2,8218
12	2011-04-07	Bois	3	1/3	0,0055	-5,0360
13	2011-04-07	Bois	5	2/3	0,1435	-1,9345
14	2011-04-11	Saule	2	1/3	0,0602	-2,8051
15	2011-04-11	Saule	3	2/3	0,0069	-4,8929
16	2011-04-11	Saule	5	1	0,2255	-1,4850
17	2011-04-12	Panic	2	2/3	0,0408	-3,1821
18	2011-04-12	Panic	3	1/3	0,0000	-7,6009
19	2011-04-12	Panic	5	2/3	0,0006	-6,5023
20	2011-04-13	Saule	2	1/3	0,0194	-3,9373
21	2011-04-13	Saule	3	2/3	0,0028	-5,6550
22	2011-04-13	Saule	5	1	0,0619	-2,7726
23	2011-04-14	FSLP	2	1	0,0128	-4,3051
24	2011-04-14	FSLP	3	1	0,0004	-7,6009
25	2011-04-14	FSLP	5	1	0,0337	-2,6242
26	2011-04-26	Bois	2	1	0,2087	-1,5630
27	2011-04-26	Bois	3	1/3	0,0036	-5,4037
28	2011-04-26	Bois	5	2/3	0,1490	-1,9005
29	2011-04-27	FSLP	2	1	0,2040	-1,5872
30	2011-04-27	FSLP	3	1	0,0009	-6,5023
31	2011-04-27	FSLP	5	1	0,0337	-3,3668

32	2011-04-28	Panic	2	2/3	0,0304	-3,4900
33	2011-04-28	Panic	3	1/3	0,0000	-7,6009
34	2011-04-28	Panic	5	2/3	0,0009	-6,5023

**Tableau G2. Nombre d'observations et écart type**

Obs	date	biomasse	LOG_ch4	Nb	écart_type
1	2011-03-30	Bois	.	0	.
2	2011-04-04	Panic	-2,5836	3	2,0091
3	2011-04-05	FSLP	-2,7613	3	1,4276
4	2011-04-06	Saule	-1,4639	3	2,3233
5	2011-04-07	Bois	-2,3796	3	1,6057
6	2011-04-11	Saule	-2,1540	3	1,6921
7	2011-04-12	Panic	-5,1652	3	3,3132
8	2011-04-13	Saule	-3,1020	3	1,4663
9	2011-04-14	FSLP	-3,8379	3	2,3457
10	2011-04-26	Bois	-2,1666	3	2,4504
11	2011-04-27	FSLP	-2,9353	3	2,9310
12	2011-04-28	Panic	-5,1385	3	2,9818

**Tableau G3. Informations sur le modèle**

<b>Variable dépendante</b>	LOG_ch4
<b>Structure de Covariance</b>	Symétrie composée
<b>Effet Sujet</b>	Date (biomasse)
<b>Méthode d'estimation</b>	REML
<b>Méthode (Variance résiduelle)</b>	Profile
<b>Méthode (SE effets fixes)</b>	Model-Based
<b>Méthode (degrés de liberté)</b>	Satterthwaite

Tableau G4. Tests de comparaisons multiples - contrastes

ESTIMATION					
	Estimation	Erreur type	D.l.	t	Pr >  t
<b>Puissance min, Bois VS FSLP</b>	0,8574	0,9444	16,1	0,91	0,3773
<b>Puissance min,Bois VS Panic</b>	0,7877	0,9444	16,1	0,83	0,4164
<b>Puissance min,Bois VS Saule</b>	1,2781	0,9444	16,1	1,35	0,1946
<b>Puissance min,FLSP VS Panic</b>	-0,06969	0,8447	16,1	-0,08	0,9353
<b>Puissance min,FSLP VS Saule</b>	0,4207	0,8447	16,1	0,5	0,6251
<b>Puissance min,Panic VS Saule</b>	0,4904	0,8447	16,1	0,58	0,5695
<b>Puissance med, Bois VS FSLP</b>	1,2825	0,9444	16,1	1,36	0,1932
<b>Puissance med,Bois VS Panic</b>	1,4784	0,9444	16,1	1,57	0,1369
<b>Puissance med,Bois VS Saule</b>	-0,3149	0,9444	16,1	-0,33	0,7431
<b>Puissance med,FLSP VS Panic</b>	0,1959	0,8447	16,1	0,23	0,8195
<b>Puissance med,FSLP VS Saule</b>	-1,5974	0,8447	16,1	-1,89	0,0767
<b>Puissance med,Panic VS Saule</b>	-1,7933	0,8447	16,1	-2,12	0,0500
<b>Puissance max, Bois VS FSLP</b>	1,0618	0,9444	16,1	1,12	0,2773
<b>Puissance max,Bois VS Panic</b>	4,0066	0,9444	16,1	4,24	0,0006 *
<b>Puissance max,Bois VS Saule</b>	-0,6855	0,9444	16,1	-0,73	0,4783
<b>Puissance max,FLSP VS Panic</b>	2,9448	0,8447	16,1	3,49	0,003 *
<b>Puissance max,FSLP VS Saule</b>	-1,7473	0,8447	16,1	-2,07	0,055
<b>Puissance max,Panic VS Saule</b>	-4,6921	0,8447	16,1	-5,55	<,0001 *

\*Test significatif au niveau  $\alpha = 0,05$ ; d.l.: degrés de liberté.; t : valeur t du test de Student.

Tableau G5 Comparaisons multiples sur les moyennes

Differences of Least Squares Means							
Effet	biomasse	_biomasse	Estimé	Erreur type	D.l.	t	Pr >  t
<b>biomasse</b>	Bois	FSLP	1,0672	0,7269	7	1,47	0,1855
<b>biomasse</b>	Bois	Panic	2,0909	0,7269	7	2,88	0,0238 *
<b>biomasse</b>	Bois	Saule	0,09258	0,7269	7	0,13	0,9022
<b>biomasse</b>	FSLP	Panic	1,0237	0,6502	7	1,57	0,1594
<b>biomasse</b>	FSLP	Saule	-0,9747	0,6502	7	-1,5	0,1775
<b>biomasse</b>	Panic	Saule	-1,9983	0,6502	7	-3,07	0,018 *

\* Test significatif au niveau  $\alpha = 0,05$

Tableau G6 Tests sur les effets fixes

Tests of Effect Slices					
Effet	Puissance	D.l. num.	D.l. dén.	F	Pr > F
Puissance*biomasse	2	3	16,1	0,62	0,6148
Puissance*biomasse	3	3	16,1	2,15	0,1340
Puissance*biomasse	5	3	16,1	11,60	0,0003

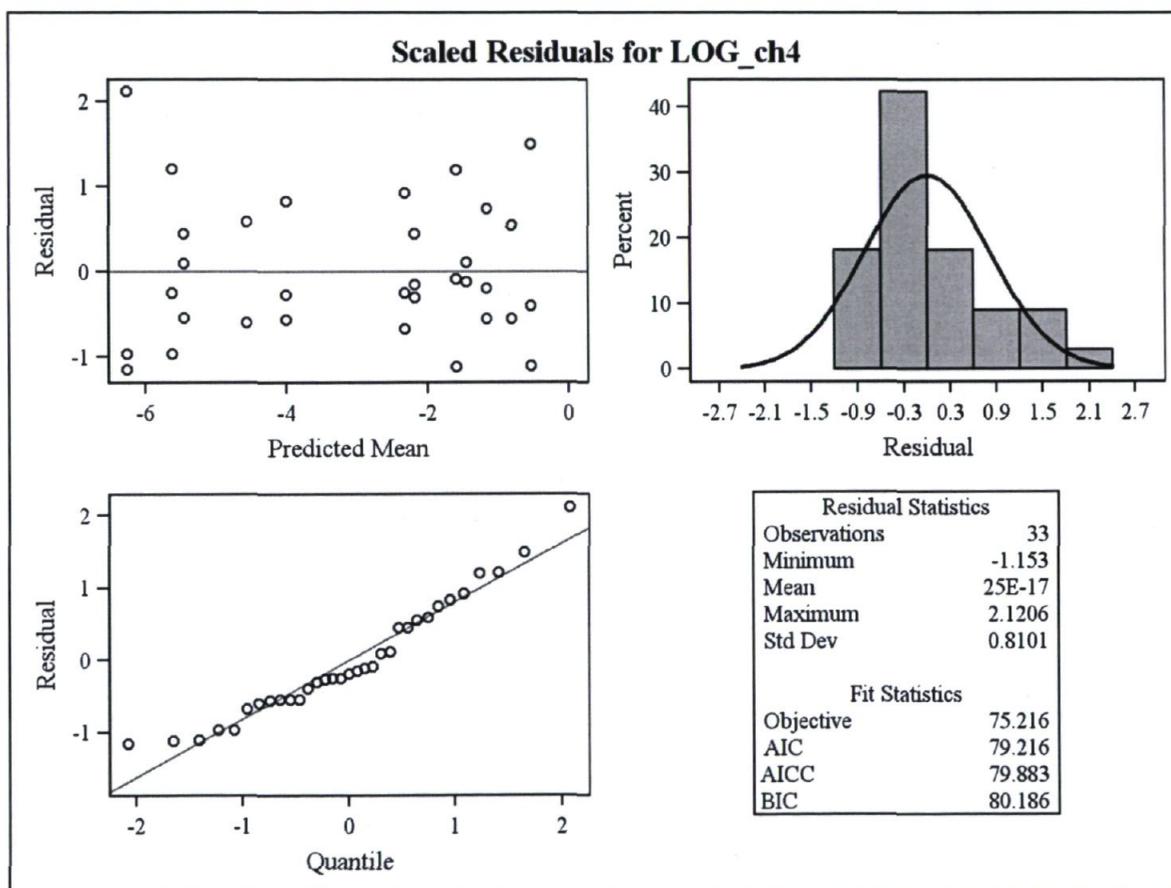


Figure G1. Résidus du modèle



## **ANNEXE H. Analyse des cendres**

Tableau H1. Propriétés des cendres récupérées suite à la combustion des biomasses

Paramètre	Bois		FSLP		Panic		Saule	
<b>Cendres récupérées (%)</b>	0,9%		10,2%		4,1%		4,1%	
<b>Type de cendres</b>	Vol.	Grille	Vol.	Grille	Vol.	Grille	Vol.	Grille
<b>Cendre / Cendres totales</b>	2,8	97,2	1,0	99,0	2,5	97,5	2,0	98,0
<b>Densité apparente (g ml<sup>-1</sup>)</b>	-	0,26	-	0,52	-	0,24	-	0,38
<b>Densité réel (g ml<sup>-1</sup>)</b>	-	0,71	-	0,95	-	0,74	-	0,92
<b>Volatils (%)</b>	30,6	51,7	26,3	12,4	18,7	3,7	25,3	23,9
<b>Fertilisants (% b.s.)</b>								
<b>N</b>	0,6	0,3	0,9	0,3	0,4	0,1	0,5	0,3
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,9	1,1	2,9	3,8	1,4	1,0	1,5	1,0
<b>MgO</b>	5,8	3,7	6,9	8,0	3,8	3,7	5,1	3,6
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	9,5	1,8	12,8	16,4	4,6	3,8	7,7	5,1
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,6	5,0	5,1	11,0	4,1	5,2	4,1	11,0
<b>CaO</b>	24,8	19,7	20,4	22,0	16,5	16,2	29,3	30,2
<b>Métaux lourds (% b.s.)</b>								
<b>Ti</b>	0,0779	0,0420	0,0719	0,0659	0,1379	0,1559	0,0839	0,0779
<b>V</b>	0,0028	0,0000	0,0028	0,0028	0,0000	0,0028	0,0028	0,0000
<b>Cr</b>	0,0468	0,1716	0,0312	0,0312	0,0260	0,1560	0,0312	0,0364
<b>Co</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Ni</b>	0,0236	0,0786	0,0157	0,0236	0,0079	0,3850	0,0157	0,0157
<b>Cu</b>	0,0479	0,0320	0,0639	0,1678	0,0240	0,0160	0,0479	0,0160
<b>Zn</b>	1,0043	0,1366	0,7793	0,2169	0,3615	0,0562	0,6267	0,1928
<b>Sr</b>	0,0592	0,0507	0,0507	0,0423	0,0423	0,0338	0,0761	0,0761
<b>Zr</b>	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0148
<b>Nb</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Ba</b>	0,0896	0,1343	0,0537	0,0179	0,0627	0,0448	0,0896	0,0896
<b>Pb</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Autres (% b.s.)</b>								
<b>C</b>	14	41,7	11,5	8,2	9,6	2,6	10,7	13,1
<b>Cl</b>	3,4	0,1	3,5	1,2	1,3	0,1	1,4	0,1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,3	1,5	2,0	2,0	3,8	4,5	2,6	3,1
<b>SiO<sub>2</sub></b>	11,4	6,7	13,0	10,8	41,9	55,2	16,4	17,2
<b>SO<sub>3</sub></b>	4,4	1,4	3,9	6,1	1,5	0,3	3,2	1,7
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,7	4,2	4,3	5,7	2,0	4,2	2,4	1,7
<b>MnO</b>	0,65	1,79	0,46	0,29	0,40	0,25	0,46	0,30

Vol : cendres volantes.



