

Conception et caractérisation d'un montage expérimental de combustion d'huile de pyrolyse

Par

Salha ELCADHI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. SC. A.

MONTREAL, LE 30 MARS 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Salha ELCADHI, 2017



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Patrice Seers, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Godbout, co-directeur de mémoire
Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement

M. François Garnier, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Romain Lemaire, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 MARS 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, le professeur Patrice SEERS, pour m'avoir accompagné le long de ce travail, pour les efforts et le temps qu'il m'a accordé et pour ses conseils pertinents.

Je tiens aussi à remercier profondément mon co-directeur de recherche, le professeur Stéphane Godbout, avant tout pour m'avoir confié ce travail de recherche ainsi que pour sa confiance et son amabilité. De même je tiens à remercier Joahnn Palacios pour son immense disponibilité et son soutien tout le long du projet. Je n'oublie pas Patrick Brassard, Olga Solomatnikova, Étienne Le Roux et tous ceux que j'ai connu à l'IRDA-Québec.

J'aimerais également exprimer ma grande considération à l'ensemble des ingénieurs et techniciens de l'ÉTS, en particulier Éric Marcoux, Michel Drouin, Michel Orsini, Radu Romanica, Serge Plamondon et Michaël Dubois pour leur généreux partage d'expertise.

Mes remerciements vont à tous mes collègues de l'équipe TFT et en particulier Mohamed Abdelouahab Taifour pour son importante contribution à l'élaboration de ce travail, Denis Lapalme, Pascal Tétrault, Mohamed Chouak, Sitraka Razanamparany, Jonathan Brulatout et Delphine Menage pour leurs conseils, sympathie et tous ce que nous avons partagés. J'ai apprécié le travail avec vous.

Enfin, je remercie le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de la Tunisie, la Mission Universitaire de Tunisie en Amérique du Nord, l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement et le Laboratoire de Thermofluides pour le Transport pour les bourses qu'ils m'ont octroyées et toutes les formes de support financier qu'ils m'ont accordées.

Je dédie ce travail à ma famille. Votre amour me comble de bonheur et de vie. Je vous adore.

CONCEPTION ET CARACTÉRISATION D'UN MONTAGE EXPÉRIMENTAL DE COMBUSTION D'HUILE DE PYROLYSE

Salha ELCADHI

RÉSUMÉ

Ce travail a pour objectif de développer et de valider un montage expérimental permettant d'étudier la combustion de la bio-huile et de caractériser ses émissions polluantes. Il s'inscrit dans le cadre d'un projet global visant à valoriser les résidus agricoles des entreprises serricoles québécoises en bio-huile par voie de pyrolyse rapide et à brûler cette bio-huile dans les chaudières de chauffage des serres présentement utilisées. Dans l'optique d'assurer une transition énergétique et de diminuer les coûts d'adaptation de ces chaudières, il a été convenu que le mélange bio-huile et diesel constitue une alternative prometteuse.

Le banc d'essais de combustion a été conçu en considérant les caractéristiques physico-chimiques de la bio-huile ainsi que les diverses techniques pouvant améliorer la combustion (*e.g.* préchauffage de l'air de combustion ainsi que de la bio-huile, type d'injection, génération de Swirl). L'assemblage du montage expérimental a été réalisé au laboratoire TFT de l'ÉTS. Son étalonnage a été effectué en incluant les différentes mesures préliminaires et méthodes de calcul nécessaires à la collecte des résultats de la combustion.

La caractérisation du montage expérimental a été établie à travers une série de tests de combustion de diesel. Les paramètres de fonctionnement étudiés sont : le débit d'air d'atomisation, la position de prise des échantillons, le nombre de Swirl et le débit du diesel. Les émissions polluantes gazeuses (CO_2 , CO , C_3H_8 , HCHO , NO et NO_2) ont été analysées en utilisant un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Cette caractérisation a permis de comprendre l'influence des paramètres de combustion ainsi que la tendance générale des émissions polluantes gazeuses. Les résultats expérimentaux montrent qu'un Swirl maximal (*i.e.* un écoulement complètement tangentiel) permet d'améliorer la qualité de la combustion. Ainsi, un état de référence correspondant à la meilleure combustion avec un minimum d'imbrûlés a été déterminé pour un nombre de Swirl maximal et un débit de diesel de 0.5 LPH. Enfin, une analyse des particules émises sous les conditions de l'état de référence a été effectuée en utilisant un spectromètre de mobilité électrique (SMPS).

Une méthode d'émulsification bio-huile/diesel ainsi qu'une procédure expérimentale permettant d'étudier sa combustion ont été proposées. Les conditions de l'état de référence ainsi déterminé peuvent être utilisées pour la combustion des mélanges bio-huile/diesel.

Mots-clés : Combustion, huile de pyrolyse, diesel, analyse des gaz, analyse des particules.

EXPERIMENTAL RIG DESIGN AND CHARACTERIZATION FOR BIO-OIL COMBUSTION

Salha ELCADHI

ABSTRACT

This work objective is to develop and validate an experimental set-up enabling the combustion of bio-oil as well as the characterization of its pollutant emissions. It is part of a global project aiming at recycling Quebec's greenhouses agricultural residues to produce a bio-oil and at burning this bio-oil in boilers used to heat the greenhouses. In order to ensure an energy transition and to reduce the conversion costs of these boilers, it was agreed that a mixture of bio-oil and diesel could be considered as a promising alternative.

The combustion test rig has been designed taking into account the bio-oil characteristics and the various techniques that can improve its combustion (*e.g.* preheating of combustion air as well as bio-oil, type of injection, generation of Swirl). The experimental set-up assembly was carried out in the TFT laboratory at ÉTS. Its calibration was carried out and include preliminary measurements and calculation methods required to collect combustion's results.

The characterization of the experimental set-up has been achieved through a series of diesel combustion tests. The operation parameters being studied were the atomization air flow rate, the probe sampling position, the Swirl number and the diesel flow rate. The gaseous pollutant emissions (CO_2 , CO , C_3H_8 , HCHO , NO and NO_2) were analyzed using a Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR). This characterization allowed understanding the influence of combustion parameters variation as well as the gaseous pollutant emissions overall tendency. The experimental results show that a maximum Swirl (*i.e.* completely tangential flow) improves the quality of combustion. Thus, a reference state allowing a better combustion with a minimum of unburned gaseous species has been found for a maximum Swirl number and a diesel flow rate of 0.5 LPH. Finally, an analysis of the particulate matters emitted under the reference stage conditions was carried out using a Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer (SMPS).

A bio-oil/diesel emulsion method and a combustion experimental procedure were proposed. The reference state conditions can be used for the future bio-oil/diesel blends combustion.

Keywords : Combustion, pyrolysis oil, diesel, gas analysis, particle analysis.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Valorisation de la biomasse et pyrolyse rapide.....	6
1.3 Propriétés caractéristiques des bio-huiles	7
1.3.1 Généralités sur les propriétés caractéristiques des bio-huiles	7
1.3.2 Teneur en eau	10
1.3.3 Teneur en oxygène	10
1.3.4 Teneur en solides.....	11
1.3.5 Viscosité	11
1.3.6 Structure macroscopique et homogénéité.....	12
1.3.7 Durée de vieillissement	12
1.3.8 Commercialisation et spécification de l'huile de pyrolyse	13
1.4 Combustion de l'huile de pyrolyse	14
1.4.1 Procédures de mise en marche et d'arrêt spécifiques.....	14
1.4.2 SO _x	15
1.4.3 CO _x et HC.....	15
1.4.4 NO _x	17
1.4.5 Particules solides	19
1.5 Sommaire, contexte et objectifs du projet.....	19
CHAPITRE 2 CHOIX, CONCEPTION ET ASSEMBLAGE DU BRÛLEUR.....	23
2.1 Introduction.....	23
2.2 Montage expérimental	23
2.2.1 Description générale.....	23
2.2.2 Brûleur à écoulement Swirl	24
2.2.2.1 Caisson d'air et chambre de combustion.....	25
2.2.2.2 Swirl	27
2.2.2.3 Injecteur.....	28
2.2.2.4 Flamme pilote.....	33
2.2.3 Systèmes d'alimentation et instrumentation du montage.....	34
2.3 Systèmes de mesure des émissions polluantes de la combustion	36
2.3.1 Analyse des polluants gazeux.....	36
2.3.2 Analyse des particules	40
2.4 Mélange huile de pyrolyse-diesel	44
2.4.1 Valorisation de l'huile de pyrolyse	44
2.4.2 Préparation de l'émulsion.....	47
2.5 Procédure expérimentale.....	48
2.6 Sommaire	49

CHAPITRE 3 ÉTALONNAGE DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL	51
3.1 Introduction.....	51
3.2 Débit du ventilateur.....	51
3.3 Débit de combustible	52
3.4 SMD.....	53
3.5 Correction du taux d'oxygène.....	54
3.6 Mesures de répétabilité	55
3.7 Analyse de particules	59
3.7.1 Influence des paramètres de fonctionnement du SMPS	61
3.7.1.1 Débit d'échantillonnage	61
3.7.1.2 Temps de balayage	62
3.7.2 Influence des émissions des mesures de combustion précédentes	64
3.8 Sommaire	65
CHAPITRE 4 COMBUSTION DU DIESEL	67
4.1 Introduction.....	67
4.2 Paramètres variables - Paramètres fixés	67
4.3 Effet de la variation du débit d'air d'atomisation	68
4.4 Position de prise des échantillons	70
4.5 Effet de variation du Swirl.....	71
4.6 Effet de la variation du débit du diesel	74
4.7 Vérification de l'effet du Swirl et bilan	77
4.8 Analyse des particules.....	78
4.9 Sommaire	79
CONCLUSION.....	81
BIBLIOGRAPHIE.....	85

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Propriétés de quelques bio-huiles, du diesel et de l'éthanol.....9
Tableau 1.2	Spécifications des huiles de pyrolyse.....14
Tableau 2.1	Paramètres du générateur de Swirl.....28
Tableau 2.2	Variation de S en fonction de l'angle d'ouverture.....28
Tableau 3.1	Paramètres du test de répétabilité.....55
Tableau 3.2	Coefficient de variation des espèces analysées.....59
Tableau 3.3	Caractéristiques du SMPS utilisé.....61
Tableau 3.4	Effet de la variation du temps de balayage ascendant.....63
Tableau 4.1	Paramètres de la combustion.....68
Tableau 4.2	Paramètres employés lors du calcul du SMD.....68
Tableau 4.3	Variation de la richesse en fonction du débit du diesel.....74
Tableau 4.4	Paramètres de l'état de référence.....78

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Représentation schématique du brûleur à écoulement Swirl.....24
Figure 2.2	Coupe transversale du générateur de Swirl.26
Figure 2.3	Injecteur Delavan. Adaptée de (Delavan, 2000).....31
Figure 2.4	Injection et diverses hauteurs.32
Figure 2.5	Débit du diesel en fonction de la hauteur entre l'absorption et l'injection.....33
Figure 2.6	Photographie de la torche. Adaptée de (Hoke Torche, 2016)34
Figure 2.7	Dispositif expérimental.34
Figure 2.8	Éléments de base du FTIR.....37
Figure 2.9	Spectre de l'échantillon et spectre à vide. Adaptée de (ABB, 2016).39
Figure 2.10	Classificateur électrostatique et analyseur différentiel de mobilité. Adaptée de (TSI, June 2010).41
Figure 2.11	Compteur de particules ultrafines à base d'eau. Adaptée de (TSI, Avril 2005).43
Figure 2.12	Mélange huile de pyrolyse-diesel.46
Figure 2.13	Émulsion huile de pyrolyse/diesel.....48
Figure 3.1	Profil de vitesse à la sortie du ventilateur.....52
Figure 3.2	Variation temporelle du débit du diesel.....53
Figure 3.3	Évolution temporelle des températures.56
Figure 3.4	Mesures de répétabilité et évolution temporelle de T57
Figure 3.5	Mesures de répétabilité et évolution temporelle des émissions gazeuses.58
Figure 3.6	Distribution des particules selon la durée du balayage ascendant.....64
Figure 4.1	Variation du SMD.69

Figure 4.2	Effet de la position d'échantillonnage sur les émissions en C.	70
Figure 4.3	Effet de la position d'échantillonnage sur les émissions en N.	71
Figure 4.4	Effet de la position d'échantillonnage sur l'oxygène.	71
Figure 4.5	Effet du Swirl sur les émissions en C.	72
Figure 4.6	Effet du Swirl sur les émissions en N.	73
Figure 4.7	Effet du débit du diesel sur les émissions en C.	75
Figure 4.8	Effet du débit du diesel sur les émissions en N.	76
Figure 4.9	Effet du débit du diesel sur la température.	77
Figure 4.10	Vérification de l'effet du Swirl sur les émissions en C.	77
Figure 4.11	Vérification de l'effet du Swirl sur les émissions en N.	78
Figure 4.12	Distribution des particules.	79

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIM	Aerosol Instrument Manager
ALR	Air to Liquid Ratio
ASTM	American Society for Testing and Materials
BH	Bio-huile
C	Carbone
C ₃ H ₈	Propane
CAS	Chemical Abstracts Service
CH ₄	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CPC	Condensation Particle Counter
DMA	Differentiel Mobility Analyser
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FTIR	Fourrier Transform Infrared spectrometer
HC	Hydrocarbures imbrûlés
HCHO	Formaldéhyde
HLB	Hydrophilic-Lipophilic Balance
IEA	International Energy Agency
IR	Infra-Rouge
IRDA	Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement
LFO	Light fuel oil
LPH	Litre Par Heure
LPM	Litre Par Minute
N	Azote
N ₂	Diazote
NO	Monoxyde d'azote
NO ₂	Dioxyde d'azote
NO _x	Oxyde d'azote

XVIII

O	Oxygène
O/W	Oil in Water emulsion
O ₂	Dioxygène
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PID	Proportional Integral Derivative controller
PIV	Particle Image Velocimetry
PPM	Partie Par Million
SMD	Sauter Mean Diameter
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer
TF	Transformée de Fourier
TFT	Thermo-Fluide pour le Transport
UWCPC	Ultrafine Water-based Condensation Particle Counter
W/O	Water in Oil emulsion

LISTE DES SYMBOLES

λ	Longueur d'onde
c	Vitesse de la lumière
σ	Nombre d'onde
S	Nombre de Swirl
G_{φ}	Flux de quantité de mouvement angulaire
G_x	Flux de quantité de mouvement axial
ξ	Angle d'ouverture variable
ξ_m	Angle d'ouverture maximal
α	Angle du bloc mobile
B	Hauteur des blocs
R_h	Rayon du cylindre-injecteur
R	Rayon de sortie des blocs
N	Nombre de blocs
D	Diamètre de sortie du ventilateur
r	Rayon
U_R	Vitesse relative
d_0	Diamètre de sortie du jet
C	Tension de surface
μ	Viscosité dynamique
ρ	Masse volumique
$\dot{m}$	Débit massique
A	Air
L	Liquide
% O_{2cor}	Concentration corrigée en oxygène
% P_{cor}	Concentration corrigée du polluant
% O_{2s}	Concentration en oxygène sur la base sèche

XX

$\% P_s$	Concentration en polluant sur la base sèche
$\% P_h$	Concentration en polluant sur la base humide
$\% H_2O$	Concentration en eau dans l'échantillon
T	Température des gaz chauds à la sortie de la chambre de combustion
T_a	Température de l'air de combustion à la sortie des blocs
C_v	Coefficient de variation
μ	Moyenne
h	Hauteurs absorption-injection
$\dot{V}_d$	Débit du diesel
$\dot{V}_{atomisation}$	Débit de l'air d'atomisation
ϕ	Richesse

INTRODUCTION

Dans un monde où la technologie et l'écologie sont combinées pour réaliser un développement durable, il est de plus en plus important de considérer les énergies renouvelables à l'instar des biocombustibles et les biotechnologies reliées à l'industrie des combustibles et des produits organiques alternatifs au pétrole.

En effet, les biocombustibles sont essentiellement de l'énergie solaire stockée par photosynthèse dans des produits végétaux sous forme de matière organique. Leur combustion permet de libérer cette énergie et par conséquent de relâcher du carbone sous forme de gaz carbonique. Ce gaz peut être capturé de nouveau par les végétaux dans un autre cycle. Les biocombustibles sont donc renouvelables dans quelques années comparativement aux combustibles fossiles qui mettent des « millions » d'années à se former. En effet, lors de la combustion d'un biocombustible il n'y a virtuellement pas de création de CO₂ mais seulement une libération du CO₂ atmosphérique absorbé par les plantes durant leur cycle de vie. Par conséquent, les biocombustibles offrent un bilan de carbone très faible voir neutre. Il est important tout de même que la production des biocombustibles ne s'implémente pas au détriment des produits et des cultures alimentaires.

Au début, la production des biocombustibles a commencé lors de l'industrialisation du secteur de l'agriculture. En effet, la quantité abondante de biomasse agricole ainsi que son bas prix soutenaient la diversification des sources d'énergie employées. Par la suite, plusieurs motifs ont contribué à leur développement. D'une part, les réserves de pétrole s'épuisent et sont de plus en plus onéreuses à exploiter. Il est donc impératif de sécuriser les ressources énergétiques. D'autre part, il y a un intérêt à diminuer les émissions en gaz à effet de serre vu les prévisions alarmantes du réchauffement planétaire. Enfin, la consommation d'énergie excessive du secteur du transport encourage le développement de nouvelles technologies afin de diversifier les carburants utilisés (Lefebvre, 1998; Pandey et al., 2011a).

Dans ce cadre s'intègre la pyrolyse rapide comme procédure de valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production d'un biocombustible liquide communément appelé huile de pyrolyse, huile pyrolytique ou encore bio-huile. Cette dernière est considérée comme une prometteuse alternative aux combustibles conventionnels d'origine pétrolière, notamment dans les brûleurs et les chaudières où le temps de résidence permet une meilleure efficacité (Ji-Lu et Yong-Ping, 2010).

Au Québec, l'agriculture et plus spécifiquement la serriculture s'est lancée dans la valorisation de la biomasse afin de tirer profit de ses avantages économiques ainsi qu'environnementaux. En effet, l'une des grandes orientations du plan stratégique de développement de la serriculture maraîchère au Québec est d'améliorer la compétitivité en diminuant les coûts de production. Ces coûts sont principalement reliés aux coûts de chauffage des serres. Le Québec, contrairement à d'autres provinces concurrentes comme l'Ontario ou la Colombie Britannique, n'a pas l'avantage ni du climat clément ni de l'accès aisé au gaz naturel. Ainsi l'action ambitionnée est de travailler sur l'efficacité énergétique des serres et de favoriser l'implantation de solutions alternatives à l'énergie fossile. Les installations de chauffage dans la plupart des entreprises serricoles québécoises (77 % de l'ensemble des entreprises) et qui occupent 40 % de la superficie totale des serres fonctionnent au mazout N°2 (SPSQ, 2013). L'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) s'est proposé alors d'œuvrer sur cette thématique. En utilisant la pyrolyse rapide, les résidus issus de l'exploitation serricole sont valorisés en bio-huile. L'étude de la faisabilité environnementale et technologique de la combustion de cette bio-huile (pure ou en mélange) dans les systèmes de chauffage des serres actuellement en place dans les fermes québécoises est donc primordiale.

Dans le cadre de cette maîtrise, le but général est de préparer et de valider un montage expérimental permettant la caractérisation des produits de combustion d'un brûleur à écoulement de type Swirl. Par ailleurs, ce montage expérimental sera destiné à la combustion de l'huile de pyrolyse.

Ce mémoire est organisé en quatre parties :

La première partie consiste en une revue de littérature portant principalement sur les diverses propriétés de combustible de l'huile de pyrolyse, sur les travaux de recherche accomplis ainsi que sur l'état d'avancement atteint jusqu'à présent.

Dans la deuxième partie, les conditions de fonctionnement permettant d'améliorer la qualité ainsi que l'efficacité énergétique de la combustion de l'huile de pyrolyse sont analysées. En se basant sur cette analyse, les divers éléments constituant le banc expérimental sont choisis. Ainsi, une description de l'assemblage du montage complet est dressée. En addition et pour mieux comprendre leurs méthodes de fonctionnement, une description des systèmes de mesure des émissions polluantes qui seront utilisés est présentée. Par la suite, une méthode de préparation de l'émulsion huile de pyrolyse-diesel est détaillée. Finalement, une procédure expérimentale de combustion des mélanges huile de pyrolyse-diesel est présentée.

L'étalonnage du montage expérimental est traité dans la troisième partie. Les méthodes de mesure permettant la collecte des résultats de la combustion du diesel, les mesures de répétabilité de l'analyse des émissions gazeuses ainsi que l'étude paramétrique de l'analyseur de particules sont effectuées.

La quatrième partie est consacrée à la combustion du diesel. Les paramètres influant sur la qualité de combustion sont étudiés. L'effet de ces paramètres sur les émissions polluantes est analysé afin de conclure quant aux paramètres promettant la meilleure efficacité énergétique et le meilleur impact environnemental. L'analyse des particules dans les gaz chauds est par ailleurs établie sous ces conditions.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

La pyrolyse rapide est la méthode de conversion thermochimique la plus efficace du point de vue énergétique et la plus rentable du point de vue économique pour produire un combustible liquide (Jahirul et al., 2012; No, 2014). La bio-huile issue de la pyrolyse de la biomasse peut être utilisée comme combustible dans les chaudières, dans les moteurs diesel et dans les turbines à gaz ou bien comme matière première dans les procédés de production de substances chimiques. Afin d'évaluer la possibilité de l'utiliser comme combustible dans des systèmes thermiques existants, il est primordial d'étudier la faisabilité technique et environnementale de la combustion de chaque type de bio-huile à part entière. Le présent travail unit les connaissances et instaure les fondations pour la réalisation de cette étude.

Le but de ce chapitre est d'examiner les travaux traitant des huiles de pyrolyse rapide et leur utilisation dans les systèmes de combustion, de définir le stade d'avancement de la recherche et de résumer les résultats obtenus. Dans un premier temps, il est intéressant d'introduire la branche scientifique de valorisation de la biomasse et les divers procédés utilisés, entre autres la pyrolyse rapide. Dans un deuxième temps et afin de comprendre les caractéristiques de l'huile de pyrolyse et de connaître ses particularités par rapport aux combustibles conventionnels d'origine pétrolière, une analyse de ses propriétés physico-chimiques est établie. Les standards et spécifications mis en place pour permettre la commercialisation de cette bio-huile sont aussi introduits. Dans un troisième temps, une revue de littérature des travaux traitant de la combustion de l'huile de pyrolyse est effectuée en analysant les études expérimentales et les résultats présentés.

1.2 Valorisation de la biomasse et pyrolyse rapide

Il existe plusieurs procédés de conversion de la biomasse en biocombustibles. Ces procédés peuvent être divisés en deux grandes familles (Pandey et al., 2011a) :

- La conversion biotechnologique où la biomasse est décomposée en sucre simple et ce par hydrolyse pour la biomasse lignocellulosique et par saccharification pour les céréales. En présence de la levure, le sucre est fermenté afin de produire du bioéthanol.
- La conversion thermochimique comme la combustion, la carbonisation, la gazéification, la pyrolyse, la liquéfaction ou l'hydrolyse. Les produits de la conversion thermochimique sont souvent répartis en eau, bio-huile, biochar, cendres et gaz incondensables (*i.e.* CH₄, H₂, CO, CO₂) et ce en différentes proportions dépendamment des paramètres de la réaction : température, type de réacteur utilisé, composition de l'environnement, niveau de chauffage, source de chauffage, temps de résidence, etc.

Il est aussi courant de différencier les biocombustibles de première génération des combustibles de deuxième génération comme suit :

- Les technologies de la première génération utilisent des organes de réserves de certaines plantes cultivées : graines, tubercules ou tiges saccharifères ou bien des huiles végétales, afin de produire de l'éthanol ou des esters méthyliques d'huiles végétales, *i.e.* biodiesel (Cormeau et Gosse, 2008).
- Les technologies de la deuxième génération sont celles qui convertissent la biomasse non-comestible telle les déchets agricoles, forestiers ou animaliers en produits chimiques utiles et/ou en carburants de transport. La biomasse non-comestible se compose principalement de matières celluloses : cellulose, hémicellulose et lignine. Cette biomasse est souvent dénommée biomasse lignocellulosique (Triantafyllidis, Lappas et Stöcker, 2013).

La pyrolyse est l'une des méthodes de conversion thermochimique de la deuxième génération. Elle constitue la méthode la plus efficace de production de combustible liquide vu son taux de conversion élevé à partir d'une biomasse hétérogène (Mohan, Pittman et Steele, 2006).

La pyrolyse est la décomposition thermique de la matière organique en substances élémentaires et ce en absence d'oxygène. Ses trois produits primaires sont le char, les gaz non condensables et les vapeurs qui se condensent à température ambiante donnant un liquide visqueux brun foncé. Ce dernier est communément appelé huile de pyrolyse, huile pyrolytique ou bio-huile. Son taux maximum de production est obtenu à des températures modérées comprises entre 350 et 650 °C et à des faibles durées de résidence des gaz allant de 0.5 à 5 secondes (Fahmi et al., 2008; Mohan, Pittman et Steele, 2006). Des températures plus basses et des durées de résidence plus longues favorisent la production du biochar. Alors que des températures plus élevées et des durées de résidence plus longues favorisent la production du biogaz : CO₂, CO, CH₄, H₂ (Bridgwater et Bridge, 1991; Mohan, Pittman et Steele, 2006).

L'huile pyrolytique a été définie par le groupe 34 de l'IEA (International Energy Agency) Bioenergy et est maintenant reconnue sous le nombre CAS (Chemical Abstracts Service) 1207435-39-9. L'objectif global de ce groupe est d'améliorer le taux de pénétration de la pyrolyse rapide et sa réussite à la production de carburants et de produits chimiques tout en contribuant à la résolution des problèmes techniques essentiels et à la diffusion des informations pertinentes notamment pour l'industrie (Pyne, 2016).

1.3 Propriétés caractéristiques des bio-huiles

1.3.1 Généralités sur les propriétés caractéristiques des bio-huiles

Afin d'employer l'huile pyrolytique à ses justes valeurs, plusieurs chercheurs ont analysé ses propriétés physico-chimiques. Il a été conclu que ces propriétés varient selon la composition

chimique de la biomasse ainsi que son prétraitement (*e.g.* taille et forme des particules, taux de séchage, quantité de minéraux, etc.), selon les paramètres de la réaction de pyrolyse (*e.g.* température, pression, temps de résidence, taux de chauffage, etc.) ainsi que le réacteur utilisé (Pandey et al., 2011b). Une comparaison des principales propriétés physico-chimiques de différentes bio-huiles, du diesel et de l'éthanol est exposée dans le Tableau 1.1. Une variation importante des valeurs y est perçue, par exemple la viscosité varie de 13 mm²/s à 949 mm²/s, la teneur en eau de 5.22 % à 25.4 %, et la teneur en oxygène de 0.1 % à 48.8 %. De façon générale par rapport au diesel et à l'éthanol, la masse volumique et la viscosité des bio-huiles sont supérieures alors que leur pouvoir calorifique est inférieur.

Mohan, Pittman et Steele (2006) ont publié une revue critique bien détaillée de la pyrolyse de la biomasse lignocellulosique. Ils ont étudié plus de cent types de biomasse, allant des déchets agricoles aux déchets forestiers en passant par les cultures énergétiques. Plusieurs méthodes de pyrolyse rapide, leurs avantages et inconvénients sont comparées. Les auteurs montrent la diversité des propriétés des bio-huiles produites à partir de différentes biomasses au sein de différents réacteurs et sous diverses conditions de réaction. Cette référence peut alors être consultée pour en savoir d'avantage sur la pyrolyse.

La combustion de la bio-huile requière la prise en compte de ses diverses caractéristiques qui ont été énumérées par Bridgwater (2012) en vue d'utiliser la bio-huile comme carburant pour le transport. Dans la section suivante, ces caractéristiques physico-chimiques sont présentées.

Tableau 1.1 Propriétés de quelques bio-huiles, du diesel et de l'éthanol.
Tiré de (Martin et Boateng, 2014; No, 2014).

Propriété	Diesel	Éthanol	Bois	Bois de pin	Bois de feuillu	Panic	Chêne et pin	Bio-huile				Déchet organique	Déchet d'équin
								Tourteau de soja	Eucalyptus	Miscanthus			
Masse volumique (kg/m ³)	820-845 ¹	789	1260 ²	1170	1232	1274	1260	1107 ¹	1305	1357	1100 ²	1198	
Viscosité (mm ² /s)	2-4.5 ³	0.6 ⁵	297 ³	13 ³	27	215 ⁵	161 ⁵	72 ⁴	187 ⁵	949 ⁵	17 ²	99 ⁵	
PCI* (MJ/kg)	42.5	29.9	15.27	18.8	14.34	24.9	25.2	33.6 (PCS**)	23.7	22.7	20.9	25.9	
pH			1.95	2.9							7.9		
Eau (%m)	0.02	0	18.2	25.4	32	6.94	8.03		6.75	5.22	23.6	8.73	
Solides (%m)	0.01			0.04	< 3						0.12		
C (%m)	86.23	52.14	44.14	45.5	54.59	56.44	58.67	67.89	56.22	53.82		59.33	
H (%m)	13.77	13.13	7	5.8	6.74	6.79	6.61	7.77	6.27	6.21		6.99	
O (%m)	0	0	47.56	48.8	38.57	1.56	0.66	13.5	0.1	0.37		1.53	
N (%m)	0	34.73	0	< 0.1	0.1	35.2	34.06	10.84	37.4	39.6		32.14	

* PCI : L'énergie thermique libérée par la combustion complète d'un kilogramme de combustible lorsque l'eau formée pendant la combustion demeure à l'état vapeur.

** PCS : L'énergie thermique libérée par la combustion complète d'un kilogramme de combustible lorsque l'eau formée pendant la combustion est condensée.

Les exposants de ¹ à ⁵ indiquent la température du liquide lors de l'essai et correspondent respectivement à 15, 20, 40, 50 et 60 °C.

1.3.2 Teneur en eau

Un des traits les plus délicats de la combustion de l'huile de pyrolyse est la teneur élevée en eau. Cette teneur représente 15 à 30 % de son poids total et provient essentiellement de la teneur en eau présente dans la biomasse utilisée (Czernik et Bridgwater, 2004). Comme la température d'ébullition et la chaleur spécifique de la phase vapeur de l'eau sont élevées, le pouvoir calorifique, la température de flamme adiabatique, et la vitesse de combustion de la bio-huile sont inférieurs à ceux d'un combustible conventionnel et son délai d'inflammation est supérieur. D'autre part, la présence de l'eau peut améliorer l'atomisation du jet en diminuant la viscosité de la bio-huile et peut réduire ses émissions polluantes en diminuant les NO_x thermiques et en facilitant l'oxydation des suies. Il est tout de même favorable de limiter la teneur en eau dans la biomasse (moins de 10 % en poids) autrement la stabilité de la flamme et la contrôlabilité de la combustion seront plus difficiles (Czernik et Bridgwater, 2004; Lehto et al., 2014).

1.3.3 Teneur en oxygène

La concentration en oxygène représente 35 à 60 % de la masse de la bio-huile sur la base humide (Lu, Li et Zhu, 2009) et elle constitue l'une des plus importantes différences par rapport aux hydrocarbures fossiles. En effet, les composés oxygénés entraînent l'immiscibilité de la bio-huile dans les combustibles dérivés du pétrole et augmentent sa corrosivité (Lehto et al., 2013). En combustion, la présence de l'oxygène en quantité élevée réduit le pouvoir calorifique. Généralement, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'huile de pyrolyse est de 14-18 MJ/kg contre 41-43 MJ/kg pour les combustibles pétroliers. De plus, sa masse volumique est de l'ordre de 1200 kg/m³ contre 800-1000 kg/m³ pour les combustibles pétroliers. Ainsi pour atteindre la même énergie thermique dégagée qu'un combustible pétrolier, un volume de bio-huile doit être plus grand. Cette augmentation du volume de la bio-huile entraîne une augmentation du volume d'air de combustion à introduire. Le volume d'air de combustion nécessaire doit être plus grand malgré la teneur élevée en oxygène dans la bio-huile. Par exemple, la quantité d'air qu'il faut introduire en

remplaçant le mazout léger (LFO) par une huile pyrolytique est 10 à 20 % supérieure (Shaddix et Hardesty, 1999). Ceci introduira donc la nécessité de revoir le design de l'injecteur et les dimensions de la chambre de combustion.

1.3.4 Teneur en solides

Les huiles de pyrolyse contiennent généralement des particules solides constituées de cendres, d'une partie de la matrice carbonée obtenue après dévolatilisation (char pyrolytique qui s'est infiltré dans l'huile lors de la condensation des gaz de pyrolyse) et d'autres impuretés à l'instar des matières utilisées dans un réacteur à lit fluidisé. La teneur en solides peut atteindre 3 % du poids total. La taille des particules en suspension varie de 1 à 200 μm et la plupart des particules sont inférieures à 10 μm (Lu, Li et Zhu, 2009). La présence des matières solides augmente la viscosité de la bio-huile et dégrade son stockage et sa combustion. En effet, même après filtration les particules submicroniques s'agglomèrent au stockage et forment de plus grandes particules pouvant obstruer les systèmes d'injection et éroder les chambres de combustion. De plus, les particules de carbone forment des cénosphères et par conséquent des imbrûlés dans les émissions gazeuses (Lehto et al., 2014).

1.3.5 Viscosité

La viscosité d'un fluide est une mesure de sa résistance aux forces de cisaillement lors de l'écoulement. Lors de l'étude des caractéristiques d'un combustible, il est primordial de considérer sa viscosité (ASTM International, 2012). En effet, non seulement elle influence le choix des pompes et des conduits mais aussi détermine la qualité du jet et par conséquent l'efficacité de la combustion et les émissions polluantes (Lehto et al., 2013). Généralement, la viscosité des bio-huiles à 40 °C varie entre 10 et 100 mm^2/s . Un préchauffage modéré de l'huile de pyrolyse diminue sa viscosité et ainsi facilite son pompage et son atomisation. Par contre, il ne faut pas dépasser les 80 °C afin d'éviter le vieillissement accéléré de la bio-huile, c'est-à-dire sa polymérisation et la dégradation de ses propriétés physiques (Boucher et al., 2000).

1.3.6 Structure macroscopique et homogénéité

Généralement, la plupart des bio-huiles apparaissent homogènes. Toutefois, les biomasses forestières et agricoles riches en matières extractibles produisent en pyrolyse des liquides à deux phases. La première ressemble à une huile de pyrolyse ordinaire. La deuxième, pouvant atteindre 20% de la masse totale, est moins dense et est constituée de matières extractibles, de lignine et de composés solubles dans l'eau (Lu, Li et Zhu, 2009). Il est recommandé de mélanger mécaniquement l'huile à température ambiante afin de l'homogénéiser (Diebold et al., 1994).

Bien que la plupart des bio-huiles possèdent une structure macroscopique phasique, leur structure microscopique est plus complexe. Dans la littérature, la bio-huile est décrite comme étant une microémulsion : une phase continue constituée par l'eau ainsi que les molécules solubles dans l'eau, des molécules insolubles dans l'eau se dispersant comme des micelles et certains composés multipolaires se comportant en émulsifiants qui stabilisent la structure. Cette structure attribue à la combustion de la bio-huile des étapes différentes de celles des combustibles fossiles.

1.3.7 Durée de vieillissement

Les huiles de pyrolyse sont loin d'être des substances thermodynamiquement en équilibre. Leur instabilité peut être décrite par un vieillissement lent durant le stockage et un vieillissement très rapide lors du chauffage.

En stockage, la majorité des changements physico-chimiques prennent place durant les 6 premiers mois : l'agglomération des particules solides formant des particules encore plus grandes après 16 mois, l'évaporation des composés volatils causant l'augmentation du point d'éclair, l'augmentation de la teneur en eau faisant diminuer le pouvoir calorifique et l'augmentation de la masse moléculaire, de la masse volumique et de la viscosité de l'huile (Lu, Li et Zhu, 2009).

Des mesures de la viscosité de plusieurs huiles produites à partir de différentes biomasses ont montré que le chauffage à 80 °C pendant une journée est approximativement corrélé à une année de stockage à température ambiante. Des tests à 80 °C pendant six heures et à 40 °C pendant une semaine ont approximativement donné le même résultat et sont corrélés à un stockage de 3 à 4 mois à température ambiante (Oasmaa et Kuoppala, 2003). Le stockage de la bio-huile dans un milieu froid peut retarder les réactions de polymérisation mais ne peut les prévenir (Fratini et al., 2006).

1.3.8 Commercialisation et spécification de l'huile de pyrolyse

D'après ce qui a été indiqué précédemment, l'huile de pyrolyse est différente des huiles minérales vu sa composition chimique ainsi que ses propriétés physiques. Elle se caractérise essentiellement par des teneurs plus élevées en eau, en oxygène et en solides, une viscosité, une masse volumique et une acidité supérieures et un pouvoir calorifique plus faible par rapport aux combustibles pétroliers. Afin de commercialiser l'huile provenant de la pyrolyse de la biomasse comme combustible remplaçant les dérivés du pétrole, une spécification claire définissant les gammes de propriétés (par exemple la teneur maximale en eau et en solides, le pouvoir calorifique minimal, etc.) pour de différentes classes de carburants commercialisés doit être établie.

Oasmaa et Czernik (1999) ont exposé les caractéristiques physiques et chimiques propres à l'utilisation des bio-huiles dans les moteurs Diesel et les chaudières *e.g.* le pouvoir calorifique, la masse moléculaire, l'homogénéité ou la stabilité. Ils témoignent que des essais de longue durée devront être effectués avant que les bio-huiles ne soient acceptées comme combustibles commerciaux. Ces essais nécessiteront un approvisionnement important d'huile ayant des propriétés spécifiées établies par les producteurs et les utilisateurs. Ils ont par conséquent présenté l'exemple des spécifications établies par le fabricant de moteurs automobiles Wartsila et le potentiel utilisateur de ce biocombustible Stockholm Energi (Oasmaa et Czernik, 1999).

Plus récemment, une spécification des bio-huiles a été proposée par l'ASTM. La spécification D7544, en sa version la plus récente 2012, classe les bio-huiles en deux grades D et G. Le premier est destiné aux brûleurs commerciaux et industriels. Le second, tolérant des teneurs plus importantes en solides et en cendres, est destiné aux brûleurs industriels. Cette spécification permettra de guider les consommateurs lors de l'achat de ce type de combustible. Le Tableau 1.2 détaille les méthodes d'analyse des propriétés physico-chimiques et établit une classification selon les deux grades.

Tableau 1.2 Spécifications des huiles de pyrolyse.
Tiré de (ASTM International, 2012).

Propriété	Méthode de test	Grade G	Grade D
Pouvoir calorifique inférieur, MJ/kg, min	D240	15	15
Teneur en eau, % mass, max	E203	30	30
Teneur en solides, % mass, max	D7579	2.5	0.25
Viscosité cinématique à 40 °C, mm ² /s, max	D445 ⁴	125	125
Masse volumique à 20 °C, kg/dm ³	D4052	1.1-1.3	1.1-1.3
Teneur en soufre, % mass, max	D4294	0.05	0.05
Teneur en cendres, % mass, max	D482	0.25	0.15
Point d'éclair, °C, min	D93, Procédure B	45	45
Point d'écoulement, °C, max	D97	-9	-9

⁴ Sans filtrage.

1.4 Combustion de l'huile de pyrolyse

1.4.1 Procédures de mise en marche et d'arrêt spécifiques

De façon générale, la combustion de l'huile pyrolytique nécessite des procédures de mise en marche et d'arrêt spécifiques du brûleur (Ji-Lu et Yong-Ping, 2010; Tzanetakis, 2011). Par exemple, l'air de combustion préchauffé est amené dans la chambre de combustion jusqu'à ce que la température de préchauffage soit atteinte. Le brûleur est, par la suite, chauffé en brûlant du diesel ou de l'éthanol pendant 15 à 20 minutes. Le changement vers l'échantillon de la bio-huile pure ou en mélange à tester est ensuite fait. De 20 à 40 minutes additionnelles s'écoulent jusqu'à atteindre le régime stationnaire sous les paramètres de fonctionnement du

point de référence. Ceci permet aux températures et aux émissions polluantes d'atteindre le régime stationnaire avant de faire varier un paramètre d'opération (*e.g.* débit du combustible, débit de l'air de combustion, etc.) et par ailleurs, de valider la répétabilité du fonctionnement d'une mesure à l'autre. En faisant varier un paramètre à la fois, une durée de 5 à 10 minute permet d'atteindre le nouvel état de stabilité.

Dans la section suivante, l'état d'art de la combustion de l'huile de pyrolyse est présenté. Ses émissions polluantes sont caractérisées selon la littérature : les oxydes de soufre (SO_x), les oxydes de carbone (CO_x), les hydrocarbures imbrûlés (HC), les oxydes d'azote (NO_x) ainsi que les particules solides.

1.4.2 SO_x

Ji-Lu et Yong-Ping, (2010) ont étudié la combustion de l'huile de pyrolyse des écorces de riz dans un brûleur muni d'un injecteur par pulvérisation d'air avec mélange interne. Le débit de la bio-huile était égal à 9 kg/h (7.6 LPH) et le débit d'air a été varié de 3 à 4.3 kg/h. Les concentrations en SO_x enregistrées étaient faibles (inférieures à 30 PPM). Ceci est dû à la faible teneur de soufre présente dans la bio-huile (Ji-Lu et Yong-Ping, 2010; Khodier et al., 2009). Généralement, les concentrations en SO_x des bio-huiles sont inférieures à celles des combustibles pétroliers (Mohan, Pittman et Steele, 2006).

1.4.3 CO_x et HC

Le ratio C/H de la bio-huile est plus élevé que celui des combustibles conventionnels pétroliers. Par conséquent, à puissance équivalente la bio-huile a plus tendance à produire du CO et des suies et par ailleurs à exhiber une flamme plus lumineuse. Ceci a été constaté par Shihadeh et al. (1994) suite à une comparaison entre les émissions polluantes de deux bio-huiles et celles du diesel à une puissance de 1 MW.

Choi et al. ont utilisé un brûleur de type Swirl d'environ 35 kW muni d'un injecteur par pulvérisation d'air à mélange externe afin de caractériser la flamme d'huile de pyrolyse de bois. Selon Choi et al. (2016), la combustion de la bio-huile pure générait une flamme instable présentant beaucoup de fluctuations par rapport à une flamme d'éthanol et des émissions en CO dépassant les 1000 PPM (limite de détection du système d'analyse de gaz utilisé). Un mélange bio-huile/éthanol a par ailleurs été utilisé et ce avec des teneurs en éthanol allant de 10 à 50 %. Dès l'ajout de 10 % d'éthanol des changements considérables ont été remarqués : les concentrations en CO ainsi que les concentrations en O₂ dans les gaz chauds ont diminué et les concentrations en CO₂ ont augmenté. De plus, les concentrations en CO enregistrées sont quatre fois inférieures à celle de l'éthanol pur. Ceci peut être expliqué par la nature oxygénée de l'huile pyrolytique qui fait qu'il y a plus d'oxygène pour oxyder la même quantité de carbone. Les concentrations en CO₂ et en O₂ mesurées ont été par la suite comparées aux valeurs théoriques qui devraient être obtenues en combustion complète. Il a été conclu par Choi et al. (2016) que bien que les composés gazeux peuvent être complètement oxydés (très faible teneur en CO), il peut y avoir une évaporation incomplète des gouttelettes du jet. En supposant que 70 % du combustible s'est évaporé et a réagi, les valeurs calculées des concentrations en CO₂ et en O₂ sont plus proches de celles mesurées (Choi et al., 2016).

Kowalewski (2015) a étudié la combustion de l'huile de pyrolyse dans un brûleur à Swirl muni d'un injecteur par pulvérisation de gaz naturel. Lorsque la quantité de ce dernier est insuffisante pour soutenir l'inflammation, la flamme se détachait de la buse. Ces instabilités faisaient que la flamme s'éteignait globalement ou localement laissant passer des hydrocarbures imbrûlés (HC) en dehors de la zone de réaction vers une zone où la température est insuffisante pour assurer une combustion complète (Kowalewski, 2015).

Une comparaison des émissions polluantes de la combustion de l'huile de pyrolyse de bois en régime permanent avec et sans Swirl et en régime transitoire (en basculant entre bio-huile et éthanol) a été faite par Krumdieck et Daily (1998) et a montré que la flamme stable de l'huile de pyrolyse avec recirculation des gaz chauds produit jusqu'à huit fois moins de CO et trois

fois et demi moins d'hydrocarbures imbrûlés. Cette étude a été réalisée dans un brûleur de 5 kW dont la configuration de Swirl peut être modifiée et un injecteur par pulvérisation d'air à mélange interne (Krumdieck et Daily, 1998).

Quand les bons paramètres de combustion sont utilisés, entre autres la qualité d'atomisation, la richesse, le bon mélange combustible-air et le temps de résidence suffisant, les émissions en CO de l'huile pyrolytique sont faibles et comparables à celles des combustibles pétroliers. En augmentant l'air de combustion introduit (à 35 % d'excès d'air), les résultats de mesures des gaz émis de Ji-Lu et Yong-Ping (2010) indiquent une diminution jusqu'à une valeur presque nulle de CO, ainsi a remarqué Khodier et al. (2009).

Shihadeh et al. (1994) ont comparé les émissions de CO de la bio-huile d'ENSYN Technologies (Ottawa, Canada) avec celles du diesel et ce pour une flamme diffusion de 1MW (correspondant à 64 kg/h de diesel et à 163 kg/h de bio-huile). Lorsque l'excès en O₂ dans la cheminée est supérieur à 3 %, les émissions en CO de la bio-huile sont faibles (inférieures à 20 PPM) et comparables à celles du diesel. Quand l'excès en O₂ diminue au-delà de 3 %, les quantités de CO émises par la bio-huile augmentent de façon rapide.

1.4.4 NO_x

Les NO et NO₂, connus sous le terme de NO_x, sont produits à partir du diazote N₂ contenu dans l'air à haute température (NO_x thermiques) et/ou à partir de l'azote N contenu dans le combustible (NO_x du combustible). Une investigation sur les mécanismes de formation des NO_x à pression atmosphérique lors de l'utilisation d'huile pyrolytique a été effectuée par Stamatov, Honnery et Soria (2006). Les taux de formation des NO_x thermiques selon le mécanisme de Zeldovich (NO_x thermiques) ont été calculés. Les résultats montrent que la bio-huile et le mélange 80 % bio-huile et 20 % éthanol produisent approximativement la même quantité de NO_x thermiques que le diesel N°2. Or les résultats expérimentaux démontrent que les indices d'émission de NO_x de ces combustibles (la bio-huile et le mélange 80 % bio-huile 20 % éthanol) sont bien supérieurs à celui du diesel N°2 (respectivement 2.4 et 1.9 fois supérieurs). Ainsi et contrairement aux combustibles dérivés

du pétrole qui émettent majoritairement des NO_x thermiques, il s'avère que la source qui gouverne la formation des NO_x dans le cas de la bio-huile est reliée à l'azote qui y est présent (Stamatov, Honnery et Soria, 2006).

Baxter, Jenkins et Winter (1994) ont étudié les émissions de NO_x pour deux huiles pyrolytiques produites selon le même processus mais ayant des teneurs en azote différentes. Les résultats des émissions des NO_x en fonction de la concentration d'oxygène dans les gaz chauds indiquent une rapide augmentation jusqu'à une certaine valeur et puis une stabilisation. Ce comportement est observé pour les deux bio-huiles. La différence réside dans le maximum de NO_x atteint qui est deux fois plus important dans le cas de la bio-huile ayant une teneur en azote 2.7 fois plus importante. Ainsi le taux de conversion d'azote combustible en NO_x diminue en augmentant la teneur en azote du combustible (la concentration de NO_x émis augmente mais l'efficacité de conversion de l'azote en NO_x diminue). Le même constat a été présenté par Martin et Boateng (2014).

En augmentant l'air total introduit dans la chambre de combustion, les résultats de mesure des gaz émis par la combustion de l'huile de pyrolyse indiquent une augmentation des NO_x (jusqu'à 370 PPM) pour Ji-Lu et Yong-Ping (2010). La même tendance a été remarquée par Choi et al. (2016). Shihadeh et al. (1994) ont trouvé que les émissions en NO de la bio-huile d'ENSYN Technologies, Ottawa, Canada, sont comparables à celles du diesel $\text{N}^\circ 2$ pour de faibles pourcentages d'excès d'air (108 comparées à 80 PPM respectivement). Au-delà de 3 % d'oxygène dans les échappements, les NO de la bio-huile augmentent de façon très rapide par rapport à ceux du diesel $\text{N}^\circ 2$. Ceci est expliqué par une teneur d'azote plus élevée dans la bio-huile (0.06 comparée à 0.02) amplifiée par le plus faible pouvoir calorifique. En effet, pour atteindre la même puissance thermique il faut introduire un débit plus élevé de bio-huile (163.4 comparé à 64 kg/h). En conséquence, en brûlant à la même puissance la bio-huile à la place du diesel $\text{N}^\circ 2$, 5.4 fois plus d'azote est introduit (Shihadeh et al., 1994).

1.4.5 Particules solides

Les émissions solides sont catégorisées en cendres (résidus inorganiques) et en suies (résidus carbonnés). Lorsqu'une combustion efficace est entretenue, la plupart des particules solides produites sont des cendres que la bio-huile renfermait initialement. Par conséquent, la concentration des particules solides émises augmente linéairement en fonction de la teneur en particules dans la bio-huile. Dans le cas d'un mélange avec un hydrocarbure conventionnel, cette concentration augmente linéairement aussi en fonction de la proportion de bio-huile qui est introduite.

Une fois les composés volatils évaporés, la combustion de l'huile pyrolytique produit des particules solides. Ces particules solides s'oxydent plus lentement que les imbrûlés gazeux. Ce qui exhibe une flamme orange plus lumineuse mais aussi augmente les pertes thermiques par radiation (Kowalewski, 2015).

En effet pour les flammes de diffusion, le flux radiatif émis augmente en fonction de la température de la flamme et des particules solides produites. L'énergie radiative issue de la flamme de l'huile pyrolyse de bois a été mesurée le long de la ligne centrale avec un radiomètre. Durant l'étude, un plus grand flux de chaleur cumulatif a été enregistré pour la bio-huile comparativement à l'éthanol et au diesel. Ceci signifie une plus grande teneur initiale en particules dans la flamme de la bio-huile et suggère aussi que ces particules risquent de ne pas parvenir à totalement s'oxyder par la suite dans des régions plus pauvres en combustible (Stamatov, Honnery et Soria, 2006).

1.5 Sommaire, contexte et objectifs du projet

L'étude bibliographique présentée a permis de conclure que les caractéristiques physico-chimiques de l'huile de pyrolyse sont d'une part différentes de celles des hydrocarbures conventionnels pétroliers et d'autre part fortement dépendantes de la biomasse, de la technologie de pyrolyse et des paramètres de réaction utilisés. Par ailleurs et dépendamment

des caractéristiques des bio-huiles, leurs comportements en combustion peuvent varier. En examinant divers travaux portant sur la combustion de l'huile de pyrolyse, une tendance générale de ses émissions polluantes a été déterminée : 1) La concentration en oxydes de soufre est négligeable. 2) Les bio-huiles ont une importante tendance à produire des imbrûlés (CO, hydrocarbures imbrûlés et particules solides). En assurant les bons paramètres de combustion et en atteignant le régime stationnaire, ces imbrûlés diminuent considérablement et une meilleure qualité de combustion est obtenue. 3) Les NO_x émis par la combustion de l'huile de pyrolyse sont en majorité produits par voie du combustible. Dans le cas de la combustion de mélanges d'huile de pyrolyse avec d'autres hydrocarbures conventionnels, les émissions de NO_x augmentent en fonction de la proportion d'huile introduite. 4) Lorsque le temps de résidence est bien adapté, l'oxydation des suies peut avoir lieu et les particules solides émises sont principalement des cendres que l'huile pyrolytique contenait initialement.

Le présent mémoire s'inscrit dans un projet de recherche de l'IRDA visant à étudier la combustion de quinze bio-huiles de bois produites sous différentes conditions de réaction. Ceci permettra de conclure quels sont les paramètres de réaction permettant de produire la bio-huile ayant le meilleur potentiel de combustion. Pour ce faire, un banc d'essais expérimental doit être conçu et mis en place, un étalonnage primaire doit être réalisé et une campagne de tests doit être effectuée afin de déterminer les paramètres de fonctionnement améliorant la qualité de la combustion.

Le but principal de ce mémoire est de proposer et de valider un montage expérimental autour d'un brûleur à écoulement Swirl permettant la combustion de l'huile de pyrolyse rapide et la caractérisation de ses émissions polluantes.

Les objectifs spécifiques de ce travail sont :

- 1) Concevoir un banc d'essais expérimental pour analyser la combustion d'huile de pyrolyse.
- 2) Proposer une méthode d'émulsification huile de pyrolyse-diesel.

- 3) Étalonner le montage expérimental et vérifier la répétabilité des mesures.
- 4) Étudier l'influence des principaux paramètres sur la combustion du diesel et évaluer les diverses émissions polluantes gazeuses et solides.

Dans le chapitre suivant, les deux premiers objectifs seront traités.

CHAPITRE 2

CHOIX, CONCEPTION ET ASSEMBLAGE DU BRÛLEUR

2.1 Introduction

Un montage expérimental est développé dans le but d'étudier la combustion des huiles pyrolytiques. Une description détaillée du montage expérimental est présentée dans ce chapitre. Cette dernière inclut essentiellement l'injection, l'allumage du combustible ainsi que la génération de Swirl et la chambre de combustion. Une étude bibliographique pour choisir les différents composants du montage expérimental et ainsi améliorer la qualité de combustion de l'huile de pyrolyse a été effectuée. Par la suite, les systèmes de mesure des émissions polluantes sont présentés. Enfin, une méthode de préparation d'une émulsion huile de pyrolyse-diesel et une procédure expérimentale de la combustion des mélanges huile de pyrolyse-diesel sont proposées.

2.2 Montage expérimental

2.2.1 Description générale

Le montage expérimental, assemblé au laboratoire de Thermo-Fluide pour le Transport (TFT), a été conçu afin d'étudier la combustion de l'huile de pyrolyse. Le brûleur à écoulement Swirl représenté à la Figure 2.1 comporte : 1) un caisson d'air et un générateur de Swirl inspirés par les travaux de Tzanetakis (2011) de l'Université de Toronto 2) une chambre de combustion 3) un injecteur par pulvérisation d'air et 4) une torche à flamme pilote. Une description détaillée des différents éléments constituant le brûleur sera présentée dans la section 2.2.2. Les systèmes d'alimentation en combustibles et en air d'atomisation et de combustion ainsi que l'instrumentation utilisée seront représentés à la Figure 2.7 et détaillés dans la section 2.2.3.

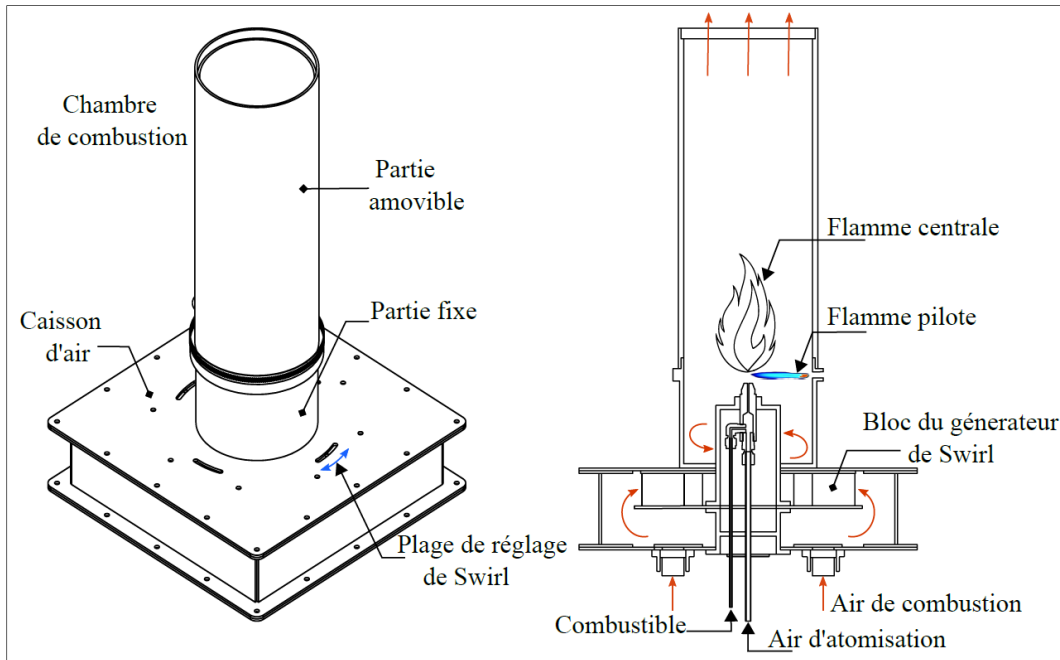


Figure 2.1 Représentation schématique du brûleur à écoulement Swirl.

2.2.2 Brûleur à écoulement Swirl

Les écoulements de type Swirl sont couramment utilisés en combustion et en particulier dans les chaudières car ils favorisent la création de zones de recirculation (Chong et Hochgreb, 2015). Ainsi, les gaz de combustion chauds reviennent à la sortie de l'injecteur et contribuent à raviver et à stabiliser la flamme. De plus, cet écoulement structuré améliore le mélange entre l'air de combustion et le combustible. Par ailleurs, la flamme est plus courte. Finalement, les temps de résidence des gaz de combustion et des particules sont allongés par rapport à la configuration sans Swirl. Par conséquent, les hydrocarbures et les particules ont plus de temps pour s'oxyder, les émissions polluantes diminuent et la combustion peut être complète (Gupta, Lilley et Syred, 1984).

Dans le même objectif d'améliorer la qualité de combustion de l'huile de pyrolyse, le préchauffage de l'air de combustion est utilisé (Chong et Hochgreb, 2015; Diebold et al., 1994; Khodier et al., 2009; Lehto et al., 2014). Cette augmentation de la température de l'air

résulte en l'augmentation des températures de la flamme et des gaz brûlés et favorise l'évaporation des gouttelettes liquides et l'oxydation des particules. Les détails concernant le choix ainsi que la conception des pièces fabriquées à l'ÉTS sont exposés dans ce qui suit.

2.2.2.1 Caisson d'air et chambre de combustion.

La conception du caisson d'air, dont la pièce maîtresse est le générateur de Swirl, a été inspirée par le travail de Tzanetakis (2011) pour maintes raisons : la géométrie est simple et a prouvé son efficacité à créer de la recirculation des gaz chauds et à améliorer la combustion de l'huile de pyrolyse, pour remédier aux limites de temps et de budget ainsi que pour pouvoir comparer les résultats trouvés avec des travaux antérieurs. Toutefois, des changements par rapport au brûleur de Tzanetakis (2011) ont été effectués :

- Un injecteur avec un orifice central de 1.73 mm de diamètre a été choisi (contre un injecteur avec 6 orifices de 0.89 mm de diamètre uniformément espacés). Ainsi, un plus faible débit de combustible peut être introduit. Plus de détails sur l'injecteur seront fournis dans la section 2.2.2.3.
- Les dimensions du caisson d'air ont été modifiées afin de s'adapter à la géométrie du nouvel injecteur choisi pour ce travail. Ces modifications auront un effet sur le nombre de Swirl présenté dans la section 2.2.2.2.
- La configuration verticale pointant vers le haut est adoptée présentement afin de s'accommoder au système de ventilation du laboratoire TFT (contre une configuration verticale pointant vers le bas).

Comme illustré dans la Figure 2.1 à gauche, le caisson d'air a une forme rectangulaire de 50 cm de côté et 10 cm de hauteur. Sa conception générale ainsi que ses 4 entrées symétriques permettent une alimentation homogène de la chambre de combustion en air. Sa partie supérieure abrite le générateur de Swirl. Ce dernier permet de produire un écoulement structuré de type Swirl afin de favoriser la combustion complète. Le générateur de Swirl, dont une coupe transversale est illustrée à la Figure 2.2, est formé par deux poulies : une en

bas abritant les 8 blocs fixes représentés en gris et une en haut abritant les 8 blocs amovibles représentés en blanc.

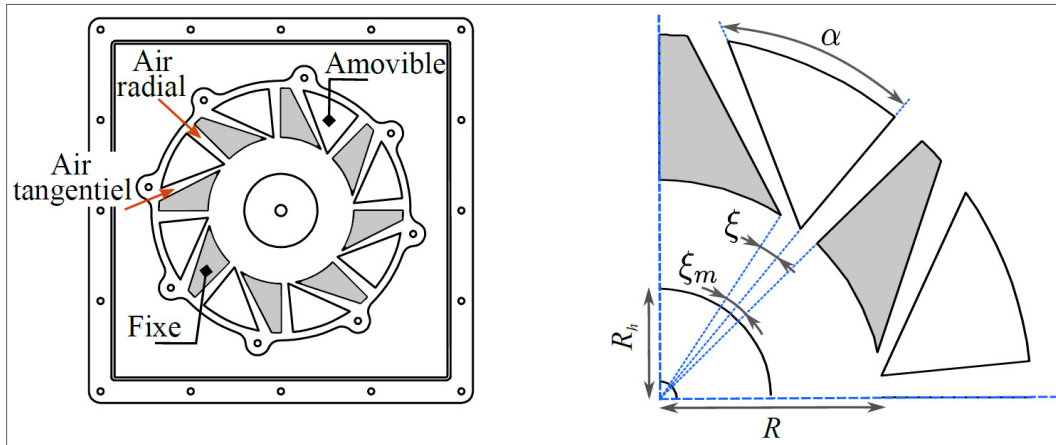


Figure 2.2 Coupe transversale du générateur de Swirl.

L'écoulement du flux d'air de combustion est représenté avec des flèches rouges à la Figure 2.1 et la Figure 2.2. L'air de combustion, accédant au caisson d'air via les quatre entrées symétriques, est forcé à passer à travers le générateur de Swirl (voir Figure 2.2). Selon l'ajustement de l'angle d'ouverture ξ entre les blocs fixes et amovibles, l'écoulement d'air peut être complètement radial ($\xi = 0$), complètement tangentiel ($\xi = \xi_m$), ou bien la somme d'une composante radiale et d'une composante axiale ($0 < \xi < \xi_m$). Par la suite, l'air monte axialement dans l'espace annulaire entre le plan de rayon R de sortie des blocs et le cylindre de rayon R_h confinant l'injecteur jusqu'à envelopper la flamme centrale.

Le confinement de la zone de combustion améliore le mélange air/combustible (Orfanoudakis et al., 2005). Une chambre de combustion cylindrique de 18 cm de diamètre est par ailleurs mise en place. Elle est composée d'une partie fixe et d'une partie amovible. La partie fixe est encastrée sur la surface supérieure du caisson d'air et a une longueur de 12 cm. La partie amovible est emboîtée sur la partie fixe et a une longueur de 40 cm. Ceci permet un montage/démontage facile afin d'allumer la flamme pilote.

2.2.2.2 Swirl

Les écoulements tourbillonnants peuvent être caractérisés par le nombre de Swirl (S). Des expériences ont montré que ce nombre est un critère de similarité significatif pour les générateurs de Swirl géométriquement semblables (Beér et Chigier, 1972).

Le nombre de Swirl est estimé par l'équation (2.1) (Beér et Chigier, 1972) où G_ϕ est le flux de quantité de mouvement angulaire, G_x est le flux de quantité de mouvement axial à une section transversale du champ d'écoulement et R est le rayon de la surface par laquelle l'écoulement turbulent quitte le générateur de Swirl.

$$S = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (2.1)$$

Ainsi, le nombre de Swirl à la sortie des blocs a été estimé par l'expression de Beer and Chigier (1972) corrigée par Fudihara, Goldstein Jr. et Mori (2003) et présentée ci-dessous.

$$S = \sigma \frac{R}{2B} \left(1 - \left(\frac{R_h}{R} \right)^2 \right) \quad (2.2)$$

Cette expression prend en considération le facteur géométrique de la configuration et σ qui représente le ratio entre la vitesse tangentielle moyenne et la vitesse radiale moyenne défini par l'équation (2.3).

$$\sigma = \frac{2\pi}{n \xi_m} \sin \alpha \frac{\cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \tan \frac{\xi}{2} \right) \left(\frac{\xi}{\xi_m} \right)}{\left(1 - \left(1 - \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \tan \frac{\xi}{2} \right) \right) \frac{\xi}{\xi_m} \right)^2} \quad (2.3)$$

Les valeurs des paramètres du générateur de Swirl sont fournies au Tableau 2.1. Les angles et rayons sont schématisés dans le détail du générateur de Swirl à la Figure 2.2 à droite.

Tableau 2.1 Paramètres du générateur de Swirl.

Paramètre	Désignation	Valeur
N	Nombre de paires de blocs	8
R (mm)	Rayon de sortie des blocs	76.2
R_h (mm)	Rayon du cylindre-injecteur	38.1
B (mm)	Hauteur des blocs	38.1
α	Angle du bloc mobile	60
ξ_m	Angle d'ouverture maximal	12
ξ	Angle d'ouverture variable	0 - 12

La variation du nombre de Swirl théorique S en fonction de l'angle d'ouverture ξ a été calculée et les résultats sont présentés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Variation de S en fonction de l'angle d'ouverture.

ξ (°)	S
0	0
4	0.6
8	1.82
12	4.12

Ainsi pour ce générateur de Swirl $0 \leq S \leq 4.12$ comparé à $0 \leq S \leq 5.41$ pour Tzanetakis (2011). Il est à noter que cette méthode de calcul du nombre de Swirl fut proposée pour caractériser l'écoulement à la sortie des blocs du générateur de Swirl (Beér et Chigier, 1972). Dans la réalité, S diminue par effet de frottement sur les parois, de perte de charge et de dissipation d'énergie. Sa valeur réelle au niveau de la zone de combustion est donc inférieure à celle prédite par l'équation (2.1) utilisée (Tzanetakis, 2011).

2.2.2.3 Injecteur

Un paramètre important lors de l'emploi d'un combustible liquide est son atomisation en fines gouttelettes afin de créer un bon mélange air-liquide. L'atomisation est, par définition, l'action de scinder le jet en petites gouttelettes. Les techniques les plus utilisées pour fragmenter le jet d'un combustible liquide sont : l'atomisation par pression et l'atomisation

par pulvérisation d'air comprimé. Une description pertinente des deux systèmes et des brûleurs en général peut être consultée dans le chapitre 17 de «Industrial Burners Handbook» (Baukal Jr, 2003).

L'utilisation des atomiseurs par pression est un peu délicate lors de la combustion des huiles pyrolytiques. En effet, l'huile est visqueuse donc elle nécessite de plus hautes pressions d'injection comparativement aux hydrocarbures pétroliers conventionnels. De plus, les matières solides présentes dans l'huile de pyrolyse risquent de colmater l'injecteur (Baukal Jr, 2003).

L'emploi des atomiseurs par pulvérisation d'air comprimé réduit le stress sur la pompe du combustible et l'injecteur d'une part et la charge de chauffage de l'huile (dans le but de diminuer sa viscosité) d'autre part, sans oublier le fait que ces atomiseurs facilitent davantage le mélange air-combustible. La quasi-totalité des études faites avec la bio-huile emploient l'atomisation par pulvérisation (Choi et al., 2016; Diebold et al., 1994; Ji-Lu et Yong-Ping, 2010; Kowalewski, 2015; Krumdieck et Daily, 1998; Martin et Boateng, 2014; Sequera et al., 2008; Shihadeh et al., 1994; Stamatov, Honnery et Soria, 2006; Steele, Parish et Cooper, 2012; Tzanetakis et al., 2010). En effet, Lefebvre (1988) recommande les atomiseurs par pulvérisation d'air pour les fluides ayant une viscosité supérieure à 20 mm²/s.

Les atomiseurs par pulvérisation d'air se divisent en deux types : avec mélange interne et avec mélange externe. Après avoir comparé ces deux types d'injecteurs, Krumdieck et Daily (1998) ont conclu que l'atomiseur avec mélange interne est l'injecteur ayant la puissance requise pour bien atomiser l'huile pyrolytique. En effet, ce système utilise l'air comprimé et il se trouve que délivrer cet air avec une pression supérieure à celle du combustible de 6.9 à 13.8 kPa améliore l'atomisation.

La qualité d'atomisation est généralement décrite par le SMD du jet (Sauter Mean Diameter). Le SMD représente une gouttelette ayant un diamètre égal au rapport entre le volume et la surface des gouttes d'un jet donné. Il dépend à la fois des propriétés du combustible *e.g.*

viscosité, tension à la surface et masse volumique, et celles de l'injecteur. Plus le SMD est faible plus l'atomisation et par conséquent la combustion sont meilleures. Plusieurs corrélations sont utilisées afin de spécifier le SMD des bio-huiles à l'instar des expressions définies par Lefebvre (1988) et Chiaramonti et al. (2005).

En addition à ce paramètre, il est important aussi de caractériser la répartition des gouttelettes du jet. Plusieurs chercheurs ont étudié la caractérisation du jet des huiles pyrolytiques. García-Pérez et al. (2006) ont étudié l'atomisation de l'huile obtenue par pyrolyse sous vide des écorces du bois de conifères avec un atomiseur par pression. Leurs expériences ont montré qu'il est possible d'avoir un SMD inférieur à 50 μm . La distribution des gouttelettes de l'huile de pyrolyse indique des diamètres de gouttes aussi grands que 150 μm mais ceci ne causerait pas de problème si le temps de résidence dans la chaudière permet une combustion complète de ces gouttelettes (García-Pérez et al. (2006).

Une revue de littérature exhaustive résumant les travaux faits sur l'atomisation de l'huile pyrolytique pure et des mélanges de l'huile de pyrolyse avec de l'éthanol et du diesel a été publiée par Soo-Young No (2014). Diverses corrélations de SMD utilisées dans la littérature sont présentées. Cette revue de littérature résume aussi les recherches portant sur l'emploi de ces biocombustibles dans les moteurs à compression, les chaudières et les turbines à gaz. Il est rapporté que la combustion de l'huile de pyrolyse peut remplacer l'huile de chauffage ou le diesel lors de la production d'électricité ou du chauffage. En général, l'emploi de l'huile pyrolytique pure ou en mélange fait augmenter les émissions carbonées (CO_2 , CO, HC et suies) quand l'atomisation est insuffisante (No, 2014).

Afin d'améliorer la combustion de la bio-huile, la méthode couramment utilisée est de préchauffer l'huile afin de réduire sa viscosité et sa tension superficielle (Diebold et al., 1994; Lehto et al., 2014; Shaddix et Hardesty, 1999; Shihadeh et al., 1994). Ceci permet en effet de diminuer le SMD du jet. Contrairement à l'huile de chauffage, l'huile de pyrolyse ne doit pas être chauffée dans le réservoir de stockage mais plutôt à quelques centimètres avant l'injection. La température de la bio-huile ne doit pas dépasser 80 °C (Lehto et al., 2013) afin

d'éviter la polymérisation de la bio-huile et donc le changement de ses propriétés et le colmatage de l'injecteur. La viscosité du combustible recommandée pour une bonne atomisation lors de la combustion à injection est entre 4 et 25 mm²/s (Lehto et al., 2013).

Finalement et puisque l'huile de pyrolyse a un faible pH (typiquement entre 2 et 3) et une haute teneur en eau, il est important que les conduites en contact direct avec le combustible résistent à l'acidité. Il est ainsi recommandé d'utiliser des matériaux comme l'acier inoxydable et/ou le Teflon (PTFE) (Czernik et Bridgwater, 2004).

Les injecteurs Delavan ont été conçus pour l'utilisation dans des chaudières domestiques et industrielles à huile de chauffage. Dans des travaux antérieurs (Martin et Boateng, 2014; Sequera et al., 2008), ces injecteurs ont fait leur preuve pour l'utilisation avec l'huile de pyrolyse. En se basant sur la littérature, l'atomisation par pulvérisation d'air avec mélange interne est choisie (injecteur Delavan 30610-1). La coupe transversale et la vue de la surface d'injection ainsi que les dimensions sont illustrées à la Figure 2.3.

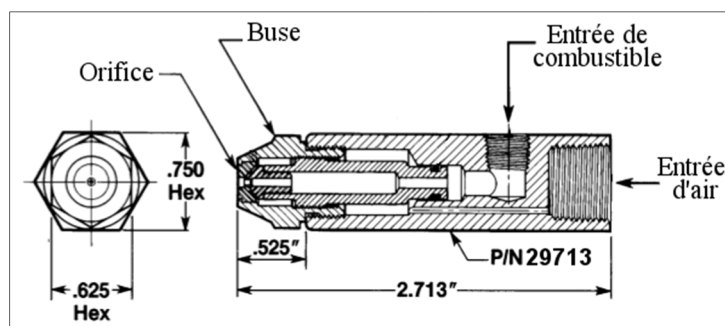


Figure 2.3 Injecteur Delavan.
Adaptée de (Delavan, 2000).

L'injecteur choisi est capable, sans l'utilisation d'une pompe, d'aspirer le combustible et de l'injecter. Ceci est possible grâce à l'utilisation de l'air comprimé qui entraîne le combustible et à l'introduction d'une hauteur de siphon. La variation de ces deux paramètres permet de faire varier le débit du combustible injecté. Dans le cas présent, c'est-à-dire une disposition verticale de l'injecteur comme représenté à la Figure 2.4, la hauteur de siphon représente la

distance entre la surface libre du combustible et la surface supérieure de la buse c'est-à-dire au niveau de l'injection.

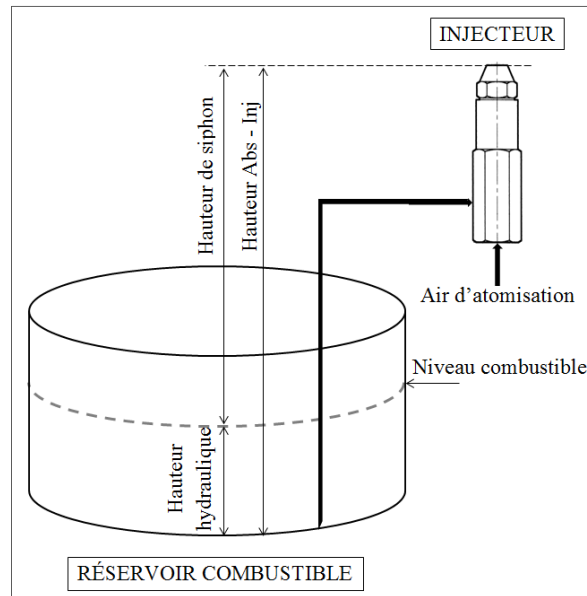


Figure 2.4 Injection et diverses hauteurs.

Il est aussi noté qu'au lieu de mesurer la hauteur de siphon, il était plus convenable de mesurer la hauteur entre le fond du réservoir et la sortie de l'injecteur (hauteur Abs-Inj) car la hauteur du carburant dans le réservoir (hauteur hydraulique) change lors de la combustion. La hauteur notée *Hauteur Abs-Inj* sera considérée comme paramètre de variation du débit du combustible tout le long de ce travail.

Pour un débit d'air d'atomisation égal à 10.6 LPM, la variation du débit du diesel en fonction de la hauteur entre l'absorption et l'injection est représentée à la Figure 2.5.

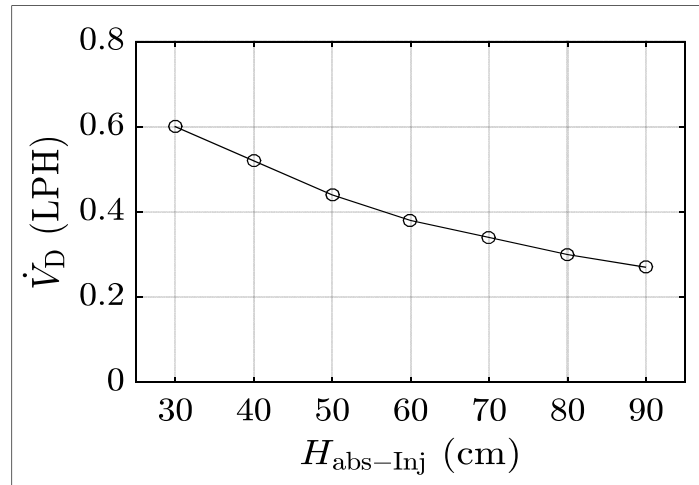


Figure 2.5 Débit du diesel en fonction de la hauteur entre l'absorption et l'injection.

2.2.2.4 Flamme pilote

L'allumage de l'huile pyrolytique est difficile. Ceci tient au fait qu'elle contient, généralement, une quantité importante d'eau et que la chaleur latente d'évaporation de l'eau est élevée. Plusieurs solutions se présentent : préchauffer l'air dans la chambre de combustion en faisant circuler l'air de combustion chaud avant d'introduire le combustible en question (Khodier et al., 2009), ou préchauffer la chambre de combustion en commençant par brûler un combustible conventionnel (Ji-Lu et Yong-Ping, 2010). Les radiations émises par les parois et le mélange avec les gaz chauds de la chambre permettent d'augmenter les températures locales afin d'assister l'allumage et de stabiliser la flamme de bio-huile. Toutefois un allumeur au gaz ou électrique est indispensable pour allumer la flamme de bio-huile (Lehto et al., 2014; Stamatov, Honnery et Soria, 2006).

Afin d'enflammer le jet de combustible et de diminuer les émissions polluantes, une torche à flamme pilote (Hoke 110-406) avec un prémélange méthane/air a été utilisée comme dans les montages expérimentaux de (Krumdieck et Daily, 1998; Lehto et al., 2014; Tzanetakis et al., 2010). La richesse de cette flamme peut être ajustée en utilisant le contrôleur de débit de méthane ainsi qu'en régulant la pression de sortie de la bouteille d'air. La torche est

représentée dans la Figure 2.6. De plus, un dispositif de sécurité est installé sur la ligne de méthane afin d'éviter le retour de flamme.



Figure 2.6 Photographie de la torche.
Adaptée de (Hoke Torche, 2016)

2.2.3 Systèmes d'alimentation et instrumentation du montage

La Figure 2.7 schématise le brûleur, les systèmes d'alimentation en air et en combustibles ainsi que l'instrumentation utilisée.

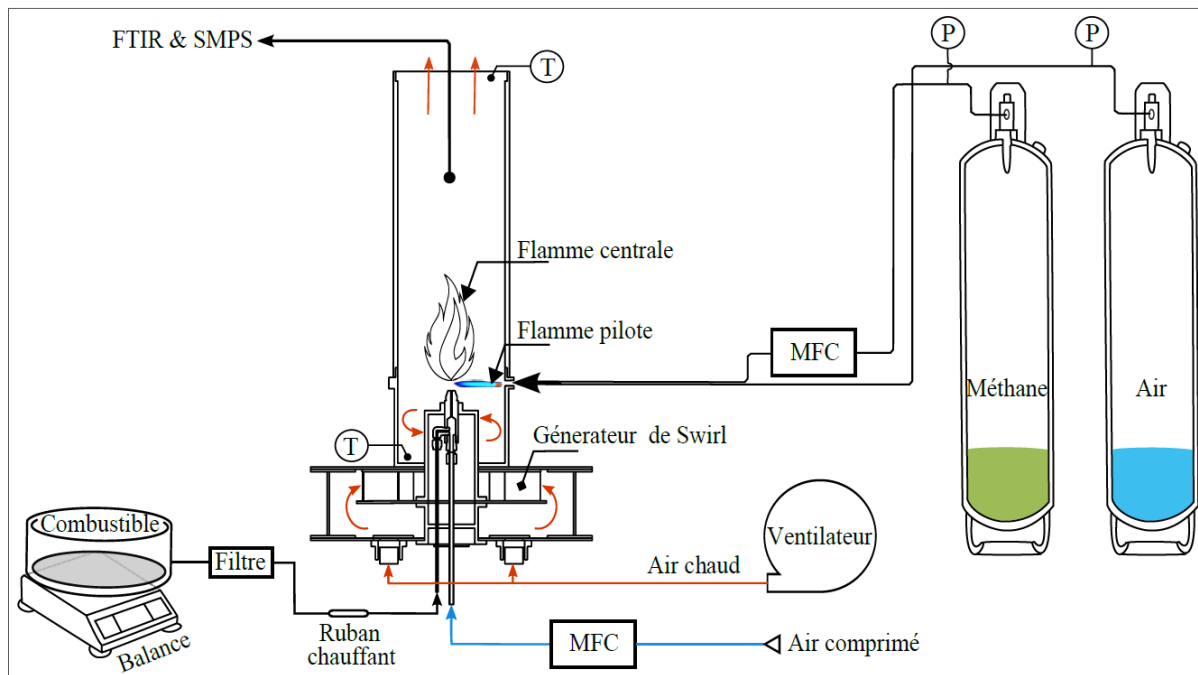


Figure 2.7 Dispositif expérimental.

L'injecteur choisi, comme déjà mentionné dans la section 2.2.2.3, est capable d'aspirer le combustible et de l'injecter. En effet, le combustible est entraîné grâce à l'utilisation de l'air comprimé. Cet air appelé air d'atomisation est alimenté par le réseau d'air comprimé de l'ÉTS. Un contrôleur de débit de 0 à 15 LPM est installé (Omega FMA5400/FMA5500).

Le débit de combustible est déterminé en mesurant la variation temporelle du poids dans le réservoir à l'aide d'une balance électronique de capacité maximale égale à 2100 g et de résolution égale à 0.1 g (Ohaus NV2101). Le combustible est ensuite filtré à 90 microns (Delavan 60046-1). Il peut être, selon l'utilisation, chauffé à l'aide d'un ruban (STH051-020) enroulé sur la partie supérieure côté injection du tube en acier inoxydable. Afin d'éviter la polymérisation de l'huile de pyrolyse, sa température ne doit pas dépasser les 80 °C.

L'air de combustion est fourni par le ventilateur centrifuge (McMASTER-Carr 3308K35) avec un débit maximal de ~32 CFM (910 LPM). Une estimation de ce débit est présentée dans la section 3.2. Le ventilateur est muni d'une résistance chauffante permettant de préchauffer l'air de combustion à une température de ~140 °C. Quatre conduites similaires acheminent l'air de combustion du ventilateur jusqu'au caisson d'air.

Un prémélange méthane-air alimente la torche de flamme pilote dont les détails ont été présentés dans la section 2.2.2.4. La richesse de cette flamme peut être ajustée en utilisant le contrôleur du débit de méthane (Omega FMA5400/FMA5500) ainsi qu'en régulant la pression de sortie de la bouteille d'air.

La température T_a de l'air de combustion à la sortie des blocs est mesurée avec un thermocouple de type K. La température T à la sortie de la chambre de combustion est mesurée avec un thermocouple rigide de type K. La valeur de cette température est à la fois une indication de la qualité de la combustion et une mesure de sécurité. En effet, si la flamme centrale s'éteint, la température chute très vite. En détectant que T atteint une certaine limite inférieure, une commande de contrôle est envoyée pour fermer la vanne de l'air d'atomisation et par conséquent l'injection du combustible est coupée.

L'acquisition des données de températures, du poids du combustible et du taux d'oxygène dans les gaz d'échappement ainsi que le contrôle des débits de l'air d'atomisation et de méthane sont opérés à l'aide du logiciel LabVIEW.

Les échantillons des gaz d'échappement sont extraits de la partie supérieure de la chambre de combustion via une sonde de 4.8 cm de diamètre. Le fonctionnement des systèmes de mesures des émissions polluantes sont décrits dans la section suivante.

2.3 Systèmes de mesure des émissions polluantes de la combustion

2.3.1 Analyse des polluants gazeux

Les méthodes d'analyse des gaz peuvent être divisées en deux grandes catégories : méthodes par chromatographie en phase gazeuse ou par spectroscopie optique. La chromatographie en phase gazeuse repose sur le principe de séparation des molécules d'un échantillon. Dépendamment de leurs affinités avec la phase stationnaire, les molécules atteignent les unes après les autres le détecteur utilisé. Il existe plusieurs types de détecteurs. Par exemple : le détecteur à ionisation de flamme (FID : Flame Ionization Detector), le détecteur à photo-ionisation (PID : Photoionization detector), etc. (Novelli, 1999).

La spectroscopie optique repose sur le principe d'absorption. Un échantillon traversé par une radiation absorbe certaines fréquences dépendamment des molécules qui le constituent. Les principaux analyseurs de cette catégorie sont : les spectromètres Infrarouge non-dispersifs (NDIR : Nondispersive Infrared Spectroscopy), les spectromètres Infrarouge à transformée de Fourier (FTIR : Fourier Transform Infrared Spectroscopy) (Novelli, 1999).

Le spectromètre FTIR est un instrument qui permet une analyse rapide (de l'ordre de quelques minutes) et sans prétraitement des échantillons. De plus, cette analyse est non-destructive. Les radiations IR ne changent pas la composition chimique de l'échantillon.

Cette méthode est fréquemment utilisée dans le domaine de la combustion (SSI, 2016). Par ailleurs, elle a été choisie au laboratoire TFT pour mesurer les émissions polluantes gazeuses.

En utilisant le spectromètre FTIR modèle 600 de CAI, les concentrations volumiques des espèces chimiques suivantes sont mesurées : le dioxyde de carbone CO_2 , le monoxyde de carbone CO , les hydrocarbures imbrûlés HC de non méthane rapportées en équivalent propane C_3H_8 , le formaldéhyde HCHO , le dioxyde d'azote NO_2 et le monoxyde d'azote NO . Afin d'acquérir une meilleure compréhension de la provenance des mesures, le phénomène physique déployé ainsi que le fonctionnement du système sont décrit ci-après. Une schématisation des éléments de base constituant le FTIR est aussi présentée à la Figure 2.8.

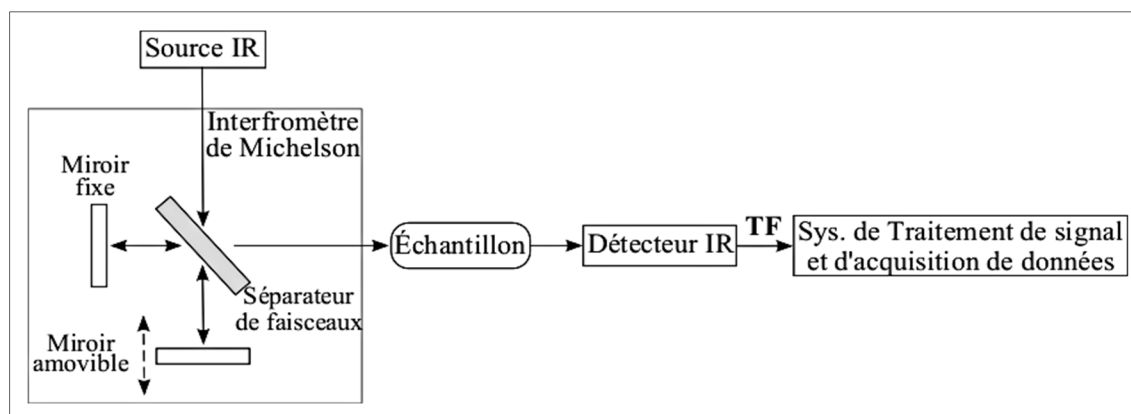


Figure 2.8 Éléments de base du FTIR.

La spectroscopie Infra-rouge est l'étude des interactions entre la matière et le champ électromagnétique dans la région IR. Dans cette région spectrale, les ondes électromagnétiques interagissent avec les liaisons moléculaires. Les liaisons d'une molécule gazeuse non symétrique s'étirent, se plient et entrent en rotation lorsqu'elles absorbent la lumière IR. En d'autres termes, la molécule peut être excitée à un niveau d'énergie vibratoire supérieur en absorbant l'irradiation IR (CAI, 2016).

Dans la spectroscopie IR, le rayon provenant d'une source IR passe à travers un échantillon : une partie de l'irradiation est absorbée par l'échantillon et une partie est transmise vers le

détecteur. Le spectre obtenu représente l'absorption et la transmission moléculaires, créant ainsi une empreinte moléculaire qui ne peut être produite que par l'échantillon en question. Les pics dans le spectre indiquent les fréquences des vibrations des liaisons entre les atomes composant la matière. En plus d'identifier les molécules dans l'échantillon (analyse qualitative), l'intensité des pics dans le spectre est une mesure des concentrations qui sont présentes (analyse quantitative) (ABB, 2016).

Le système d'analyse utilise une source IR émettant une large bande de radiation IR avec une longueur d'onde λ allant de 1.3 à 32.8 μm ainsi un nombre d'onde $\sigma = 10^4 / \lambda$ allant de 7500 à 305 cm^{-1} (CAI, 2016). Il est, par la suite, essentiel de connaître les fréquences qui sont absorbées de celles qui sont transmises. Dans les spectromètres conventionnels, un prisme ou un réseau de diffraction sont utilisées afin de séparer les fréquences individuelles du rayonnement IR. Le détecteur mesure ensuite la quantité d'énergie transmise pour chaque fréquence ayant traversée l'échantillon. Le FTIR emploie un interféromètre (souvent l'interféromètre de Michelson) qui a pour rôle de moduler chaque fréquence IR individuelle. En d'autres termes, l'interféromètre génère un signal unique contenant toutes les informations du spectre IR en question. En effet, quand le rayon IR atteint le séparateur de faisceaux, la moitié est réfléchi vers un miroir fixe qui la réfléchit une fois de plus vers le séparateur de faisceaux et l'autre moitié est transmise vers le miroir amovible qui la réfléchit aussi vers le séparateur de faisceaux. Les deux faisceaux se rencontrent de nouveau, la distance optique parcourue par le premier faisceau est toujours fixe alors que celle parcourue par le deuxième change constamment. En quittant l'interféromètre et puisqu'ils proviennent de la même source IR et ont une différence de distance optique dépendamment de la position du miroir amovible, les deux faisceaux interfèrent avec différentes phases ce qui crée une variation d'intensité du rayonnement IR. La lumière passe ensuite à travers l'échantillon à analyser. Une partie de l'irradiation sera absorbée et le reste sera transmis et atteindra le détecteur qui le convertit en signal électrique. Le signal sinusoïdale mesuré par le détecteur est appelé interférogramme qui est la représentation de l'intensité de l'irradiation IR (Physics course.NUS, 2016).

L'application de la transformée de Fourier (TF) à l'interférogramme résulte en un spectre à faisceau unique : une représentation de l'intensité mesurée par le détecteur en chaque fréquence optique. Ce type de spectre contient des informations sur l'échantillon à analyser mais aussi sur le système de mesure au complet entre autre la source IR, toutes les composantes optiques, l'air ambiant et toute contamination pouvant influencer la trajectoire optique. Il est indispensable, par conséquent, d'extraire l'information sur l'échantillon et d'éliminer toutes les autres. Pour ce faire, il faut tout d'abord déterminer le spectre à vide en remplissant le compartiment recevant l'échantillon à analyser par un gaz n'ayant pas d'empreinte spectrale dans la région spectrale utilisée (*e.g* l'air sec, l'azote sec).

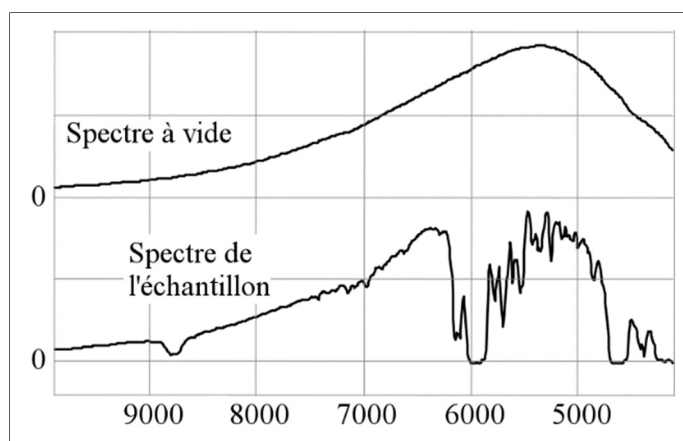


Figure 2.9 Spectre de l'échantillon et spectre à vide.
Adaptée de (ABB, 2016).

La Figure 2.9 montre un exemple de spectre de l'échantillon et de spectre à vide avec en abscisse le nombre d'onde en cm^{-1} et en ordonné l'intensité de la lumière mesurée par le détecteur en question. En les comparant, il est perceptible que l'échantillon absorbe de la lumière à différentes fréquences. Le taux de transmittance de l'échantillon par rapport au spectre à vide est par ailleurs déterminé. La représentation graphique de ce ratio en fonction du nombre d'onde donne le spectre d'absorption de l'échantillon (ABB, 2016; Daham, 2016).

Pour effectuer une analyse de plusieurs composants chimiques, mis à part le spectre à vide et le spectre de l'échantillon, il faut acquérir les spectres de référence de tous les composants

gazeux à analyser dans l'échantillon. Un spectre de référence est un spectre d'un composant gazeux unique de concentration connue. Dans l'analyse multi-composants, ces spectres de référence sont combinés afin d'obtenir un spectre qui est aussi proche que possible du spectre de l'échantillon. Si un spectre similaire au spectre de l'échantillon est obtenu, la concentration de chaque composant gazeux dans l'échantillon est déterminée en utilisant des multiplications des concentrations des gaz dans les spectres de référence (ABB, 2016).

L'échantillonnage sur les gaz chauds est fait à l'extrémité de la chambre de combustion (voir section 4.4) et est amené dans une conduite chauffée jusqu'au FTIR. En effet, le filtre (Atmo-Seal FPI-4-7/1, 95 % à 0.01 μm), la conduite (Atmo-Seal IGH-360-T-4/3-R07), la pompe et le FTIR sont à une température de 191°C, et ce pour éviter toute condensation depuis la prise d'échantillon jusqu'à l'analyse dans le FTIR. Les concentrations des différents composés chimiques sont déterminées grâce à des algorithmes de chimiométrie programmés dans le logiciel OPUS. Le logiciel OPUS fait 16 mesures d'échantillons durant un peu plus d'une minute pour le calcul des concentrations des émissions gazeuses de la combustion. Ce programme comprend déjà les spectres de référence des molécules à analyser. Aucune calibration n'est requise. Cependant, un spectre à vide doit être effectué. Un générateur d'air pur (CAI modèle ZAG-6L) est employé afin d'éliminer toute impureté présente dans l'air provenant d'un compresseur. Les HC et le CO sont d'abord oxydés en CO_2 . Par la suite, des colonnes d'absorptions sont par la suite utilisées pour éliminer l'eau, le CO_2 , le NO_2 et le SO_2 . Ainsi est obtenu de l'air propre (Plamondon, 2015).

Puisque le dioxygène est une molécule symétrique, le FTIR n'est pas capable de la mesurer. Un analyseur de gaz (CAI modèle 200) est alors installé pour mesurer le taux d'oxygène dans les gaz d'échappement. Cette valeur est enregistrée chaque seconde.

2.3.2 Analyse des particules

La mesure des particules émises lors de la combustion est effectuée moyennant le spectromètre de mobilité électrique (SMPS : Scanning Mobility Particle Sizer spectrometer,

modèle 3936, TSI). La mobilité électrique d'une particule est son aptitude à se déplacer dans un champ électrique. En bref, le principe d'opération du SMPS est basé sur l'extraction d'un aérosol polydispersé à l'origine en plusieurs fractions monodispersées regroupant les particules de la même taille et ce selon leurs mobilités électriques dans un champ électrique. Les fractions monodispersées de particules sont, par la suite, comptées.

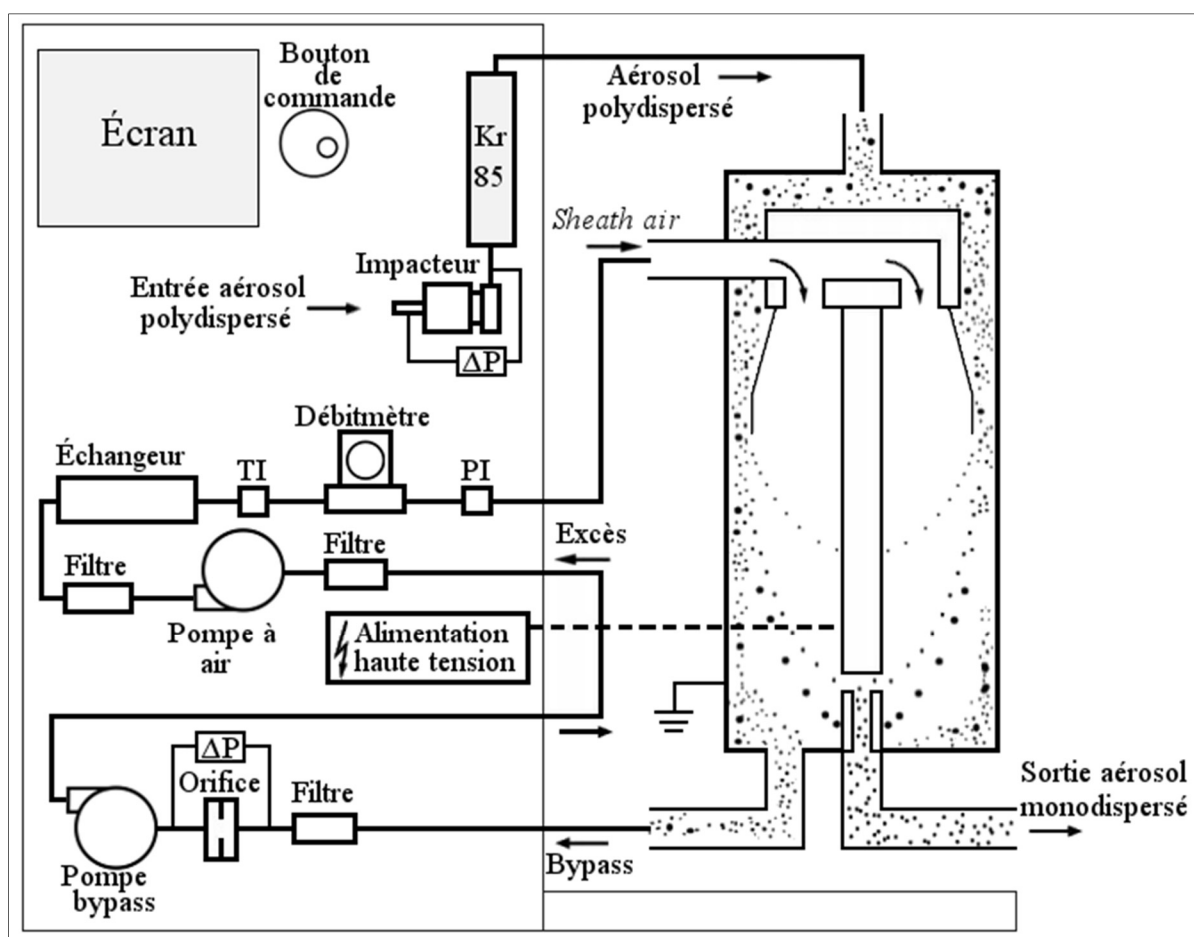


Figure 2.10 Classificateur électrostatique et analyseur différentiel de mobilité.
Adaptée de (TSI, June 2010).

La Figure 2.10 montre à gauche les différentes composantes du classificateur électrostatique (modèle 3080, TSI) et à droite l'analyseur différentiel de mobilité (modèle 3081, TSI) qui sont utilisés dans cette étude.

En effet, l'échantillon de gaz d'échappement tiré rentre en premier lieu dans l'impacteur qui enlève toutes les particules ayant un diamètre supérieur à sa limite maximale et ce par impaction interne. L'impaction interne est la séparation des particules par des changements brusques de direction du flux gazeux : les grosses particules, du fait de leurs grandes inerties, ne suivent pas les lignes de courant de l'aérosol et viennent frapper des obstacles judicieusement disposés contre lesquels elles perdent leurs vitesses, ce qui les fait tomber par gravité tandis que les particules de plus faibles inerties suivent les lignes de courant et atteignent l'équilibreur de charge. Ce dernier est une source radioactive (le Krypton-85), et est exposé à une grande concentration d'ions bipolaires. Les particules et les ions subissent plusieurs collisions dues à l'agitation thermique aléatoire des ions. En effet, plus une particule accumule des charges plus sa capacité à se charger diminue (aussi plus son diamètre est grande, plus sa capacité augmente). Les particules atteignent vite un état d'équilibre de distribution de charge dit de Fuchs.

L'aérosol chargé passe après dans l'analyseur différentiel de mobilité (DMA : Differential Mobility Analyser). Ce dernier est composé essentiellement d'un cylindre avec une sonde au centre. La sonde centrale est chargée négativement alors que le cylindre externe est relié à la masse. L'aérosol polydispersé et l'air dépourvu de particules dit « sheath air » sont introduits du haut et descendent dans l'espace annulaire. Les particules chargées positivement se déplacent à travers le flux d'air laminaire et sont attirées par la sonde centrale. Les particules sont, ainsi, précipitées le long de la sonde centrale et la position des particules précipitées est fonction de leurs mobilités électriques, du débit et de la géométrie du DMA. Ainsi les particules ayant une mobilité électrique élevée sont précipitées sur la partie supérieure de la sonde et les particules avec une mobilité électrique inférieure sont collectées sur la partie inférieure de la sonde. Les particules quittent avec le flux d'air monodispersé à travers une fente se trouvant au-dessous de la sonde centrale. Le diamètre des particules passant à travers la fente du classificateur est fonction du voltage de la sonde centrale, du nombre de charges sur une particule, du débit et de la géométrie du DMA. En balayant exponentiellement le voltage de la sonde centrale de 0 à 10,000 V, une distribution complète des tailles des particules est établie. Par la suite, ces particules sont transférées à un compteur de particules

qui déterminera la concentration en particules. Les particules restantes sont rejetées avec l'excès d'air (TSI, June 2010).

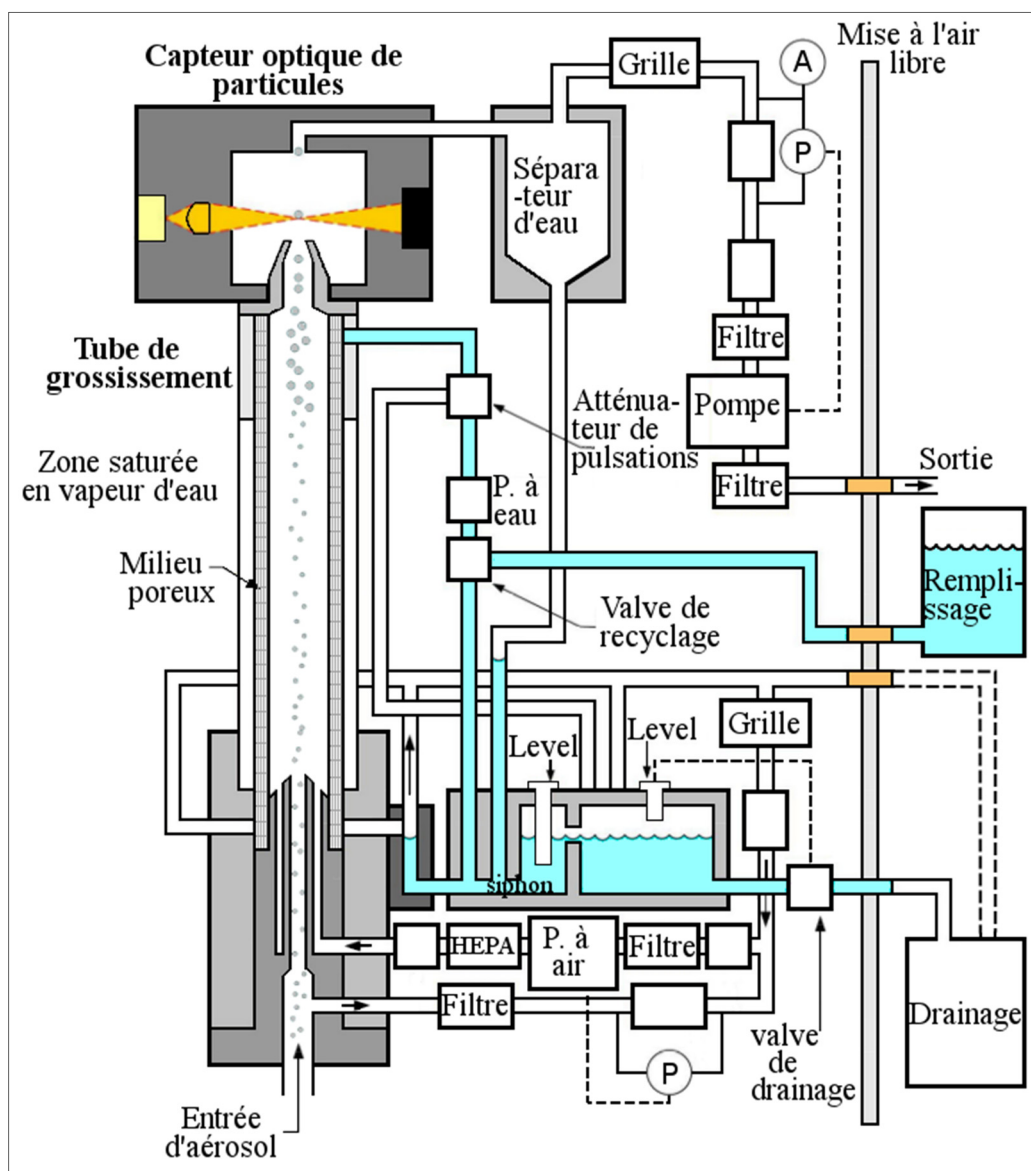


Figure 2.11 Compteur de particules ultrafines à base d'eau.
Adaptée de (TSI, Avril 2005).

Une fois les particules classées selon leurs mobilités électriques, leurs concentrations (c'est-à-dire le nombre de particules par unité de volume d'air pour chaque taille de particule) sont mesurées à l'aide du compteur de particules ultrafines à base d'eau (UWCPC : Ultrafine

Water-based Condensation Particle Counter). La Figure 2.11 schématise les diverses composantes du compteur de particules ultrafines à base d'eau (modèle 3786, TSI) utilisé dans cette étude. Ce compteur repose sur une technique de condensation c'est-à-dire qu'un fluide de travail (l'eau dans ce cas) est déposé sur la particule afin d'amplifier sa taille à une valeur pouvant être détectée par un capteur optique conventionnel. En effet, le flux monodispersé d'aérosol représente un flux laminaire qui passe en premier lieu dans une zone saturée en vapeur d'eau. Les particules jouent le rôle de noyaux pour la condensation d'eau. Les particules élargies traversent par la suite un volume de visualisation illuminé par un faisceau laser pour être détectées et comptées par le capteur optique (TSI, Avril 2005).

Le SMPS est commandé par le logiciel AIM : Aerosol Instrument Manager, qui reçoit l'information du CPC à chaque dixième de seconde. Les données de tailles et de concentrations sont envoyées séparément et sont combinées par la suite dans le même tableau par le logiciel.

2.4 Mélange huile de pyrolyse-diesel

2.4.1 Valorisation de l'huile de pyrolyse

L'huile de pyrolyse de bois est d'une couleur brun foncé et est séparée en deux phases : une fraction légère contenant l'eau et les éléments solubles dans l'eau se forme sur le dessus. Une fraction beaucoup plus lourde et qui contient les particules solides se dépose au fond au fur et à mesure que l'huile vieillit. Afin d'homogénéiser cette huile de pyrolyse, il est recommandé de la mélanger mécaniquement (Diebold et al., 1994).

Une méthode permettant de réduire la teneur des particules et la viscosité de la bio-huile est celle utilisée par Stamatov, Honnery et Soria (2006) qui ont filtré l'huile de pyrolyse à l'aide d'un filtre en verre fritté. Par la suite et afin de minimiser l'excès en eau, ils l'ont purifié en la chauffant sous vide dans un bain d'eau à une température comprise entre 70 et 80 °C. Il est aussi possible d'effectuer une filtration des vapeurs chaudes lors de la production c'est-à-dire

avant condensation. Il a été rapporté que des tests en moteur diesel réalisés avec une bio-huile filtrée et une bio-huile dont les vapeurs chaudes étaient filtrées montrent une augmentation du taux d'énergie thermique dégagée et une diminution du délai d'inflammation pour la dernière (Shihadeh, 1998).

Dans le but d'améliorer la combustion de l'huile pyrolytique, il est pratique de la mélanger avec un combustible plus léger. Dans plusieurs études (Choi et al., 2016; Krumdieck et Daily, 1998; Stamatov, Honnery et Soria, 2006; Tzanetakis et al., 2011) des émulsions avec l'éthanol en proportions différentes sont utilisées. Cet additif permet d'améliorer les propriétés physiques du combustible : augmenter le pouvoir calorifique et réduire la viscosité, la tension superficielle ainsi que la masse volumique, afin de mieux l'adapter aux équipements utilisés : chaudière, turbine à gaz ou moteur thermique.

Dans le cas présent, les quantités existantes de bio-huiles sont assez limitées, il est donc impossible de brûler de l'huile de pyrolyse pure. L'addition du carburant diesel à l'huile pyrolytique afin de former une émulsion homogène et stable semble l'approche la plus adaptée aux systèmes de combustion existants dans les entreprises serricoles québécoises car elle nécessite le moins de modifications. Ainsi il était convenu dans ce travail de mélanger l'huile de pyrolyse de bois au diesel.

Par contre, l'huile de pyrolyse n'est pas miscible dans le diesel. Elle peut se disperser temporairement dans le diesel lors du mélange mais la séparation commence dès lors que l'agitation est arrêtée. Ceci est bien visible dans la Figure 2.12. où 30 % en volume d'huile de pyrolyse de bois a été mélangé avec 70 % de diesel. La figure (a) montre le résultat obtenu après mélangeage manuel à température ambiante pendant 30 minutes. Alors que la figure (b) illustre le résultat obtenu après mélangeage à 2000 rpm pendant 5 heures aussi à température ambiante. Dans, le cas (b), la couleur du diesel a changé du jaune clair à l'orange foncé et la texture est plus visqueuse. Ce qui indique la dissolution de quelques composants chimiques de la bio-huile dans le diesel. Mais la fraction lourde de la bio-huile se sépare et se dépose en bas dès lors que le processus de mélangeage est arrêté. Il a été remarqué que la couleur de la fraction supérieure est foncée quand le temps de mélange est plus long ou bien quand la

vitesse de mélange est plus importante. Ceci a été aussi noté par Weerachanchai, Tangsathitkulchai et Tangsathitkulchai (2009), qui ont ajouté que plus la quantité de la bio-huile dans le mélange est importante, plus la couleur est foncée.

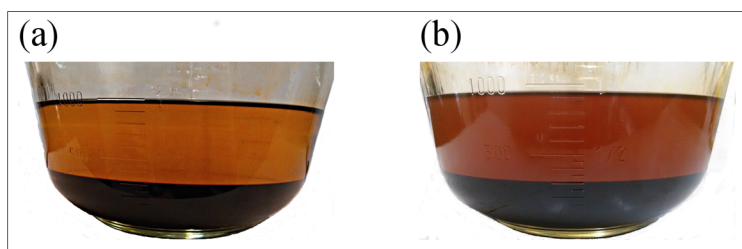


Figure 2.12 Mélange huile de pyrolyse-diesel.

Afin de stabiliser un mélange homogène huile pyrolytique-diesel, un additif est requis. Cet additif est appelé surfactant; un mot d'origine anglaise : « surface active agent ». En effet, il diminue la tension superficielle entre deux ou plusieurs phases du mélange. Il est composé de molécules présentant deux parties de polarités différentes : l'une retenant les matières grasses (lipophile) et apolaire, l'autre miscible dans l'eau (hydrophile) et polaire. Il permet de solubiliser deux entités non miscibles, et ce en interagissant par sa partie hydrophobe avec l'apolaire (qui est désignée, dans l'émulsification, par l'huile) et par sa partie hydrophile avec la polaire (qui est désignée, dans l'émulsification, par l'eau). Lors du choix du surfactant, il est primordial de considérer la valeur de l'équilibre hydrophile/lipophile (HLB : Hydrophilic-Lipophilic Balance) dont l'échelle varie de 0 à 20. Si son HLB est compris entre 4 et 8, le surfactant est un tensioactif hydrophobe qui donnera préférentiellement des émulsions de type eau dans l'huile (W/O) où l'huile de pyrolyse représente 45 % ou moins de la masse totale du mélange. Si son HLB est compris entre 10 et 18 alors c'est un surfactant ayant un caractère hydrophile et donnera des émulsions de type huile dans l'eau (O/W) où l'huile de pyrolyse représente 55% ou plus de la masse totale du mélange. Entre les deux est obtenue une émulsion bi-continue où les concentrations massiques de la bio-huile et du diesel sont proches de 50 %. Pour de plus amples détails sur la théorie de l'émulsification, le travail de Chiaramonti et al. (2003) peut être consulté.

Lin et al. (2016) ont étudié la stabilité de l'émulsification ainsi que les caractéristiques de la stratification de quatre bio-huiles avec le diesel sous l'influence du surfactant utilisé : Atlox4914, Span80 et Tween80. Ils ont trouvé que le HLB dans le cas des émulsions de type eau dans l'huile (W/O) doit être entre 5.0 et 6.0 et que l'optimum est de 6.0. Une autre étude où différents types et quantités de surfactants ont été utilisés, montre que le mélange le plus stable est produit à des taux massiques de 32:8:1 en diesel:bio-huile:surfactant avec un HLB égal à 4.75 (Martin, Mullen et Boateng, 2014).

Ikura, Stanciulescu et Hogan (2003) ont étudié la stabilité des émulsions bio-huiles/diesel en fonction des paramètres de production. Leurs premiers tests ont indiqué que l'émulsification de la bio-huile entière produisait des stratifications de couches de couleur foncée contenant des particules solides. Ils ont par ailleurs enlevé la fraction lourde inférieure de la bio-huile par centrifugation et n'ont utilisé que la fraction plus légère pour l'émulsification. En conclusion, ils témoignent que la température a un impact minime alors que le temps de résidence, la puissance de l'homogénéisateur, la fraction de l'huile de pyrolyse dans le mélange et la quantité de surfactant utilisée ont un effet considérable sur la stabilité de l'émulsion. Une fraction de surfactant égale à 1.5 % de la masse totale du mélange donne des microémulsions, c'est-à-dire une émulsion complètement stable pour plus que 90 jours, avec des fractions de bio-huiles égales à 10, 20 ou 30 % de la masse totale. Les précipitations formées avec le vieillissement de l'émulsion peuvent être ré-émulsifiées en secouant légèrement le contenant.

2.4.2 Préparation de l'émulsion

Afin d'enlever la fraction lourde contenant les particules solides de l'huile de pyrolyse, une filtration est faite avec un tissu en toile de lin. Seule la fraction légère supérieure a été utilisée pour l'émulsification. Il est à noter que la fraction 30 % en volume de bio-huile était la fraction maximale pouvant être produite à partir des quantités d'huiles de pyrolyse de bois qui sont disponibles. La composition volumique 30 % bio-huile et 70 % diesel est donc utilisée. Au mélange hétérogène obtenu est ajouté le surfactant Hypermer B-246SF de Croda

dilué dans le méthanol avec une proportion 5:2 surfactant:méthanol. L'additif est employé avec une proportion de 1.5 % de la masse totale. L'émulsion a été réalisée avec un agitateur mécanique sous une vitesse de 2000 rpm et une température de 40 °C pendant 1 heure. Il est à noter que le HLB du Hypermer B-246SF est égal à 6. Le résultat de l'émulsification est présenté à la Figure 2.12.



Figure 2.13 Émulsion huile de pyrolyse/diesel.

2.5 Procédure expérimentale

La nomination « état de référence » sera utilisée pour désigner l'état caractérisé par une qualité de combustion optimale pour le diesel, c'est-à-dire le minimum d'émissions polluantes gazeuses.

Suite à la revue de littérature réalisée et présentée dans le premier et le deuxième chapitre la procédure expérimentale suggérée lors de l'étude de la combustion des mélanges huile de pyrolyse-diesel est la suivante :

- 1) Chauffer l'air de combustion jusqu'à une température T_a stable entre 130 et 140 °C et laisser cet air circuler dans la chambre de combustion. Ainsi le brûleur est préchauffé.

- 2) Allumer la flamme pilote et enregistrer ses émissions polluantes pendant 15 minutes.
- 3) Préchauffer le brûleur avec du diesel jusqu'à stabilisation des températures et des émissions polluantes (entre 20 minutes et 30 minutes) et ce sous les conditions de l'état de référence présentées dans le Tableau 4.4.
- 4) Changer du diesel au mélange huile de pyrolyse-diesel à tester en gardant les mêmes conditions de combustion.
- 5) Attendre jusqu'à atteinte du régime permanent : de 20 à 30 minutes.
- 6) Prendre les diverses mesures des émissions gazeuses et particulaires.
- 7) Dans le cas où un deuxième test est planifié alors changer du mélange huile de pyrolyse-diesel au diesel et reprendre l'étape 3). Ainsi non seulement la répétabilité sera vérifiée mais aussi, puisque la qualité de combustion est optimale sous les conditions de l'état de référence, les émissions polluantes résultant de la combustion de l'huile seront oxydées en brûlant le diesel.

Il est à noter que les quantités d'huile de pyrolyse de bois disponibles présentement ne permettent pas d'effectuer une étude paramétrique de sa combustion. Puisque le diesel est mélangé en quantité supérieure à l'huile de pyrolyse (70 % en volume), les paramètres optimaux de combustion du diesel seront utilisés pour la combustion des mélanges huile de pyrolyse-diesel.

2.6 Sommaire

Une recherche bibliographique sur la combustion de la bio-huile a permis le développement du montage expérimental en tenant compte des propriétés physico-chimiques de l'huile pyrolytique. Le brûleur à écoulement Swirl est composé d'un caisson d'air avec générateur de Swirl inspirés par les travaux de (Tzanetakis, 2011) ainsi qu'une chambre de combustion conçus et fabriqués à l'ÉTS, d'un injecteur par atomisation d'air avec mélange interne et une torche à prémélange méthane-air pour aider à enflammer l'huile de pyrolyse. Afin d'assurer une transition énergétique amortie, la combustion du mélange bio-huile et diesel a été jugée plus adaptée aux systèmes de chauffage de serre présentement utilisés. Une méthode

d'émulsification a donc été élaborée et testée. Finalement, une procédure expérimentale a été proposée. Par conséquent, les sous-objectifs 1 et 2 de ce mémoire ont été atteints. Dans le chapitre prochain, l'étalonnage et la répétabilité des mesures expérimentales de combustion seront traités.

CHAPITRE 3

ÉTALONNAGE DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étalonnage du montage expérimental. Une première partie présente la méthodologie de mesure du débit de l'air de combustion. Ensuite, un exemple de mesure du débit du combustible ainsi que la méthode de calcul du SMD des gouttelettes sont exposés. Par ailleurs, la correction qui doit être faite sur les émissions polluantes gazeuses est discutée. Les mesures de vérification de la répétabilité sont entreprises par la suite. Dans une dernière partie, l'analyseur de particules ainsi que les paramètres influant ses résultats sont étudiés. Tout ce chapitre se déroule en un seul point d'opération afin de caractériser le banc d'essais et ainsi aborder le troisième sous-objectif de ce mémoire. L'optimisation de la combustion sera poursuivie au dernier chapitre.

3.2 Débit du ventilateur

Le ventilateur utilisé est de type centrifuge avec une résistance chauffante occupant la moitié inférieure de la sortie cylindrique. Le diamètre de sortie du ventilateur D est de 4.75 cm. Afin d'estimer le débit d'air de combustion délivré par le ventilateur, un tube de Pitot statique (tube de Prandtl) a été utilisé sous les température et pression ambiantes standards. Ce dernier est placé à 5 cm de la sortie du ventilateur. Le profil de vitesse mesuré est présenté à la Figure 3.1 dans laquelle le rayon r est normalisé par rapport au diamètre de sortie du ventilateur D .

Une régression des vitesses est remarquée au niveau de la partie inférieure. Ceci est dû à la présence de l'élément chauffant qui bloque partiellement l'écoulement de l'air. L'intégration de ce profil sur la surface de sortie du ventilateur donne une vitesse moyenne de 8.5 m/s et donc un débit maximal de 910 LPM.

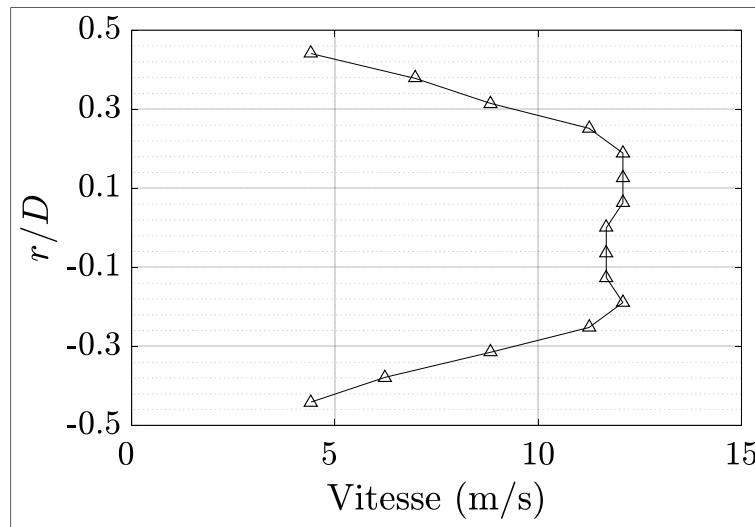


Figure 3.1 Profil de vitesse à la sortie du ventilateur.

Afin de minimiser la consommation de combustible durant les tests de combustion, il a été convenu de réduire le débit d'air de combustion, ainsi l'entrée du ventilateur a été partiellement fermée. Le débit d'air de combustion mesuré a pu être varié de 910 à 410 LPM. La valeur de 410 LPM sera utilisée dans le reste de travail.

3.3 Débit de combustible

Afin d'estimer le débit de combustible injecté une balance électronique est installée. Elle prend des mesures toutes les secondes et les envoie via la carte d'acquisition à l'ordinateur. La Figure 3.2 présente la variation temporelle du débit volumique du diesel. Pour la conversion en débit volumique, la masse volumique de 828 kg/m^3 a été utilisée. Dans le but d'alléger la représentation, les valeurs de débit de chaque minute ont été moyennées. Un débit moyen de 0.3 LPH est enregistré.

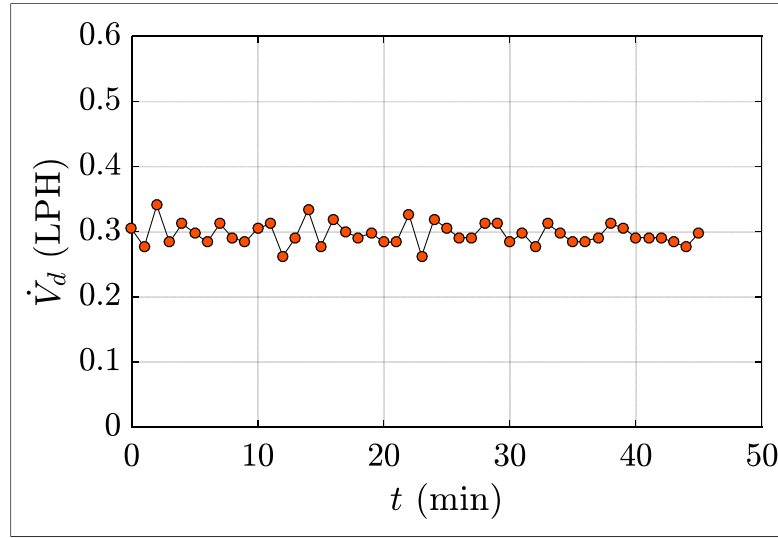


Figure 3.2 Variation temporelle du débit du diesel.

3.4 SMD

L'atomisation est une étape fondamentale lors de la combustion d'un liquide. Ceci permet de le fragmenter en petites gouttelettes de l'ordre du micron. L'atomisation du jet est souvent caractérisée par le SMD (Sauter Mean Diameter). Ce dernier représente une gouttelette ayant un diamètre égal au ratio du volume sur la surface du jet liquide entier (Lehto et al., 2014). Il est à la fois fonction du liquide et de l'atomiseur en question. Plusieurs corrélations expérimentales ont été regroupées par Lefebvre (1988). Dans le cas présent, c'est à dire un atomiseur par pulvérisation d'air et pour l'emploi du diesel et du mélange huile de pyrolyse-diesel comme combustible, l'expression développée par Lorenzetto et Lefebvre a été utilisée (Lefebvre, 1988) :

$$\text{SMD} = 0.95 \frac{\sigma m_L}{U_R \rho_L^{0.37} \rho_A^{0.3}} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A}\right)^{1.7} + 0.13 \left(\frac{\mu_L^2 d_0}{\sigma \rho_L}\right)^{0.5} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A}\right)^{1.7} \quad (3.1)$$

Cette expression dépend des propriétés des deux fluides : la vitesse relative U_R entre le liquide et l'air et le rapport massique $ALR = \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_L}$ (Air / Liquid Ratio), de la tension de surface σ , de la viscosité dynamique du liquide μ_L , de la masse volumique du liquide ρ_L , de

la masse volumique de l'air ρ_A et aussi de la géométrie de l'injecteur *i.e.* le diamètre de sortie du jet liquide d_0 .

Cette expression est valable pour une large gamme de liquides avec ρ_L allant de 794 à 2180 kg/m³ et un ALR allant de 1 à 16. En plus, elle prend bien en compte l'influence du débit de l'air employé afin d'atomiser le liquide. Cette corrélation sera utilisée dans le prochain chapitre afin d'illustrer la plage de SMD pouvant être atteinte par le banc expérimental proposé.

3.5 Correction du taux d'oxygène

Les mesures de concentrations des polluants enregistrées sont sujettes à la dilution dans l'air ambiant. Afin de remédier à la variation de la dilution entre chaque essai, une correction ramenant sur une même base d'oxygène est utilisée à l'aide de l'équation (3.2). Cette méthode est suggérée par la division « Emission Measurement Center » (EMC) du « US Environmental Protection Agency » (EPA) et utilisé par Choi et al. (2016) et Martin et Boateng (2014).

$$\% P_{cor} = \% P_s \frac{20.9 - \% O_{2cor}}{20.9 - \% O_{2s}} \quad (3.2)$$

Avec $\% P_{cor}$ la concentration corrigée du polluant, $\% P_s$ la concentration en polluant sur la base sèche, $\% O_{2cor}$ la concentration corrigée en oxygène et $\% O_{2s}$ la concentration en oxygène sur la base sèche.

Le calcul des concentrations sur la base sèche se fait comme suit (EPA) :

$$\% P_s = \frac{\% P_h}{1 - \frac{\% H_2O}{100}} \quad (3.3)$$

Avec $\% P_h$ étant la concentration en polluant sur la base humide et $\% H_2O$ la concentration en eau dans l'échantillon.

3.6 Mesures de répétabilité

Dans le présent travail, la réalisation de 4 tests de combustion de diesel a permis de vérifier et de valider ce critère expérimental important. L'ensemble des tests de répétabilité a été effectué sous les conditions d'opération résumées au Tableau 3.1.

La réalisation de ces tests a conduit aussi à choisir le bon réservoir de combustible. Puisque la variation de la hauteur hydraulique lors d'un test influence les résultats obtenus, il fallait utiliser un réservoir dont la géométrie présente une base suffisamment grande. De l'autre côté, il est contraignant lors de la combustion de l'huile de pyrolyse d'utiliser un grand volume puisque les quantités disponibles sont limitées. Ainsi un compromis a été fait entre la géométrie du réservoir et le volume de combustible utilisé en choisissant un réservoir à base circulaire de 15 cm de diamètre et de 7.5 cm de hauteur.

Tableau 3.1 Paramètres du test de répétabilité.

Paramètres de la combustion	Valeur
Débit du combustible	0.3 LPM
Débit de l'air d'atomisation	10.6 LPM
Débit de l'air de combustion	410 LPM
Température du combustible	Ambiante
Température de l'air de combustion	130 -140 °C
Débit du méthane de la flamme pilote	0.4 LPM
Nombre de Swirl	4.12
Position de prise des échantillons	20 cm

La Figure 3.3 illustre la variation de la température des gaz chauds à la sortie de la chambre de combustion T et la température de l'air de combustion à la sortie des blocs du générateur de Swirl T_a . Au début, l'air de combustion est chauffé à une température comprise entre 130 et 140 °C. Quand les températures T_a et T deviennent stables, la flamme pilote est allumée. Ainsi pendant 15 minutes, les émissions générées par la flamme pilote sont enregistrées. Après stabilisation, une moyenne est calculée pour chaque espèce chimique. Par la suite, l'injection de l'air d'atomisation est amorcée. Le diesel est par conséquent injecté et

enflammé par la flamme pilote. La stabilisation des émissions gazeuses prend 20 à 30 minutes. Par ailleurs les émissions associées à chaque espèce sont ensuite moyennées. La fraction générée par la flamme pilote est soustraite et le résultat est corrigé à 15 % d'oxygène. La valeur de 15 % a été choisie comme référence afin de rester proche des teneurs en O_2 enregistrées (comprises entre 13 et 17 %).

La chute de température qui apparaît avant l'allumage de la flamme pilote est causée par la procédure d'allumage de la flamme pilote. En effet, la cheminée est amovible afin de permettre d'allumer la torche et de la remettre à sa place initiale.

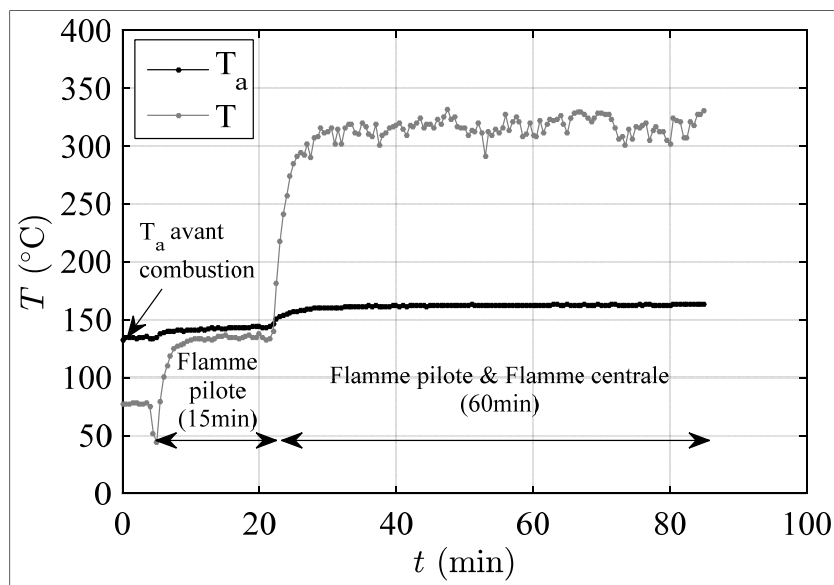


Figure 3.3 Évolution temporelle des températures.

La Figure 3.4 montre l'évolution temporelle de la température T correspondant aux quatre mesures depuis l'inflammation de la flamme pilote jusqu'à l'achèvement des 60 minutes de combustion du diesel. L'inflammation du diesel commence aux environs de la quinzième minute. Afin d'alléger la figure, une valeur est représentée toutes les 30 secondes.

Dix minutes après l'injection du diesel, la température dans la chambre de combustion se stabilise. À la sortie et pour cette série de mesure, les gaz brûlés atteignent une température

moyenne de 332 °C. Il est à noter que les mesures de T_a la température de l'air à la sortie des blocs est beaucoup moins fluctuante. Une température moyenne de 160 °C a été atteinte lors de la combustion du diesel.

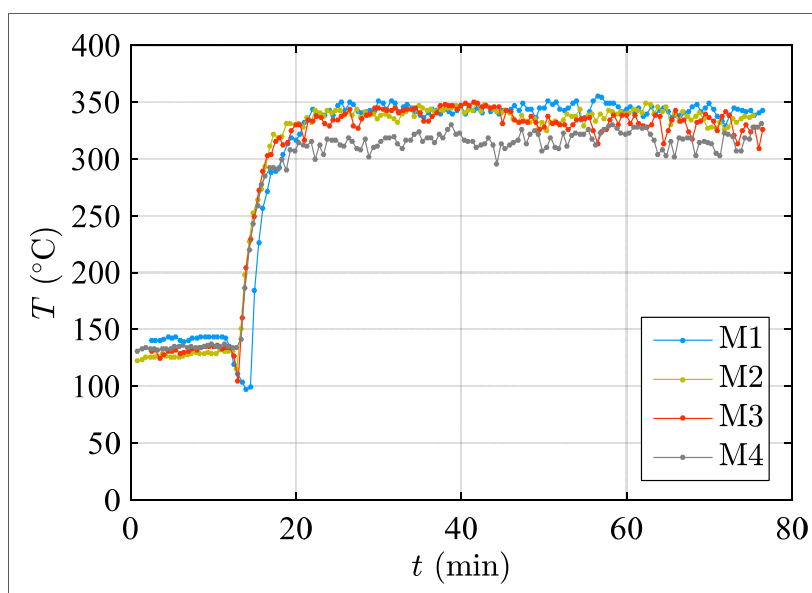


Figure 3.4 Mesures de répétabilité et évolution temporelle de T .

La Figure 3.5 illustre l'évolution temporelle des espèces chimiques enregistrées par le FTIR : en pourcentage le dioxyde de carbone CO_2 et en PPM : le monoxyde de carbone CO , les hydrocarbures imbrûlés de non méthane rapportés en équivalent propane C_3H_8 , le formaldéhyde HCHO , le dioxyde d'azote NO_2 et le monoxyde d'azote NO et ce pour la flamme pilote et pour la flamme centrale de diesel.

Pour les cinq premières espèces chimiques, les émissions de la flamme pilote sont négligeables par rapport à celles de la flamme centrale alors que le NO est majoritairement émis par la combustion du méthane.

Lors de la combustion du diesel, les émissions polluantes en CO , en C_3H_8 , en HCHO et en NO_2 passent par quatre phases qui sont : une augmentation rapide, un pic, une diminution et une stabilisation autour d'une valeur moyenne. Les deux premières phases indiquent

l'inflammation de la flamme centrale du carburant liquide. L'augmentation de la température dans la chambre de combustion aide à diminuer les émissions polluantes et améliore la qualité de combustion. Par ailleurs, la stabilisation indique que le régime stationnaire dans la chambre de combustion est atteint.

L'évolution temporelle du CO_2 est constituée de deux phases seulement : une augmentation et une stabilisation autour d'une valeur moyenne de 2.6 %. Le maximum de pourcentage en CO_2 sera enregistré quand tout le carbone est transformé en CO_2 .

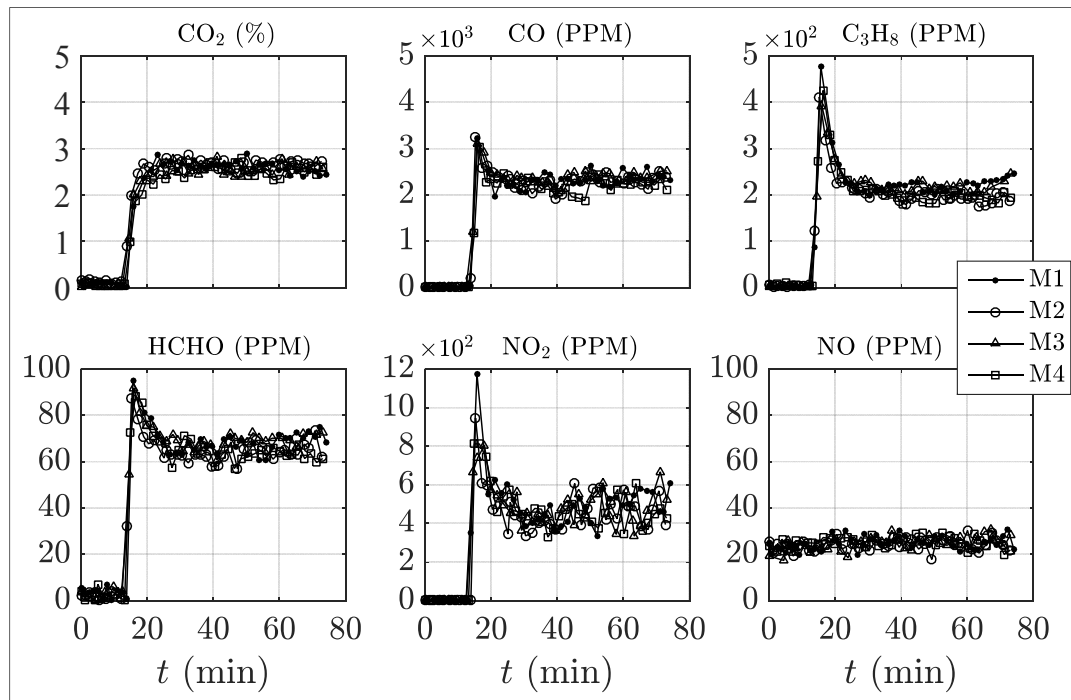


Figure 3.5 Mesures de répétabilité et évolution temporelle des émissions gazeuses.

Les valeurs moyennes μ ainsi que les coefficients de variation C_v des diverses espèces sont calculés à l'aide des expressions (3.4) et (3.5) et présentés dans le Tableau 3.2. N est le nombre total d'échantillons analysés durant le régime permanent de la combustion du diesel pour les quatre tests et est égal à 95 échantillons.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} x_i \quad (3.4)$$

$$C_v = 100 \frac{\sigma}{\mu} = \frac{100}{\mu} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (x_i - \mu)^2} \quad (3.5)$$

Tableau 3.2 Coefficient de variation des espèces analysées.

Espèces	C_v (%)	μ
CO₂	4.7	2.6 %
CO	6.6	2296 PPM
C₃H₈	7.6	207 PPM
HCHO	6.3	66 PPM
NO₂	33.5	461 PPM
NO	10.5	25 PPM

Les valeurs du coefficient de variation sont raisonnablement faibles pour tous les gaz polluants (≤ 10 %) excluant celui associé au NO₂. En effet, il a été remarqué que la concentration en NO₂ durant ces tests de répétabilité et d'autres tests présente une variation élevée. Cette tendance pourra être investiguée dans de futurs travaux. Globalement, les résultats des tests de combustion sont répétables montrant ainsi la validité de la méthodologie expérimentale.

3.7 Analyse de particules

La détermination de la composition et de la distribution des particules solides polluantes sont très influencées par le système et la procédure de mesure (Desantes et al., 2004). Afin de réaliser des tests valides et répétables, un ensemble de paramètres doit être étudié et une méthodologie de travail doit être explicitée. Ces paramètres sont liés aux conditions de fonctionnement du SMPS, au temps d'échantillonnage et à l'historique de combustion.

Puisque la concentration en particules des échantillons de gaz chauds dépasse la limite de détection supérieure admissible par l'UWCPC, un système de dilution est utilisé. Il s'agit

d'un mini-tunnel de dilution (Swagelok 304L-HDF8-2250) avec un volume de 2.25 litres. Ce système de dilution est alimenté par de l'air comprimé dépourvu de particules. Durant des travaux antérieurs avec le même système (Ledan, 2014; Plamondon, 2015), il s'est avéré que le taux de dilution n'est pas constant tout au long des essais. Par conséquent, des mesures de référence aux mêmes conditions de fonctionnement doivent être opérées à intervalle régulier. Par la suite, une interpolation linéaire sur le temps doit être effectuée entre deux mesures de référence consécutives. De cette façon, le taux de dilution à un instant donné est estimé. Par ailleurs, la concentration en particules de chaque mesure sera corrigée en tenant compte de l'instant où elle a été prise et des deux mesures de référence les plus proches dans le temps.

Pour rappel, la procédure expérimentale proposée est de brûler du diesel sous les conditions de l'état de référence avant de brûler tout mélange huile de pyrolyse-diesel. Cette combustion intermédiaire permettra donc de :

- Vérifier la répétabilité des mesures du FTIR.
- Corriger le taux de dilution des mesures du SMPS.
- Oxyder les émissions polluantes de la combustion de l'huile de pyrolyse antérieure (plus de détails dans la sous-section 3.7.2).

Il est à noter aussi que la ligne acheminant l'échantillon du système de dilution jusqu'au classificateur électrostatique doit être la plus courte possible afin de diminuer la déposition de particules dans la ligne et leur réentraînement par la suite. Le tube installé est en silicone et il est identique à celui utilisé pour les connexions du SMPS.

Le point d'extraction de l'échantillon dilué du système de dilution est important puisqu'il influence le degré de mélange entre l'échantillon des gaz d'échappement et l'air de dilution, ce qui déterminera la dynamique des particules et donc la distribution des tailles des particules trouvées (Suresh et Johnson, 2001). Le système de dilution est donc un cylindre à double extrémités. Afin d'assurer un mélange uniforme, les mesures sont faites au centre

d'une extrémité. L'autre extrémité abrite les entrées de l'échantillon des gaz d'échappement et de l'air de dilution.

Par ailleurs, il est nécessaire de bien définir et comprendre les paramètres influant les résultats de l'analyse des particules émises par la combustion. Certains paramètres (*e.g.* le débit d'échantillonnage) ont été étudiés de manière adéquate et satisfaisante dans la littérature. D'autres sont spécifiques au banc expérimental en question (*e.g.* le temps de balayage) et une étude doit donc être reconduite.

3.7.1 Influence des paramètres de fonctionnement du SMPS

Avant de commencer une nouvelle série de mesures des particules, il faut définir les paramètres de fonctionnement via le logiciel du SMPS. D'une part, les caractéristiques du SMPS utilisé sont spécifiées. Il s'agit des paramètres relatifs aux différentes composantes du système comme illustré dans le Tableau 3.3. D'autre part, les deux paramètres à définir sont le débit d'échantillonnage et le temps de balayage. Il est important de bien choisir ces deux paramètres puisqu'ils ont une influence directe sur la plage de voltage du DMA et par ailleurs sur la gamme de diamètres détectés lors des mesures.

Tableau 3.3 Caractéristiques du SMPS utilisé.

Paramètre caractéristique	Valeur
Type de l'impacteur	0.0457 cm
Modèle du classificateur	3080
Modèle du DMA	3081 (Long DMA)
Polarité du DMA	Négative
Modèle du CPC	3786

3.7.1.1 Débit d'échantillonnage

Il est à noter que selon les recommandations du manufacturier, le débit passant à travers le DMA « *sheath flow* » doit être égal à dix fois le débit de l'échantillon à analyser par le SMPS

« *sample flow* » (TSI, June 2010). Quand le débit d'échantillonnage passant à travers le SMPS augmente, la marge de diamètres détectés glisse vers les plus petits diamètres. Ceci influence la distribution observée. En effet, si la détection des particules de diamètre inférieur ou égal à 40 nm augmente, la concentration totale de particules augmente considérablement aussi. Selon Desantes et al. (2004), cette augmentation de concentration peut aller jusqu'à 70 % en changeant le débit d'échantillonnage du SMPS de 0.4 à 1 LPM. Ceci est dû non seulement au changement de la marge de diamètres détectés mais aussi à l'amélioration de l'efficacité de comptage du CPC. Cette dernière augmente quand le nombre de particules dans le gaz augmente. Ceci étant dit, le débit d'échantillonnage choisi doit être le plus élevé possible. Dans le cas présent, il sera de 0.6 LPM et donc le débit passant à travers le DMA sera de 6 LPM.

3.7.1.2 Temps de balayage

Le temps de balayage est composé du temps de balayage ascendant « *scan up* » et du temps de balayage descendant « *scan down* ». Le temps de balayage ascendant est le temps d'échantillonnage du DMA, durant lequel le voltage de la sonde centrale du classificateur électrostatique augmente exponentiellement de 0 jusqu'à sa valeur maximale; à vrai dire le voltage augmente en norme puisque la polarité du DMA est négative. Ainsi, les fractions de particules monodispersées sont formées et sont envoyées vers le CPC pour être comptées (Desantes et al., 2004). Si le temps de balayage ascendant augmente, alors la gamme de diamètres détectés s'élargie. Par conséquent, ce temps doit être suffisamment long pour permettre un comptage adéquat des particules.

Afin d'évaluer son influence sur les mesures de particules, le temps de balayage ascendant a été varié de 75 à 195 secondes avec un pas de 30 secondes. Quelques statistiques calculées par le logiciel AIM sont présentées dans le Tableau 3.4. L'incertitude du compteur de particules est de l'ordre de 12 % selon le manufacturier (TSI, Avril 2005).

La concentration totale des échantillons de gaz de combustion dilués est autour de 14×10^6 particule/cm³. En comparant les divers temps de balayage étudiés, une variation considérable des diamètres de masse moyenne et des masses totales est aperçue à partir de 135 secondes.

Tableau 3.4 Effet de la variation du temps de balayage ascendant.

Temps de balayage ascendant (s)	75	105	135	165	195
Diamètre moyen (nm)	84.9	78.2	90.9	91.9	89.1
Concentration totale (#/cm³)	142×10^5	140×10^5	143×10^5	141×10^5	140×10^5
Diamètre de masse moyenne (nm)	155.5	154.4	247.7	276.1	273.4
Masse totale (g/cm³)	115.7	91.4	164	161.8	159.9

En effet, comme représenté dans la Figure 3.6, la concentration des particules dont le diamètre est entre 300 et 380 nm de la mesure à 105 secondes est plus faible que celle de la mesure à 135 secondes. Le SMPS commence à détecter ces particules mais le temps n'est pas suffisant pour les compter de manière rigoureuse. À partir de la mesure avec le temps de balayage ascendant de 135 secondes, ces particules de grande taille influencent considérablement la distribution et la masse totale des particules mesurées dans l'échantillon. Ainsi pour le reste des mesures, un temps de balayage ascendant de 135 secondes est choisi.

Le temps de balayage descendant est la période durant laquelle le voltage de la sonde centrale du classificateur électrostatique diminue exponentiellement de sa valeur maximale jusqu'à 0. En effet, à la suite d'une mesure, les particules résiduelles sont évacuées du cylindre du DMA et sont envoyées au CPC du plus grand au plus petit diamètre. Si le temps fixé le permet, une bonne correction de la distribution peut avoir lieu (Desantes et al., 2004). Ainsi la variation du temps de balayage descendant n'aura pas d'influence sur la fourchette de tailles détectée par le SMPS.

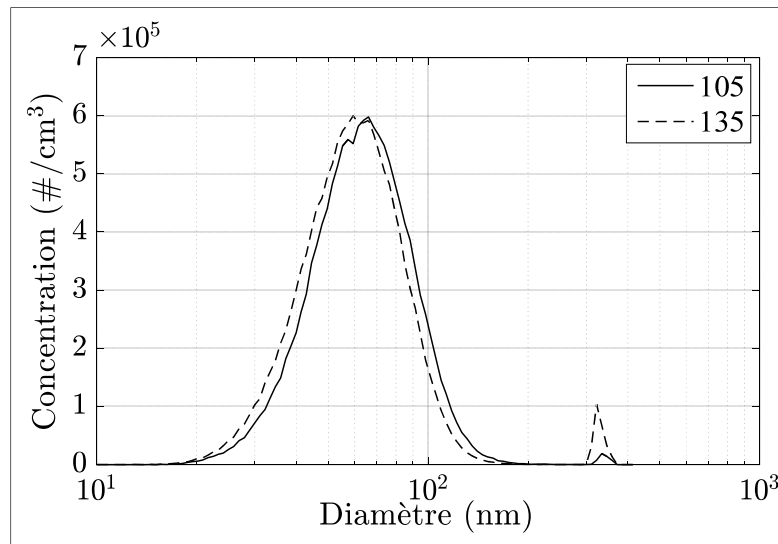


Figure 3.6 Distribution des particules selon la durée du balayage ascendant.

Pour le présent cas, la variation du temps de balayage descendant entre 15, 30 et 60 secondes n'avait pas de grande influence sur la concentration totale. Par ailleurs, une valeur de 15 secondes est fixée.

3.7.2 Influence des émissions des mesures de combustion précédentes

Une étude sur l'influence de l'historique du système de combustion sur les résultats de mesure des particules émises a été faite par Desantes et al. (2004). Une comparaison entre une combustion précédée par un étage favorisant la production de suies et une combustion précédée par un étage produisant très peu de suies a été faite. Il a été conclu que la mesure des tailles des particules est affectée par l'historique de combustion. Un pré-conditionnement caractérisé par une température élevée à la sortie de la cheminée et des émissions polluantes de concentrations réduites facilite l'oxydation des dépôts causés par toute combustion antérieure. Pour cela un état de référence sera repris entre deux combustions de mélanges huile de pyrolyse-diesel consécutives. Il s'agit de la combustion de diesel pendant 30 minutes dans les conditions produisant peu d'émissions polluantes.

3.8 Sommaire

Tout au long de ce chapitre, l'étalonnage du montage expérimental a été accompli. Les mesures de débit de l'air de combustion et du diesel ainsi que les méthodes de calcul du SMD et de la correction du taux d'oxygène dans les gaz d'échappement ont été exposés. La répétabilité de l'analyse des émissions gazeuses, critère fondamental pour valider toute mesure expérimentale, a été étudiée. Finalement, l'étude paramétrique de l'analyseur de particules a été effectuée. Le débit d'échantillonnage est fixé à 0.6 LPM et le temps total de balayage est fixé à 150 secondes (135 *up* et 15 *down*). Un état permettant l'oxydation des dépôts de suies est repris entre avant d'entamer le nouveau test de combustion. Ainsi le troisième sous-objectif de ce mémoire est atteint. La caractérisation du montage expérimental avec le diesel et la détermination des conditions de cet état de référence seront réalisées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

COMBUSTION DU DIESEL

4.1 Introduction

La dernière étape avant la combustion de l'huile de pyrolyse consiste à caractériser le montage expérimental en brûlant le diesel. Afin de le faire, une étude paramétrique incluant l'influence du débit d'air d'atomisation, de la position de prise des échantillons, du nombre de Swirl ainsi que du débit de diesel a été réalisée. Cette étude a permis de définir les conditions optimisées de la combustion du diesel. Ces conditions seront utilisées par la suite comme référence. Finalement, une analyse de la distribution de taille des particules sous ces conditions de fonctionnement optimisées a été effectuée. Ainsi ce dernier chapitre permet d'atteindre le dernier sous-objectif de ce mémoire qui est d'étudier l'influence des principaux paramètres sur la combustion du diesel et d'évaluer les diverses émissions polluantes.

4.2 Paramètres variables - Paramètres fixés

Dans le Tableau 4.1 sont indiqués les paramètres que le montage expérimental permet de faire varier. La valeur du débit de l'air de combustion a été fixée à 410 LPM. Le diesel n'a pas besoin d'être chauffé. Il est donc à la température ambiante. L'air de combustion est chauffé jusqu'à une température comprise entre 130 et 140 °C. Concernant la flamme pilote, le débit de méthane a été fixé à 0.4 LPM après avoir simulé la condition pouvant la souffler, *i.e.* nombre de Swirl maximal. Ainsi les paramètres en italique sont ceux étudiés tout au long de ce chapitre.

Tableau 4.1 Paramètres de la combustion.

Paramètres de la combustion	Valeur
Débit du combustible	0.26 – 0.52 LPH
Débit de l'air d'atomisation	4 – 14.5 LPM
Débit de l'air de combustion	410 LPM
Température du combustible	Ambiante
Température de l'air de combustion	130 – 140 °C
Débit du méthane de la flamme pilote	0.4 LPM
Nombre de Swirl	0 – 4.12
Position de prise des échantillons	20 – 35 cm

4.3 Effet de la variation du débit d'air d'atomisation

Le but de cette partie est d'étudier l'effet de la variation du débit d'air d'atomisation puisqu'il influence l'atomisation du jet de carburant liquide caractérisée par le SMD. Le débit d'air d'atomisation a été varié de 4 à 14.5 LPM et le débit du diesel a été déterminé en moyennant, sur cinq minutes, la différence de poids du réservoir de diesel entre deux secondes consécutives. Ceci a été effectué pour deux hauteurs absorption-injection différentes : H_1 égale à 80 cm et H_2 égale à 30 cm. Afin de calculer le SMD du jet, l'équation (3.1) avec les paramètres du Tableau 4.2 ont été employés.

Tableau 4.2 Paramètres employés lors du calcul du SMD.

Paramètres	Unité	Valeur
Masse volumique du diesel ρ_L	kg/m ³	828 ¹
Masse volumique de l'air ρ_A	kg/m ³	1.2
Tension de surface σ	N/m	0.021 ¹
Viscosité dynamique du diesel μ_L	10 ⁻³ Pa.s	1.6 ¹
Vitesse relative U_R	m/s	H_1 : 42.5 – 102.8 H_2 : 28.4 – 102.8
Débit massique du diesel $\dot{m}_L$	10 ⁻⁶ kg/s	H_1 : 24.2 – 102.4 H_2 : 32.7 – 177.1
Débit massique de l'air d'atomisation $\dot{m}_A$	10 ⁻⁴ kg/s	H_1 : 1.2 – 2.9 H_2 : 0.8 – 2.9
Diamètre de sortie du jet d_0	10 ⁻³ m	1.73

¹ Les paramètres relatifs au liquide sont tirés de Tzanetakis et al. (2011).

Comme le diesel est entraîné par la vitesse de l'air d'atomisation, plus le débit de ce dernier augmente, une quantité plus importante de diesel est injectée. En faisant varier le débit d'air d'atomisation entre 4 et 14.5 LPM, un SMD compris entre 20 et 60 μm est prédit.

Lorsque la hauteur absorption-injection est réduite, le même débit d'air d'atomisation entraîne une quantité plus grande de diesel. Par ailleurs, l'injection de combustible est possible pour de plus faibles débits d'air d'atomisation lorsque la hauteur absorption-injection est réduite (4 LPM pour 30 cm versus 6 LPM pour 80 cm).

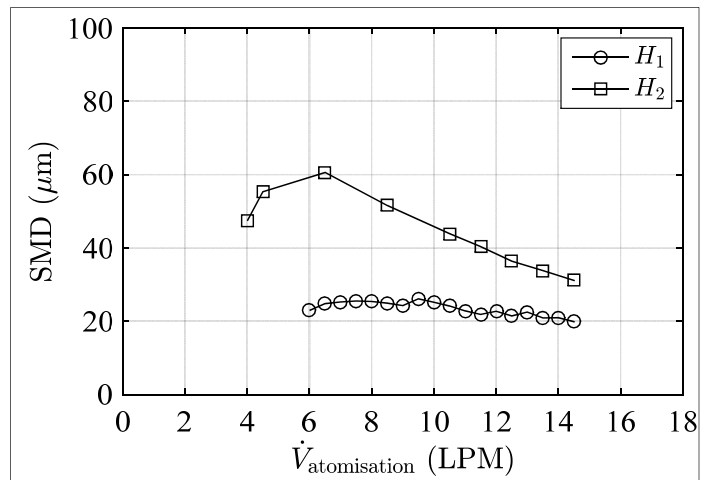


Figure 4.1 Variation du SMD.

Selon Martin et Boateng (2014), la plupart des brûleurs à jet liquide sont conçus pour produire une taille moyenne de gouttelettes comprise entre 30 et 50 μm . L'air d'atomisation dans la marge de débits permise par le contrôleur de débit disponible et les hauteurs absorption-injection utilisées (qui sont supérieures ou égales à 30 cm) permettent de garder la qualité du jet dans la fourchette de diamètres ciblée. Le débit d'air d'atomisation qui sera utilisé par la suite sera égal à 10.6 LPM.

4.4 Position de prise des échantillons

Afin de déterminer si l'échantillon des produits de combustion est représentatif de l'ensemble, une étude a été faite pour choisir la position de la prise des échantillons. Cette étude a été réalisée sur la ligne centrale de la chambre de combustion cylindrique dans le but de chercher l'homogénéité de mélange des gaz chauds. Les hauteurs étudiées sont 20, 25, 30 et 35 cm à partir de l'injecteur. Le débit volumique de diesel est égal à 0.3 LPH et le débit de l'air d'atomisation est égal à 10.6 LPM. Le débit de l'air de combustion est égal à 410 LPM et l'écoulement est complètement axial avec un nombre de Swirl nul. Les émissions polluantes en carbone et en azote sont représentées respectivement à la Figure 4.2 et à la Figure 4.3.

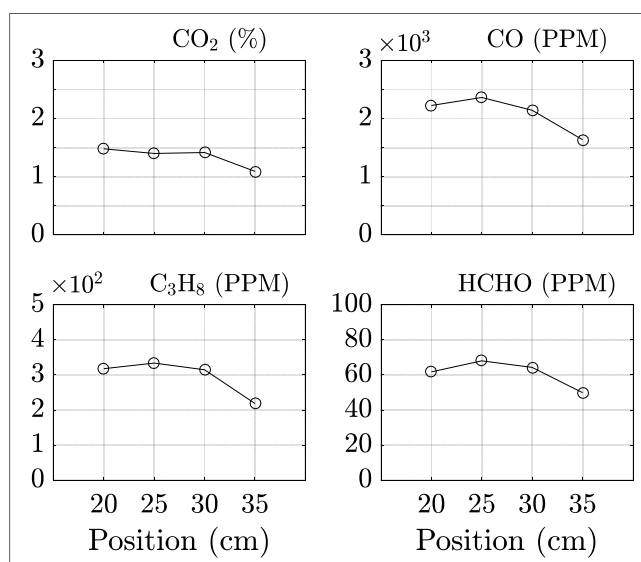


Figure 4.2 Effet de la position d'échantillonnage sur les émissions en C.

Les mesures des différentes espèces chimiques sauf le NO montrent une très faible variation aux trois premières positions (20, 25 et 30 cm) tandis qu'à la dernière position, la variation est plus discernée. En effet, la chambre de combustion est ouverte à son extrémité et par conséquent à 35 cm, l'air extérieur peut avoir une influence sur les mesures des émissions gazeuses. La dilution des espèces chimiques est une hypothèse possible car une augmentation

plus ou moins visible est observée pour la concentration du O_2 (Figure 4.4). Concernant les émissions en NO, la variation est de 2 PPM approximativement et peut être donc considérée comme négligeable.

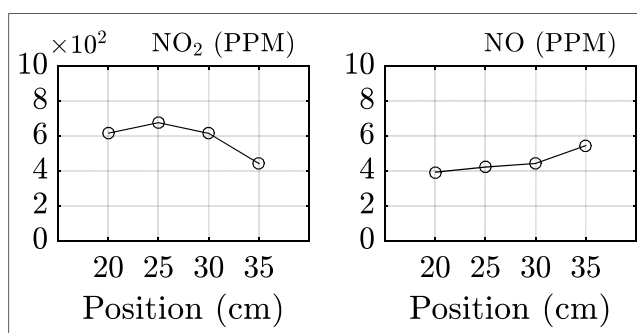


Figure 4.3 Effet de la position d'échantillonnage sur les émissions en N.

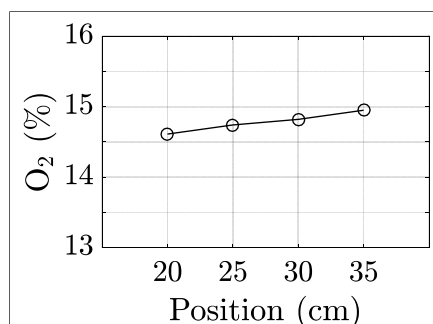


Figure 4.4 Effet de la position d'échantillonnage sur l'oxygène.

Globalement, l'effet de la position d'échantillonnage est négligeable. Une position suffisamment loin de la flamme mais pas très proche du bord de la cheminée peut être choisie. Puisque la hauteur de la flamme augmentera avec l'augmentation du débit de diesel, la position à 30 cm a été choisie pour la réalisation de la suite des mesures.

4.5 Effet de variation du Swirl

L'étude de l'effet de variation du Swirl sur les émissions gazeuses polluantes de la combustion du diesel a été effectuée. Le débit volumique de diesel est égal à 0.28 LPH, le

débit de l'air d'atomisation est égal à 10.6 LPM et le débit de l'air de combustion est égal à 410 LPM. Les résultats de cette étude sont présentés à la Figure 4.5 et la Figure 4.6.

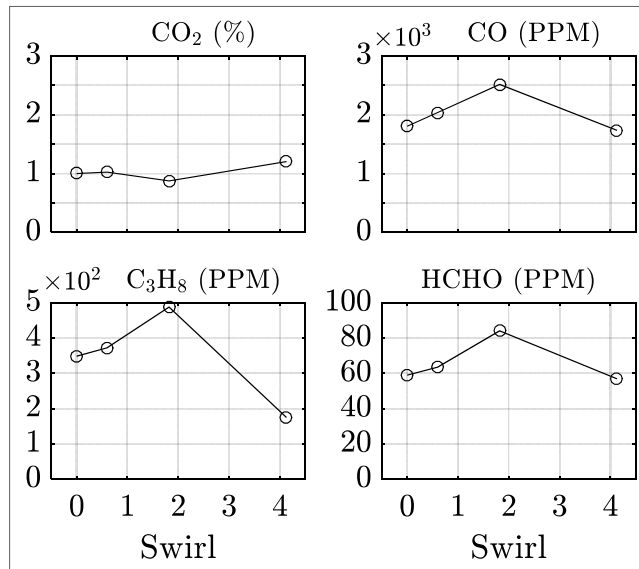


Figure 4.5 Effet du Swirl sur les émissions en C.

La Figure 4.5 illustre la variation des émissions polluantes gazeuses en carbone de la combustion du diesel en fonction du nombre de Swirl. Le CO, le C₃H₈ et le HCHO montrent globalement la même tendance. Lorsque le nombre de Swirl augmente de 1.82 à 4.12 (écoulement complètement tangentiel), une diminution de la concentration du CO de 2520 à 1740 PPM, une diminution de la concentration du C₃H₈ de 490 à 180 PPM et une diminution de la concentration du HCHO de 85 à 60 PPM sont notées. Ces diminutions sont accompagnées par une augmentation de la concentration du CO₂ de 0.9 à 1.2 %. En effet, l'ensemble de ces variations stipule une meilleure qualité de la combustion lors de l'augmentation du Swirl au-dessus de 1.82 et par ailleurs une amélioration du mélange diesel/air de combustion (Orfanoudakis et al., 2005). Les gaz chauds sont ramenés à la base d'injection ce qui augmente leur temps de résidence dans la zone de combustion, favorise l'oxydation en CO₂, augmente la température de la flamme et assiste l'inflammation du jet de combustible (Tzanetakis et al., 2010).

Concernant la variation de 0 (écoulement complètement radial) à 1.82, la qualité de combustion se dégrade pour atteindre le maximum d'émissions en CO, en C_3H_8 et en HCHO et le minimum de CO_2 pour S égal à 1.82. La littérature souligne que la recirculation des gaz brûlés décline quand le nombre de Swirl est inférieur ou égal à 0.6 (Beér et Chigier, 1972; Gupta, Lilley et Syred, 1984). Il est important de rappeler alors que le nombre de Swirl S calculé théoriquement caractérise l'écoulement à la sortie des blocs du générateur de Swirl. En tenant compte de la perte de charge, de la dissipation de l'énergie et du frottement sur les parois, S réel au niveau de la zone de combustion est inférieur à S calculé.

Il est à noter qu'en somme la concentration en formaldéhyde (HCHO) est restée inférieure à 100 PPM. En effet, le HCHO est essentiellement émis par les combustibles oxygénés et sa teneur dans les gaz d'échappement augmente avec l'augmentation de la teneur en oxygène dans ces combustibles (Anderson et al., 1996). Il est par conséquent important de le mesurer dans le cas de la combustion des mélanges huile de pyrolyse-diesel.

La même tendance générale des émissions en carbone a été observé par Tzanetakis et al. (2011) quand une variation du nombre de Swirl entre 0 et 5.41 a été étudié.

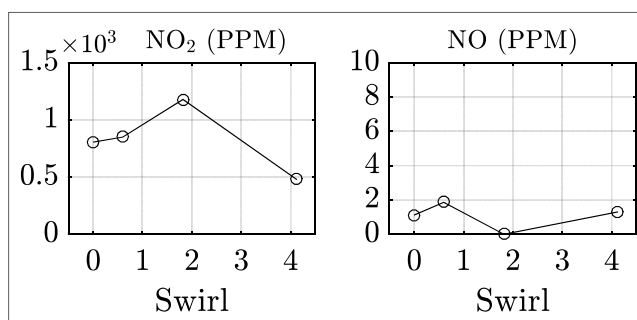


Figure 4.6 Effet du Swirl sur les émissions en N.

La Figure 4.6 illustre la variation des NO_x en fonction du nombre de Swirl. Elle montre que les NO sont négligeables (inférieur ou égal à 2 PPM) et que les NO_x sont principalement des NO_2 . Ces derniers ont la même sensibilité pour la variation du nombre de Swirl que les

émissions en carbone avec une augmentation de 810 à 1180 PPM entre 0 et 1.82 et une diminution jusqu'à 480 PPM entre 1.82 et 4.12.

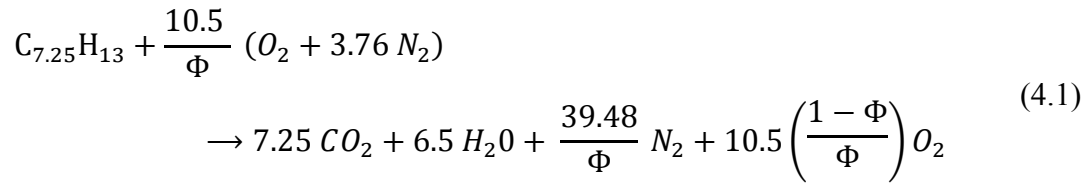
En somme, la qualité de la combustion est meilleure pour un nombre de Swirl égal à 4.12 avec 1.2 % en CO_2 , 1740 PPM de CO, 180 PPM de C_3H_8 , 60 PPM de HCHO et 480 PPM de NO_x . Ainsi pour le test qui suit, l'écoulement sera principalement tangentiel avec un nombre de Swirl maximal.

4.6 Effet de la variation du débit du diesel

Une étude sur l'effet de la variation du débit du diesel sur la combustion et en particulier sur les émissions gazeuses polluantes a été faite. Le débit d'air de combustion est égal à 410 LPM et l'écoulement est tangentiel avec un Swirl maximal. Le débit d'air d'atomisation est fixé à 10.6 LPM et la variation du débit de diesel est réalisée via la variation de la hauteur du réservoir de diesel. Ceci entraîne la variation de la dynamique du mélange air/combustible et de la richesse globale de la chambre de combustion Φ . La richesse globale Φ peut être calculée moyennant l'équation de la réaction de combustion complète explicitée dans l'expression (4.1) tels que les réactifs de combustion sont le diesel ($\text{C}_{7.25}\text{H}_{13}$) et l'air (en proportions volumiques 21 % O_2 et 79 % N_2) qui comporte les portions d'air d'atomisation et d'air de combustion. Le Tableau 4.3 illustre la relation entre la hauteur du réservoir, le débit du diesel et richesse globale. Les échantillons de gaz chauds sont extraits à 30 cm de l'injection et la synthèse des résultats est présentée dans la Figure 4.7 et la Figure 4.8.

Tableau 4.3 Variation de la richesse en fonction du débit du diesel.

H (cm)	$\dot{V}_d$ (LPH)	Φ
80	0.26	0.10
70	0.3	0.12
60	0.34	0.14
50	0.39	0.16
40	0.45	0.18
30	0.52	0.21



La Figure 4.7 illustre la variation des émissions polluantes gazeuses en carbone de la combustion du diesel en fonction du débit du diesel. Le CO, le C₃H₈ et le HCHO montrent globalement la même tendance. Pour les débits supérieurs à 0.34 LPM c'est-à-dire une richesse supérieure à 0.14, les concentrations en CO, en C₃H₈ et en HCHO diminuent considérablement (inférieurs à 100 PPM). En effet, les conditions favorisant la combustion complète sont réunies, *e.g.* quantité de diesel présente dans l'air de combustion, bon mélange air / combustible créé par la turbulence, d'où l'augmentation de la concentration de CO₂.

Au-dessous du débit 0.34 LPM c'est-à-dire une richesse inférieure à 0.14, une augmentation prononcée des concentrations en CO, en C₃H₈ et en HCHO est perçue. Cette augmentation est jumelée à une diminution manifeste de la concentration en CO₂.

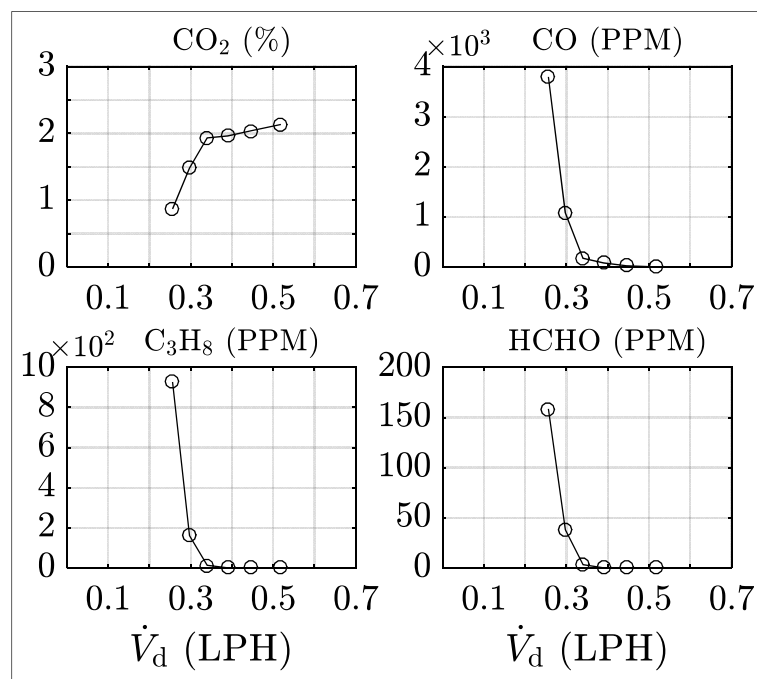


Figure 4.7 Effet du débit du diesel sur les émissions en C.

La Figure 4.8 illustre la variation des émissions polluantes gazeuses en azote en fonction du débit du diesel. L'augmentation du débit du diesel a le même effet sur le NO_2 que sur les imbrûlés en carbone, alors que la tendance des NO est opposée : entre 0.26 et 0.34 LPH de diesel, le NO_2 présente une diminution de 2500 PPM jusqu'à 0 alors que le NO est presque nul. Pour les débits entre 0.34 et 0.52 LPH, une stabilisation à 0 pour le NO_2 et une augmentation jusqu'à 25 PPM pour le NO sont observées. D'un côté, le NO_2 est produit dans le front de flamme et est détruit à haute température. De l'autre côté, la formation du NO est principalement thermique.

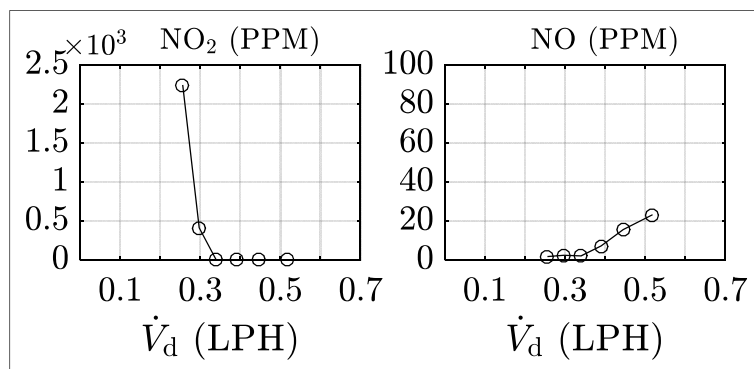


Figure 4.8 Effet du débit du diesel sur les émissions en N.

La température des gaz est donc rapportée à la Figure 4.9 qui présente l'effet du débit du diesel sur la température à la sortie de la chambre de combustion. On remarque une augmentation de la température de 280 à 570 °C avec l'augmentation du débit de diesel suggérant une augmentation de la température de flamme et donc des NO .

En conclusion, en termes d'émissions polluantes gazeuses, un débit de diesel égal à 0.52 LPH permet de produire la meilleure qualité de combustion.

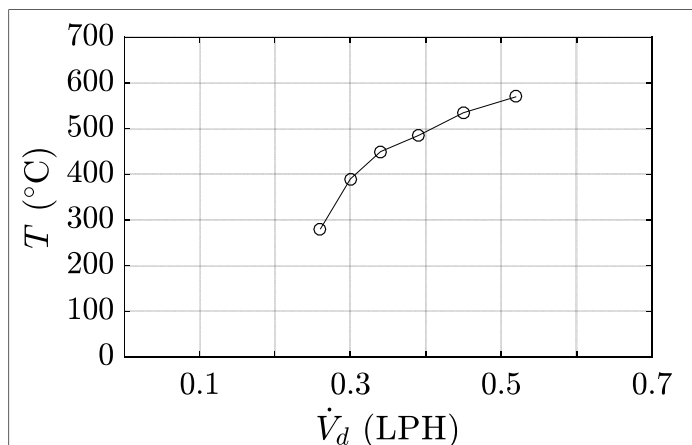


Figure 4.9 Effet du débit du diesel sur la température.

4.7 Vérification de l'effet du Swirl et bilan

À titre de vérification, la variation de Swirl a été reprise pour un débit de 0.5 LPH de diesel. Le débit d'air d'atomisation est égal à 10.6 LPM. Le débit d'air de combustion est égal à 410 LPM. Les échantillons de gaz chauds sont extraits à 30 cm de l'injection et les résultats sont présentés à la Figure 4.10 et à la Figure 4.11.

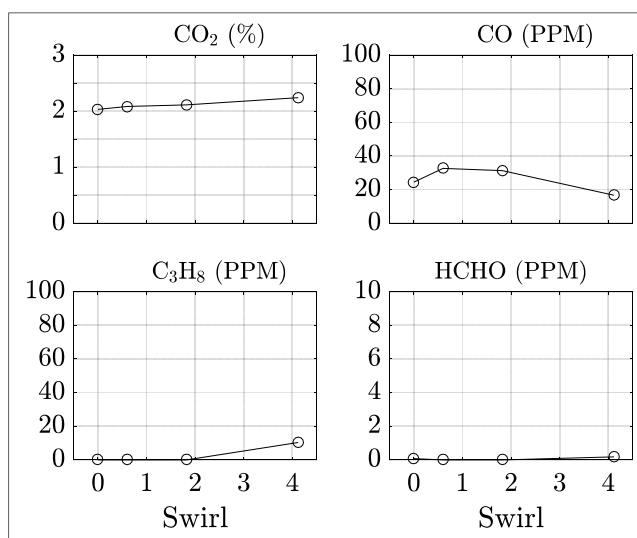


Figure 4.10 Vérification de l'effet du Swirl sur les émissions en C.

La variation des concentrations des émissions polluantes enregistrée suite à la variation du Swirl est très légère. Au maximum cette variation est de l'ordre de 0.2 % pour le CO₂ et de 20 PPM pour le reste des polluants gazeux. La qualité de combustion est globalement bonne, avec des taux d'imbrûlés inférieurs à 40 PPM dans toute la plage de variation de Swirl. Il s'avère que la variation du débit de diesel a plus d'influence sur la qualité de combustion du diesel que la variation du Swirl.

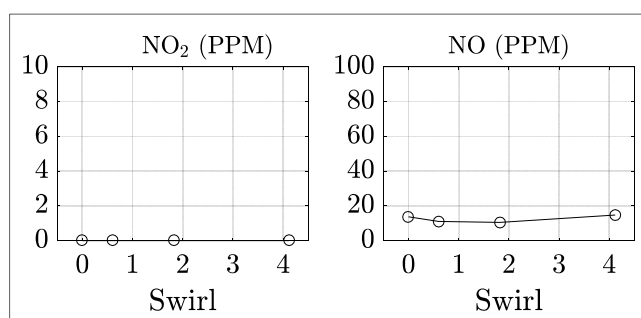


Figure 4.11 Vérification de l'effet du Swirl sur les émissions en N.

En conclusion, les paramètres de l'état de référence sont résumés dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Paramètres de l'état de référence.

Paramètres de la combustion	Valeur
Débit du combustible	0.52 LPM
Débit de l'air d'atomisation	10.6 LPM
Débit de l'air de combustion	410 LPM
Température du combustible	Ambiante
Température de l'air de combustion	130-140 °C
Débit du méthane de la flamme pilote	0.4 LPM
Nombre de Swirl	4.12
Position de prise des échantillons	30 cm

4.8 Analyse des particules

L'analyse des particules a été effectuée dans les conditions de l'état de référence avec un débit d'échantillonnage égal à 0.6 LPM et un temps de balayage total de 150 secondes. Un

taux de dilution de 4.7 a été calculé. La distribution de particules après correction de l'effet de dilution est représentée à la Figure 4.12. La concentration totale de l'échantillon est de l'ordre de 68×10^6 particules/cm³ et la distribution est bimodale. C'est-à-dire deux gammes de diamètres sont détectées avec une grande concentration des petits diamètres (inférieur à 200 nm) et une faible concentration des plus grands diamètres (entre 300 et 380 nm).

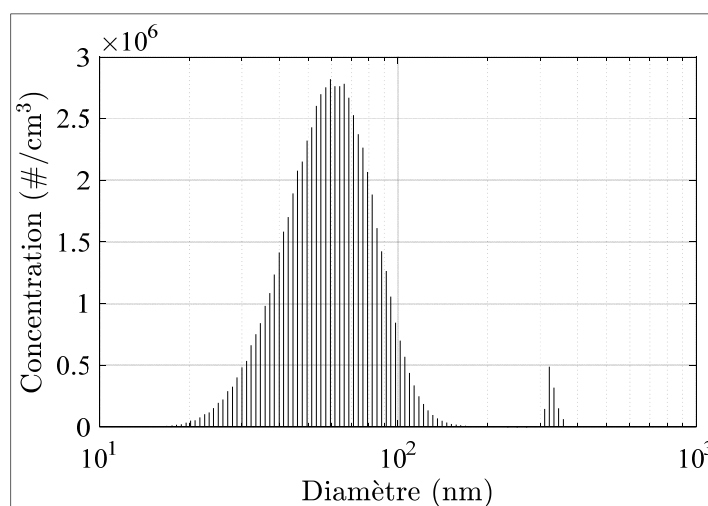


Figure 4.12 Distribution des particules.

4.9 Sommaire

Ainsi et en évaluant les diverses émissions polluantes gazeuses, les principaux paramètres de la combustion du diesel ont été étudiés. Les conditions de l'état de référence promettant la meilleure qualité de combustion ont été déterminées. Le débit d'air de combustion est égal à 410 LPM et le débit de diesel est égal à 0.52 LPM. Le débit de Swirl maximum aide à stabiliser la flamme et à améliorer le mélange air/diesel. Ainsi les émissions polluantes diminuent et la combustion maximise la production de CO₂. Par ailleurs et sous ces conditions de fonctionnement, une distribution des particules dans les gaz d'échappement a été effectuée.

CONCLUSION

Le chauffage des serres représente l'activité la plus énergivore au sein des entreprises serricoles québécoises. Dans une perspective de valorisation de la biomasse agricole de ces entreprises serricoles et de décarbonisation¹, l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) a étudié la pyrolyse rapide pour produire une bio-huile, et s'est proposé d'examiner la faisabilité de sa combustion dans les chaudières de chauffage des serres. Cette étude de la pyrolyse rapide a conclu que la bio-huile issue de la pyrolyse du bois présente le meilleur potentiel de combustion. Puisque les caractéristiques de l'huile de pyrolyse sont fortement liées aux paramètres de réaction utilisés et que la qualité de combustion dépend des conditions de fonctionnement, une étude paramétrique à part entière doit être menée afin d'analyser l'efficacité de la combustion de diverses huiles de pyrolyse. Pour aboutir à la réalisation de cette étude, un montage expérimental a été conçu et présenté dans le cadre de ce mémoire.

À la lumière d'une étude bibliographique, les diverses propriétés physico-chimiques de la bio-huile ont été dégagées. Les huiles de pyrolyse se caractérisent comparativement aux combustibles pétroliers par : 1) des teneurs plus élevées en eau, en oxygène et en solides, 2) une viscosité, une masse volumique et une acidité supérieures et 3) un pouvoir calorifique plus faible. Ces propriétés lui confèrent un comportement différent lors de la combustion. L'étude bibliographique a donc inclus les diverses techniques employées pour améliorer la combustion de la bio-huile. Par conséquent, la conception d'un montage expérimental bien adapté à la combustion de cette bio-huile est donc proposé. L'injection de la bio-huile par pulvérisation d'air avec mélange interne a été jugée la plus appropriée. Afin d'assister l'inflammation, une flamme pilote a été utilisée. Un générateur de Swirl ainsi qu'une chambre de combustion ont été prévus pour améliorer le mélange air /combustible, préchauffer les gaz frais et augmenter le temps de résidence des gaz chauds. Dans l'optique

¹ Par définition, la décarbonisation c'est toute technologie ou mesure mise en place pour limiter l'utilisation des hydrocarbures fossiles.

d'augmenter la puissance thermique et de diminuer les polluants émis par la combustion d'une part et de réduire les modifications pour adapter les chaudières existantes d'autre part, il a été convenu de mélanger l'huile de pyrolyse avec du diesel. Une procédure d'émulsification a été développée avec une composition volumique 30 % bio-huile et 70 % diesel. La solution obtenue est bien homogène et stable. Un plan d'expérience a été aussi proposé pour la combustion des mélanges bio-huile/diesel.

Le montage expérimental permet de faire varier les débits d'air d'atomisation, de combustible et d'air de combustion ainsi que les températures de ces deux derniers. Les variations de la richesse de la flamme pilote et du nombre de Swirl sont aussi possibles. La répétabilité des résultats de mesures de température et des émissions polluantes gazeuses a été vérifiée. Par ailleurs, une analyse paramétrique sur la combustion du diesel a été effectuée. Cette analyse a permis de déterminer les conditions de l'état de référence. Cet état, caractérisé par le minimum d'émissions polluantes gazeuses, est obtenu pour une richesse globale de 0.2 et un écoulement complètement tangentiel afin de favoriser la recirculation des gaz chauds. Ainsi, une combustion complète est générée avec une concentration maximale de CO_2 et une teneur minimale d'imbrûlés (inférieur à 40 PPM) et de NO_x (inférieur à 20 PPM). Sous les conditions de l'état de référence, une distribution des particules dans les gaz d'échappement a été effectuée à l'aide du SMPS. Cette distribution a été trouvée bimodale. En se basant sur ces résultats, il a été décidé que la combustion des différents mélanges huile de pyrolyse-diesel peut alors être entamée.

À la lumière des résultats obtenus le long cette étude, plusieurs horizons s'ouvrent dans cet axe de recherche s'avérant prometteur. Ainsi, différents niveaux de recommandations sont proposés.

Le premier niveau concerne le montage expérimental. Un isolant peut être installé sur la partie qui se chauffe, i.e. les tuyaux acheminant l'air de combustion chaud, le caisson d'air et bien évidemment la chambre de combustion. En effet, ceci diminuera considérablement les pertes de chaleur vers l'extérieur. Par conséquent, la température augmentera d'avantage

dans la zone post-flamme ce qui favorisera l'oxydation des imbrûlés. Une chambre de combustion ou une fenêtre en quartz permettrait aussi de visualiser la flamme durant les tests de combustion et de détecter d'éventuelles singularités.

Le deuxième niveau concerne la méthodologie d'analyse. Une étude plus détaillée sur le fonctionnement et le paramétrage de la méthode d'analyse de particules en utilisant le spectromètre SMPS est à effectuer. Cette étude facilitera le choix des paramètres de fonctionnement du SMPS et du système de dilution ainsi que le pré-conditionnement des échantillons. Le travail de Desantes et al. (2004) peut être consulté au besoin. Il est aussi important de mesurer le pouvoir calorifique des différents mélanges pour pouvoir d'une part comparer les puissances thermiques et d'autre part normaliser les concentrations des émissions polluantes produites par leur combustion.

La mesure de la température de flamme joue un rôle important dans les diagnostics de combustion. Par conséquent, il serait intéressant de mesurer la température de la flamme des mélanges d'huile de pyrolyse avec des moyens appropriés (*e.g.* intrusifs à base de sondes et/ou optiques intégrés). La température mesurée peut être comparée avec celle de la flamme adiabatique du mélange afin de qualifier l'efficacité énergétique du système de combustion.

La caractérisation de l'écoulement tourbillonnant pré/post flamme (autrement dit, post Swirl) serait d'un apport important. Ceci permettrait en effet de bien cerner le rôle de la recirculation dans l'amélioration de la combustion en augmentant son efficacité énergétique et en diminuant ses émissions polluantes. Des champs de vecteurs de vitesse de l'écoulement peuvent être par exemple mesurés à l'aide de la vélocimétrie par images de particules (PIV). La PIV est une technique de mesure de champs de vitesse devenue très répandue en mécanique des fluides dû à son principe et sa mise en place plus ou moins faciles.

BIBLIOGRAPHIE

- ABB. 2016. « FT-IR Reference Manual »
<<https://library.e.abb.com/public/75c6fbd8c2e824085256cc4004bb1ad/IMZ8557%20REV%201-2%20FT-IR%20Reference%20manual.pdf>>
- Anderson, Larry G., John A. Lanning, Regina Barrell, Joyce Miyagishima, Richard H. Jones et Pamela Wolfe. 1996. « Sources and sinks of formaldehyde and acetaldehyde : An analysis of Denver's ambient concentration data ». *Atmospheric Environment*, vol. 30, no° 12, p. 2113-2123.
- ASTM International. 2012. *D7544*.
- Baukal Jr, Charles E. 2003. *Industrial burners handbook*. CRC press, Canada.
- Baxter, L, B Jenkins et F Winter. 1994. « Baseline NOx emissions during combustion of wood-derived pyrolysis oils ». In *Proceedings of Biomass Pyrolysis Oil Properties and Combustion Meeting*. 270 printed. p. 26-28.
- Beér, János Miklós, et Norman A. Chigier. 1972. *Combustion aerodynamics*. Applied Scientific Publishing, London, RU.
- Boucher, M. E., A. Chaala, H. Pakdel et C. Roy. 2000. « Bio-oils obtained by vacuum pyrolysis of softwood bark as a liquid fuel for gas turbines. Part II: Stability and ageing of bio-oil and its blends with methanol and a pyrolytic aqueous phase ». *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, no° 5, p. 351-361.
- Bridgwater, A. V. 2012. « Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading ». *Biomass and Bioenergy*, vol. 38, no° 0, p. 68-94.
- Bridgwater, A. V., et S. A. Bridge. 1991. « A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies ». In *Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization*, sous la dir. de Bridgwater, A. V., et G. Grassi. PEB. p. 11-92. Springer Netherlands.
- CAI. 2016. « 600 FTIR Fourier Transfer Infrared Analyser »
< http://gasanalyzers.com/uploads/product/data_sheet/2/600_FTIR_Data_Sheet.pdf >
- Chiaramonti, D., M. Bonini, E. Fratini, G. Tondi, K. Gartner, A. V. Bridgwater, H. P. Grimm, I. Soldaini, A. Webster et P. Baglioni. 2003. « Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines—Part 1 : emulsion production ». *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, n° 1, p. 85-99.
- Chiaramonti, D., G. Riccio, P. Baglioni, M. Bonini, S. Milani, I. Soldaini, R. Calabria et P. Massoli. 2005. « Sprays of biomass pyrolysis oil emulsions : modelling and

- experimental investigation. Preliminary results on modelling ». In *Proceeding of the 14th European biomass conference & exhibition*, Paris.
- Choi, Sang Kyu, Yeon Seok Choi, Seock Joon Kim et Yeon Woo Jeong. 2016. « Characteristics of flame stability and gaseous emission of biocrude-oil/ethanol blends in a pilot-scale spray burner ». *Renewable Energy*, vol. 91, p. 516-523.
- Chong, Cheng Tung , et Simone Hochgreb. 2015. « Measurements of non-reacting and reacting flow fields of a liquid swirl flame burner ». *Chinese journal of mechanical engineering* vol. 28, n° 2, p. 394-401.
- Cormeau, Jordan, et Ghislain Gosse. 2008. *Les biocarburants de deuxième génération : semer aujourd'hui les carburants de demain*. Demeter 2008, France, p. 225-302.
- Czernik, S., et A. V. Bridgwater. 2004. « Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil ». *Energy & Fuels*, vol. 18, n° 2, p. 590-598.
- Daham, Basil. 2016. « Principles of fourier transfer infrared spectroscopy »
< http://www.daham.org/basil/leedswww/ftir/ftir_principle.htm >
- Delavan. 2016. « Delavan : Oil burner nozzles and accessories for residential applications »
< <http://www.delavaninc.com/pdf/catalog.pdf> >
- Desantes, JM, V Bermúdez, JV Pastor et E Fuentes. 2004. « Methodology for measuring exhaust aerosol size distributions from heavy duty diesel engines by means of a scanning mobility particle sizer ». *Measurement Science and Technology*, vol. 15, no° 10, p. 2083.
- Diebold, JP, S Czernik, JW Scahill, SD Phillips et CJ Feik. 1994. « Bio-oil Combustion Tests at ENEL ». In *Proceeding of biomass pyrolysis oil properties and combustion meeting*, Estes Park, Colorado, US, p. 321-328.
- Fahmi, R., Anthony V. Bridgwater, I. Donnison, Nicola Yates et J. M. Jones. 2008. « The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability ». *Fuel*, vol. 87, no° 7, p. 1230-1240.
- Fratini, Emiliano, Massimo Bonini, Anja Oasmaa, Yrjo Solantausta, José Teixeira et Piero Baglioni. 2006. « SANS Analysis of the Microstructural Evolution during the Aging of Pyrolysis Oils from Biomass ». *Langmuir*, vol. 22, no° 1, p. 306-312.
- Fudihara, T.J., L. Goldstein Jr. et M. Mori. 2003. « The three-dimensional numerical aerodynamics of a movable block burner ». *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 20, p. 391-401.

- Garcia-Pérez, M. , A. Chaala, D. Kretschmer, A. De Champlain, P. Hughes et C. Roy. 2006. « Spray characterization of a softwood bark vacuum pyrolysis oils ». In *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*. vol. 1-2. CPL Press, Victoria, Vancouver Island, BC, Canada.
- Gupta, Ashwani K., David Grantham Lilley et Nick Syred. 1984. « Swirl flows ». *Tunbridge Wells, Kent, England, Abacus Press, 1984, 488 p.*, vol. 1.
- Ikura, Michio, Maria Stanciulescu et Ed Hogan. 2003. « Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel ». *Biomass and Bioenergy*, vol. 24, n° 3, p. 221-232.
- Jahirul, Mohammad I., Mohammad G. Rasul, Ashfaq Ahmed Chowdhury et Nanjappa Ashwath. 2012. « Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review ». *Energies*, vol. 5, n° 12, p. 4952-5001.
- Ji-Lu, Zheng , et Kong Yong-Ping. 2010. « Spray combustion properties of fast pyrolysis bio-oil produced from rice husk ». *Energy Conversion and Management*, vol. 51, p. 182-188.
- Khodier, Ala, Paul Kilgallon, Nigel Legrave, Nigel Simms, John Oakey et Tony Bridgwater. 2009. « Pilot-scale combustion of fast-pyrolysis bio-oil: ash deposition and gaseous emissions ». *Environmental Progress and Sustainable Energy*, vol. 28, n° 3, p. 397-403.
- Kowalewski, Dylan. 2015. « Emissions and properties of bio-oil and natural gas co-combustion in a pilot stabilised swirl burner ». master degree. University of Toronto.
- Krumdieck, S. P., et J. W. Daily. 1998. « Evaluating the feasibility of biomass pyrolysis oil for spray combustion applications ». *Combustion Science and Technology*, vol. 134, n° 1-6, p. 351-365.
- Ledan, T. 2014. « Évaluation expérimentale de la combinaison injection multiple et biodiesel sur les performances et les émissions polluantes d'un moteur diesel ». Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal.
- Lefebvre, Arthur H. 1988. *Atomization and sprays*, vol. 1040, no° 2756. CRC press : Boca Raton, FL.
- Lefebvre, Arthur H. 1998. *Gas turbine combustion*. CRC press : Boca Raton, FL.
- Lehto, Jani, Anja Oasmaa, Yrjö Solantausta, Matti Kyto et David Chiaramonti. 2014. « Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass ». *Applied Energy*, vol. 116, p. 178-190.

- Lehto, Jani, Anja Oasmaa, Yrjö Solantausta, Matti Kytö et David Chiaramonti. 2013. « Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils ». *VTT Technology*, vol. 87, p. 79.
- Lin, Bo-Jhih, Wei-Hsin Chen, Wojciech M. Budzianowski, Cheng-Ting Hsieh et Pei-Hsun Lin. 2016. « Emulsification analysis of bio-oil and diesel under various combinations of emulsifiers ». *Applied Energy*, vol. 178, p. 746-757.
- Lu, Qiang, Wen-Zhi Li et Xi-Feng Zhu. 2009. « Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils ». *Energy Conversion and Management*, vol. 50, n° 5, p. 1376-1383.
- Martin, Jonathan A, Charles A Mullen et Akwasi A Boateng. 2014. « Maximizing the stability of pyrolysis oil/diesel fuel emulsions ». *Energy & Fuels*, vol. 28, n° 9, p. 5918-5929.
- Martin, Jonathan A., et Akwasi A. Boateng. 2014. « Combustion performance of pyrolysis oil/ethanol blends in a residential-scale oil-fired boiler ». *Fuel*, vol. 133, p. 34-44.
- Mohan, Dinesh, Charles U. Pittman et Philip H. Steele. 2006. « Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review ». *Energy & Fuels*, vol. 20, n° 3, p. 848-889.
- Moloodi, Sina, Tommy Tzanetakis, Brian Nguyen, Milad Zarghami-Tehran, Umer Khan et Murray J Thomson. 2012. « Fuel property effects on the combustion performance and emissions of hardwood-derived fast pyrolysis liquid-ethanol blends in a swirl burner ». *Energy & Fuels*, vol. 26, n° 9, p. 5452-5461.
- No, Soo-Young. 2014. « Application of bio-oils from lignocellulosic biomass to transportation, heat and power generation - A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, p. 1108-1125.
- Novelli, Paul C. 1999. « CO in the atmosphere : measurement techniques and related issues ». *Chemosphere - Global Change Science*, vol. 1, no° 1-3, p. 115-126.
- Oasmaa, A., et E. Kuoppala. 2003. « Fast pyrolysis of forestry residue. 3. storage stability of liquid fuel ». *Energy & Fuels*, vol. 17, n° 4, p. 1075-1084.
- Oasmaa, Anja, et Stefan Czernik. 1999. « Fuel oil quality of biomass pyrolysis oilsstate of the art for the end users ». *Energy & Fuels*, vol. 13, n° 4, p. 914-921.
- Orfanoudakis, NG, A Hatziapostolou, K Krallis, E Mastorakos, K Sardi, DG Pavlou et N Vlachakis. 2005. « Design, evaluation measurements and modelling of a small swirl stabilised laboratory burner ». no° 200510. *IFRF Combustion Journal*.

- Pandey, Ashok, Christian Larroche, Steven Ricke, Claude-Gilles Dussap et Edgard Gnansounou. 2011a. « 2. Life cycle assessment of biofuels ». In *Biofuels - Alternative Feedstocks and Conversion Processes*. Elsevier, p. 25-50. San Diego, USA.
- Pandey, Ashok, Christian Larroche, Steven Ricke, Claude-Gilles Dussap et Edgard Gnansounou. 2011b. « 3. Thermochemical conversion of biomass to biofuels ». In *Biofuels - Alternative Feedstocks and Conversion Processes*. Elsevier, p. 51-77. San Diego, USA.
- Plamondon, Étienne. 2015. « Impact de l'utilisation des stratégies d'injection multiple et de biodiesel sur un moteur diesel à rampe commune d'injection ». Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal.
- Physics course.NUS. 2016. « Theory and operation principle of ftir spectrometer »
< <http://www.physics.nus.edu.sg/~L3000/Level3manuals/FTIR.pdf> >
- Pyne. 2016. « IEA Bioenergy Task 34 »
< <http://pyne.co.uk/> >
- Sequera, Daniel, Ajay K. Agrawal, Scott K. Spear et Daniel T. Daly. 2008. « Combustion performance of liquid biofuels in a swirl-stabilized burner ». *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 130, no° 3, p. 032810-032810.
- Shaddix, C. R., et D. R. Hardesty. 1999. *Combustion properties of biomass flash pyrolysis oils: final project report*. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs., Livermore, CA (US).
- Shihadeh, A.L. 1998. « Rural electrification from local resources: biomass pyrolysis oil combustion in a direct injection diesel engine ». Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, US.
- Shihadeh, Alan , Paul Lewis, Robert Manurung et Janos Beer. 1994. « Combustion characterization of wood-derived flash pyrolysis oils in industrial-scale turbulent diffusion flames ». In *Proceedings of Biomass Pyrolysis Oil Properties and Combustion Meeting*. 281. p. 26-28.
- SPSQ. 2013. *Plan sectoriel 2013 — 2018 en sericulture maraîchère*.
- Stamatov, Venelin, Damon Honnery et Julio Soria. 2006. « Combustion properties of slow pyrolysis bio-oil produced from indigenous Australian species ». *Renewable Energy*, vol. 31, no° 13, p. 2108-2121.
- Steele, Philip, Don Parish et Jerome Cooper. 2012. « Demonstration results from greenhouse heating with bio-oil ». *Forest Products Journal*, vol. 62, no° 6, p. 474-479.

- Steele, Philip, Maureen E. Puettmann, Venkata Kanthi Penmetsa et Jerome E. Cooper. 2012. « Life-cycle assessment of pyrolysis bio-oil production ». *Forest Products Journal*, vol. 62, no° 4, p. 326-334.
- Suresh, Arvind, et John H. Johnson. 2001. « A study of the dilution effects on particle size measurement from a heavy-duty diesel engine with EGR ». In. SAE International.
- Triantafyllidis, Kostas S., Angelos A. Lappas et Michael Stöcker. 2013. « A General Introduction to Biomass Utilization Possibilities ». In *Role of catalysis for the sustainable production of bio-fuels and bio-chemicals*. Elsevier, p. 1-25. Oxford, RU.
- TSI. Avril 2005. *Model 3786 Ultrafine Water-based Condensation Particle Counter*.
- TSI. June 2010. *Model 3936 Scanning Mobility Particle Sizer™ (SMPS™) Spectrometer*.
- Tzanetakis, Tommy. 2011. « Spray combustion characteristics and emissions of a wood derived fast pyrolysis liquid-ethanol blend in a pilot stabilized swirl burner ». Thèse de doctorat, University of Toronto, Toronto.
- Tzanetakis, Tommy, Nicolas Farra, Sina Moloodi, Warren Lamont, Arran McGrath et Murray J Thomson. 2010. « Spray combustion characteristics and gaseous emissions of a wood derived fast pyrolysis liquid-ethanol blend in a pilot stabilized swirl burner ». *Energy & Fuels*, vol. 24, no° 10, p. 5331-5348.
- Tzanetakis, Tommy, Sina Moloodi, Nicolas Farra, Brian Nguyen, Arran McGrath et Murray J Thomson. 2011. « Comparison of the spray combustion characteristics and emissions of a wood-derived fast pyrolysis liquid-ethanol blend with number 2 and number 4 fuel oils in a pilot-stabilized swirl burner ». *Energy & Fuels*, vol. 25, no ° 10, p. 4305-4321.
- Weerachanchai, P, C Tangsathitkulchai et M Tangsathitkulchai. 2009. « Phase behaviors and fuel properties of bio-oil–diesel–alcohol blends ». *World Acad Sci Eng Technol*, vol. 56, p. 387-393.