



HAL
open science

Etude de la combustion du charbon pulvérisé et de la biomasse sur un brûleur à swirl bas NO_x

Thomas Le Bris

► **To cite this version:**

Thomas Le Bris. Etude de la combustion du charbon pulvérisé et de la biomasse sur un brûleur à swirl bas NO_x. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2010. Français. NNT : 2010VALE0027 . tel-03009262

HAL Id: tel-03009262

<https://uphf.hal.science/tel-03009262v1>

Submitted on 17 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT CAMBRÉSIS

Laboratoire d'accueil : Département Énergétique Industrielle de l'École des Mines de Douai

THÈSE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTEUR

Spécialité : Génie Mécanique et Énergétique

Par

Thomas LE BRIS

Sujet :

**Étude de la combustion du charbon pulvérisé et de la biomasse
sur un brûleur à swirl bas NOx**

Directeur de thèse : Professeur Bernard BAUDOIN

Présentée et soutenue publiquement le 23 Septembre 2010 :

Rapporteurs

Philippe DAGAUT Directeur de Recherche, CNRS Orléans
Gilles CABOT HDR, Université de Rouen

Examineurs

Mohand TAZEROUT Professeur, École des Mines de Nantes
Bernard BAUDOIN Professeur, École des Mines de Douai
Sébastien CAILLAT Enseignant-Chercheur, École des Mines de Douai
Benoît TAUPIN Docteur, VEOLIA Environnement
Ashwin CHINNAYYA Docteur, Université de Rouen
Marie-Sophie CABOT Professeure Associée, Université de Rouen
Jacques BLONDIN Ingénieur, CERCHAR
Pierre PLION Docteur, EDF R&D
Julien CANCES Docteur, AIR LIQUIDE R&D

Étude de la combustion du charbon pulvérisé et de la biomasse sur un brûleur à swirl bas NO_x

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 23 Septembre 2010

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
(spécialité Mécanique et Énergétique)

par

Thomas LE BRIS

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Philippe DAGAUT Gilles CABOT	Directeur de Recherche, CNRS Orléans HDR, Université de Rouen
<i>Examineurs :</i>	Mohand TAZEROUT Bernard BAUDOIN Sébastien CAILLAT Benoît TAUPIN Ashwin CHINNAYYA Marie-Sophie CABOT Jacques BLONDIN Pierre PLION Julien CANCES	Professeur, École des Mines de Nantes Professeur, École des Mines de Douai Enseignant-Chercheur, École des Mines de Douai Docteur, VEOLIA Environnement Docteur, Université de Rouen Professeure Associée, Université de Rouen Ingénieur, CERCHAR Docteur, EDF R&D Docteur, Air Liquide R&D

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants Bernard Baudoin et Sébastien Caillat pour leur soutien tout au long de cette étude, en particulier pour m'avoir offert l'opportunité de ce travail intéressant, ainsi que pour la confiance, les responsabilités et la liberté accordées. Je voudrais remercier Mr Philippe Dagaut et Mr Gilles Cabot d'avoir accepté le travail de rapporteur pour ma thèse. Je souhaite aussi remercier tous les doctorants du laboratoire, Tudor Florea, Peter Molcan, Lat Grand Ndiaye, Florent Le Gleau et tous les autres trop nombreux pour être cités ici pour leur aide et leur camaraderie. Je remercie les personnes avec qui j'ai travaillé pour le projet COSAMM : Yong Yan, Gang Lu, JiaQing Shao, Robert Carter, Ashwin Chinnayya ainsi que le personnel du CERCHAR Daniel Rampelberg, Jean-Pierre Crunelle, Alain Joly, Dany Lepus, Edmond Wojcieszak et bien sur Albert Bocheux pour son assistance et ses conseils. Je tiens de plus à remercier Esperanza Perdrix.

Table des matières

Table des figures xi

Liste des tableaux xv

Nomenclature	1
---------------------	----------

Introduction	3
---------------------	----------

Chapitre 1	
Combustion du charbon, de la biomasse et modélisation numérique.	5

1.1	Nature des combustibles solides : charbon et biomasse	6
1.1.1	Biomasse	6
1.1.2	Charbon	7
1.1.3	Méthodes d'analyse	11
1.2	Combustion des solides pulvérisés	15
1.2.1	Phase de dévolatilisation	15
1.2.2	Combustion du résidu carboné	18
1.2.3	Suies	20
1.2.4	Formation des cendres	20
1.2.5	Pollutions liées à la combustion du charbon	21
1.2.6	Cocombustion charbon/biomasse	23
1.3	Modélisation numérique de la combustion turbulente des solides pulvérisés	25
1.3.1	Mécanique des fluides	25
1.3.2	Chimie et énergie	27
1.3.3	Injection et granulométrie des particules	28
1.3.4	Dévolatilisation	28
1.3.5	Combustion en phase hétérogène	29
1.3.6	Radiations	29
1.3.7	Formation et oxydation des suies	29

1.3.8 Oxydes d'azote 29

Chapitre 2	
Mise en place expérimentale et obtention des conditions aux limites	31

2.1 Projet COSAMM 32

2.1.1 Définition 32

2.1.2 Objectifs 32

2.1.3 Répartition des rôles 32

2.2 Le four du CERCHAR 33

2.2.1 Description du four 33

2.2.2 Brûleur 34

2.2.3 Réglages du brûleur 35

2.2.4 Boucles de refroidissement 36

2.2.5 Cendriers 36

2.3 Instrumentation 37

2.3.1 Mesure de la vitesse des particules par sonde électromagnétique 37

2.3.2 Mesure de la granulométrie du combustible par réflexion laser 38

2.3.3 Système d'échantillonnage du charbon pulvérisé 39

2.3.4 Mesure de la température par imagerie deux couleurs et contrôle de la flamme 39

2.3.5 Système de mesure des températures et des espèces par sonde à aspiration 40

2.3.6 Comparaison des différentes zones de mesure des systèmes de température 41

2.4 Débits d'air et de charbon 41

2.4.1 Air tertiaire 42

2.4.2 Air secondaire 42

2.4.3 Air de transport et transport pneumatique du combustible pulvérisé . . . 43

2.4.4 Les différents combustibles utilisés. 44

2.4.5 Les trois campagnes de mesure 47

Chapitre 3	
Première campagne : validation des systèmes de mesure et modélisation	49

3.1 Présentation de la campagne d'essais 50

3.1.1 Objectifs 50

3.1.2 Description 50

3.1.3 Résultats préliminaires 50

3.2 Éssais des systèmes de mesure dans la veine d'alimentation 51

3.2.1 Système de mesure de vitesse des particules. 51

3.2.2 Système de mesure de la granulométrie par imagerie 52

3.3	Modélisation : choix des modèles	53
3.3.1	Écoulement fluide	53
3.3.2	Résolution de la chimie en phase gazeuse	53
3.3.3	Composition des matières volatiles	54
3.3.4	Particules : cinétique de dévolatilisation et combustion hétérogène du résidu carboné	56
3.4	Comparaison des mesures et de la modélisation numérique	57
3.4.1	Observation visuelle	57
3.4.2	Calcul de l'écoulement fluide	57
3.4.3	Mesure du flux de chaleur aux parois	58
3.4.4	Températures : mesures et modélisation	59
3.4.5	Validation du système de mesure de la température	60
3.4.6	Dioxygène	62
3.4.7	Dioxyde de carbone	64
3.4.8	Monoxyde de carbone	64
3.4.9	Oxyde d'azote	65
3.5	Synthèse du chapitre	67
3.5.1	Validation	67
3.5.2	Représentation de la physique	67

Chapitre 4	
Deuxième campagne : influence du facteur primaire et du swirl	69

4.1	Présentation de la campagne d'essais	70
4.1.1	Objectifs	70
4.1.2	Description	70
4.1.3	Modèles utilisés	71
4.2	Erreurs sur les mesures	71
4.2.1	Calcul des incertitudes	71
4.2.2	Validation par gradient	71
4.2.3	Température des cendriers et température des fumées	71
4.2.4	Bouchage des sondes par le résidu carboné	71
4.2.5	Extinctions	72
4.2.6	Pression	72
4.2.7	Durée de la mesure	72
4.3	Variations de swirl	72
4.3.1	Validation par gradient	72
4.3.2	Écoulement	72

Table des matières

4.3.3	Espèces	74
4.3.4	Température et variation d'intensité lumineuse	75
4.4	Variations de facteur d'air primaire	78
4.4.1	Validation par gradient	78
4.4.2	Écoulement	78
4.4.3	Espèces	80
4.4.4	Température et variation d'intensité lumineuse	80
4.5	Variations combinées de swirl et de facteur d'air primaire	84
4.5.1	Validation par gradient	84
4.5.2	Espèces	84
4.6	Comparaison de l'imagerie de la flamme pour le charbon de Freyming et celui de La Loma	85
4.7	Synthèse de l'impact du swirl et du facteur d'air primaire	85

Chapitre 5
Troisième campagne : cocombustion charbon/biomasse et charbon de bois 87

5.1	Présentation de la campagne d'essais	88
5.1.1	Objectifs	88
5.1.2	Combustibles	88
5.1.3	Analyses immédiates et élémentaires	89
5.1.4	Débits d'air et puissance entrante	90
5.1.5	Température de l'air secondaire et tertiaire	90
5.1.6	Erreur sur la température de la flamme	91
5.2	Résultats dans la veine d'alimentation	91
5.2.1	Granulométrie	91
5.2.2	ATG des combustibles en fonction de la granulométrie	92
5.2.3	Vitesse des particules par senseur électrostatique	93
5.3	Températures	94
5.3.1	Imagerie de la flamme	94
5.3.2	Températures dans la flamme	96
5.3.3	Comparaison des températures par thermocouples et par imagerie	97
5.4	Espèces	99
5.4.1	Dioxygène	99
5.4.2	Monoxyde de carbone	100
5.4.3	Oxyde d'azote	100
5.4.4	Mesures en cheminée	101
5.5	Analyses des dépôts et des cendres	102

5.5.1	Dépôts sur les sondes de température	102
5.5.2	Analyse des cendres volantes	103
5.5.3	Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	104
5.5.4	Analyse thermogravimétrique des cendres	105
5.5.5	Fluorescence X	105
5.5.6	Charbon de bois	106
5.6	Conclusion sur l'utilisation de la biomasse	107

Conclusion et perspectives	109
-----------------------------------	------------

Bibliographie	111
----------------------	------------

Table des figures

1.1	Exemple de structure de lignine	6
1.2	Élément de cellulose	7
1.3	Charbons de rang croissant	8
1.4	Structure représentative des fonctions chimiques d'un charbon bitumineux	8
1.5	Structure du graphite	9
1.6	Diagramme de Van Krevelen	9
1.7	Litage d'un bloc de charbon	10
1.8	Microlithotypes	11
1.9	Humidité, carbone fixe et quantité de matières volatiles en fonction du pouvoir réflecteur de la vitrinite	12
1.10	Schéma simplifié de combustion des solides pulvérisés	15
1.11	Effet de la température, des macéraux et du rang sur les transformations du mé-taplaste	16
1.12	Pyrolyse de bois	17
1.13	Oxydation du résidu carboné en fonction de l'inverse de la température	19
1.14	Mécanisme de formation des suies	20
1.15	Exemples de cendres fondues	21
1.16	Schéma résumé de la formation et destruction des oxydes d'azote	23
2.1	Vue d'ensemble du four du CERCHAR	33
2.2	Schéma du foyer avec le brûleur, les boucles de refroidissement, le cendrier, et la position de la camera du système d'imagerie de la flamme.	34
2.3	Schéma de fonctionnement du brûleur bas-NOx	34
2.4	Principe de fonctionnement du système de mesure devitesse des particules.	37
2.5	Les deux signaux obtenus et leur corrélation	37
2.6	Les deux types d'électrodes et les différentes positions des électrodes intrusives	38
2.7	Système de mesure de la granulométrie par réflexion laser	38
2.8	Paramètres géométriques mesurés sur la flamme du brûleur pilote de RWE npower.	39
2.9	Photo latérale du four avec les deux systèmes de mesure de température.	40
2.10	Définition des zones de mesure par thermocouple et des espèces, comparées avec celle de la caméra bichromatique	41
2.11	Maillage du passage intra ventelle pour 1 cm de position de la plaque ventelle	42
2.12	Maillage du passage intra ventelle pour 8 cm de position de la plaque ventelle	42
2.13	Maillage utilisé pour le calcul de l'air de swirl	43
2.14	Modélisation de la veine d'écoulement : vitesse de l'air I (m/s)	44
2.15	Modélisation de la densité de particules en entrée du brûleur	44
2.16	Diagramme de Van Krevelen représentant les trois charbons utilisés	45

3.1	Granulométrie des particules en nombre par tamisage, par réflexion laser, et par diffraction	52
3.2	Lignes de courant dans le foyer modélisées dans le plan horizontal	58
3.3	Flux de chaleur récupéré par les boucles d'eau	58
3.4	Températures mesurées (valeurs)(K) et températures calculées (couleurs)(K) . . .	59
3.5	Températures des lignes de mesure et modélisation	60
3.6	Deux résultats instantanés de mesure de température par imagerie deux couleurs	60
3.7	Résultat moyenné sur 10 minutes de mesure de température par imagerie deux couleurs en °C	61
3.8	Comparaison des deux types de mesure de température et du modèle	61
3.9	Fraction molaire de O_2 des lignes de mesure et modélisation	62
3.10	Modélisation de la fraction molaire d'oxygène dans le four	63
3.11	Fraction molaire de CO_2 des lignes de mesure et modélisation	64
3.12	Fraction molaire de CO des lignes de mesure et modélisation	65
3.13	Modélisation de la fraction molaire de monoxyde d'azote dans le four	66
3.14	Modélisation de la fraction molaire de cyanure d'hydrogène dans le four	66
3.15	Fraction molaire de NO des lignes de mesure et modélisation	66
4.1	Paramètres de swirl et de facteur d'air primaire utilisés pour le brûleur	70
4.2	Modélisation de l'amplitude de la vitesse ($m.s^{-1}$) à swirl faible ($SW=0,87$)	73
4.3	Modélisation de l'amplitude de la vitesse ($m.s^{-1}$) à swirl élevé ($SW=4,35$)	73
4.4	NO en fonction de SW	74
4.5	CO en fonction de SW	74
4.6	Impact des variations de swirl sur la forme de la flamme	75
4.7	Modélisation de la température (K) à swirl faible ($SW=0,87$)	76
4.8	Modélisation de la température (K) à swirl élevé ($SW=4,35$)	76
4.9	Température de la flamme par imagerie en fonction du swirl (SW)	77
4.10	Fréquence de variation de l'intensité lumineuse de la flamme en fonction du swirl (SW)	77
4.11	Modélisation de la vitesse à facteur d'air primaire faible ($\lambda_1=0,58$)	79
4.12	Modélisation de la vitesse à facteur d'air primaire fort ($\lambda_1=1,01$)	79
4.13	NO en fonction de λ_1	80
4.14	CO en fonction de λ_1	80
4.15	Impact des variations de facteur d'air primaire sur la forme de la flamme	81
4.16	Modélisation de la température (K) à facteur d'air primaire faible ($\lambda_1=0,58$) . . .	82
4.17	Modélisation de la température (K) à facteur d'air primaire élevé ($\lambda_1=1,01$) . . .	82
4.18	Température de la flamme par imagerie en fonction du facteur d'air primaire . . .	83
4.19	Fréquence de variation de l'intensité lumineuse de la flamme en fonction du facteur d'air primaire	83
4.20	Effet du facteur d'air primaire à swirl haut ($SW=4,35$) sur NO	84
4.21	Effet du facteur d'air primaire à swirl haut ($SW=4,35$) sur CO	84
4.22	Effet du facteur d'air primaire à swirl bas ($SW=0,87$) sur NO	84
4.23	Effet du facteur d'air primaire à swirl bas ($SW=0,87$) sur CO	84
4.24	Freyming	85
4.25	La Loma	85
5.1	Exemple de mélange	89
5.2	Granulométrie en entrée du brûleur mesurée par réflexion laser	91

5.3	Granulométrie par tamisage pour trois fractions de biomasse dans le combustible, charbon pur, 10% de biomasse et 20% de biomasse	92
5.4	Imagerie de température de la flamme pour le mélange à 15% de biomasse à 3 moments différents.	94
5.5	Imagerie de température de la flamme pour différentes concentrations de biomasse	95
5.6	Variations de la température de flamme par imagerie en fonction de la quantité de biomasse du combustible	96
5.7	Température dans la flamme par thermocouple pour différents pourcentages de biomasse	97
5.8	Températures dans l'axe du brûleur à 0% de biomasse	98
5.9	Températures dans l'axe du brûleur à 5% de biomasse	98
5.10	Températures dans l'axe du brûleur à 10% de biomasse	98
5.11	Températures dans l'axe du brûleur à 15% de biomasse	98
5.12	Températures dans l'axe du brûleur à 20% de biomasse	98
5.13	Fraction molaire de O_2 pour différents pourcentages de biomasse	99
5.14	Fraction molaire de CO pour différents pourcentages de biomasse	100
5.15	Fraction molaire de NO pour différents pourcentages de biomasse	101
5.16	Dépôts sur les manchons des thermocouples pour différentes mélanges charbon-pellet	103
5.17	Photos des cendres volantes prélevées	104
5.18	Analyse DRX des cendres volantes sans traitement	104

Table des figures

Liste des tableaux

1.1	Classification du résidu carboné	18
2.1	Analyse élémentaire des combustibles	45
2.2	Rang et composition macérale du charbon de Freyming.	46
2.3	Composition élémentaire en pourcentage molaire des volatils mesurés sur un brû- leur à flamme plate ^[22]	46
3.1	Conditions et résultats de la première session	50
3.2	Résultats des capteurs de vitesse électrostatiques	51
3.3	Nombre de Stokes sur la gamme de taille des particules de charbon	51
3.4	Modèles utilisés	54
3.5	Compositions élémentaires des volatils (fraction molaire)	54
3.6	Composition moléculaire des volatils modélisés	55
3.7	PCI et pouvoir comburivore dans l'ouvrage et dans la cheminée	55
3.8	Propriétés utilisées pour les différentes injections de particules	57
5.1	Analyse en masse des combustibles utilisés pour la campagne de co-combustion	89
5.2	Analyse immédiate des mélanges charbon pellet	90
5.3	Température de l'air secondaire et tertiaire	90
5.4	Analyse Thermo Gravimétrique après tamisage des mélanges de combustible pré- levés dans la veine d'alimentation	93
5.5	Vitesse des particules ($m.s^{-1}$) et deviation standard de la corrélation (ms) en fonction de la fraction massique de biomasse	93
5.6	Mesures en cheminée	101
5.7	Analyse thermogravimétrique des cendres volantes	105
5.8	Composition élémentaire des cendres volantes en masse équivalent oxyde par fluo- rescence X après perlage	106

Nomenclature

ϵ	taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ($m^2.s^{-3}$)
μ	viscosité dynamique ($N.s.m^{-2}$)
μ_t	viscosité turbulente ($N.s.m^{-2}$)
μ_0	viscosité dynamique à la température T_0 de référence ($N.s.m^{-2}$)
ν	viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$)
ρ	masse volumique ($kg.m^{-3}$)
$\bar{\tau}$	tenseur de viscosité
ϕ	grandeur conservative
$\bar{\phi}$	moyenne de Reynolds de la grandeur ϕ
$\tilde{\phi}$	moyenne de Favre de la grandeur ϕ
A	constante préexponentielle (s^{-1})
D	coefficient de diffusion ($m^2.s^{-1}$)
d_p	diamètre de la particule (m)
dA	vecteur surface élémentaire (m^2)
dV	élément de volume (m^3)
E	énergie d'activation ($kJ.mol^{-1}$) ou ($J.kmol^{-1}$ - unité Fluent)
f	fraction de mélange
$f_{v,0}$	fraction massique des volatils présents initialement dans le combustible
\vec{g}	vecteur gravité ($m.s^{-2}$)
H	enthalpie ($J.kg^{-1}$)
I	matrice identité
k	énergie cinétique de turbulence ($m^2.s^{-2}$)
L	longueur caractéristique de l'écoulement (m)
m	masse (kg)
\dot{m}	débit massique ($kg.s^{-1}$)
m_p	masse de la particule (kg)
m_v	masse des volatils (kg)
m_a	masse des cendres (kg)
p	pression (Pa)
Re	nombre de Reynolds
S	constante de Sutherland
S_ϕ	terme source de ϕ
St	nombre de Stokes
t	temps (s)
T	température (K)

Nomenclature

u_i	<i>composante de la vitesse dans la direction i ($m.s^{-1}$)</i>
U	<i>vitesse du fluide ($m.s^{-1}$)</i>
\vec{v}	<i>vecteur vitesse ($m.s^{-1}$)</i>
V_a	<i>Pouvoir comburivore ($kg.kg^{-1}$)</i>
x_i	<i>coordonnée cartésienne (m)</i>
Y_i	<i>fraction massique de l'espèce i</i>
Z_i	<i>fraction massique élémentaire de l'élément i</i>
$Z_{i,ox}$	<i>fraction massique élémentaire de l'élément i dans l'oxydant</i>
$Z_{i,fuel}$	<i>fraction massique élémentaire de l'élément i dans le combustible</i>

Introduction

Le charbon est la principale ressource de combustible fossile^[1]. Sa combustion est la première source mondiale d'énergie électrique. La combustion se fait principalement dans des centrales de grande puissance produisant plusieurs centaines de mégawatt (MW). La combustion se fait souvent sous forme de combustible pulvérisé afin de pouvoir brûler rapidement le charbon et ainsi générer une puissance importante.

C'est un combustible polluant. Sa combustion dégage des oxydes d'azote, des oxydes de soufre, des cendres et du CO_2 , gaz à effet de serre. Les émissions polluantes des installations sont de plus en plus réglementées et contrôlées^[1]. Certes, les polluants peuvent être éliminés après la combustion, mais il est aussi possible de changer la méthode de combustion afin de réduire les émissions polluantes avant tout traitement. Ces méthodes applicables aux oxydes d'azotes peuvent poser des problèmes de réduction du rendement, voir des problèmes de stabilité de la flamme. L'importance de l'utilisation du charbon le rend irremplaçable à court terme, les énergies alternatives qui peuvent fournir les quantités d'énergie nécessaires ne sont pas encore disponibles pour des raisons techniques. En attendant, une solution possible consiste à remplacer une partie du charbon par de la biomasse. La biomasse a dû absorber dans l'atmosphère le carbone dont elle est composée, par conséquent elle est donc considérée neutre du point de vue des émissions de CO_2 .

Le travail fait ici a comme objectif principal d'apporter une aide à la compréhension de la physique de la flamme pour valider des instruments de contrôle pour centrales de grande puissance. Nous avons ainsi cherché à mettre en évidence les différents mécanismes physicochimiques en jeu et le fonctionnement d'un brûleur à swirl bas-NOx afin de connaître la pertinence des mesures. Les instruments de mesure classiques et la modélisation sont des outils servant cet objectif. On s'est aussi attaché à la problématique des oxydes d'azotes et leur réduction par des méthodes primaires^[68]. Initialement prévue pour du charbon pur, l'étude a été étendue à la cocombustion charbon/biomasse et à la combustion du charbon de bois.

L'étude présentée commence par décrire les combustibles utilisés : le charbon et la biomasse, ainsi que quelques méthodes pour leur analyse. Elle explique les mécanismes de la combustion turbulente des combustibles pulvérisés, puis une approche rapide sur les méthodes numériques utilisées.

Le four du CERCHAR sur lequel ont lieu les essais est décrit par la suite, ainsi que les instruments de mesure utilisés. Les trois campagnes de mesure sont ensuite présentées :

- Les résultats obtenus lors de la première campagne de mesure avec le charbon de Freyming (France) sont présentés. On y montre les éléments de validation des différents instruments expérimentaux. On compare les mesures expérimentales de granulométrie et de température avec les mesures classiques du CERCHAR. On utilise aussi les mesures du CERCHAR pour la compréhension physique des phénomènes en s'aidant de la modélisation numérique.
- La seconde campagne de mesure étudie l'impact des réglages du brûleur en utilisant du charbon de La Loma (Colombie), un charbon bitumineux de bas rang. Les effets des varia-

tions de swirl et de stoechiométrie primaire sur la structure de la flamme, sa température et les émissions polluantes de NO_x et CO sont étudiés. On s'appuie encore sur la modélisation numérique en complément.

- La dernière campagne de mesure présente l'impact de l'ajout de biomasse dans une flamme d'un charbon pulvérisé bitumineux de Middleburg (Afrique du sud). L'ajout de biomasse est fait à différentes fractions massiques. Cet ajout de biomasse force à changer les réglages du brûleur en fonction de la quantité de biomasse injectée. On essaye donc de séparer les effets des variations du brûleur constatés pendant la deuxième campagne et ceux de l'ajout de biomasse. Il apparaît clairement une amélioration de la combustion du charbon avec l'ajout de biomasse au détriment d'un encrassement important. La modélisation numérique n'a pas pu être faite pour une question de temps.

Combustion du charbon, de la biomasse et modélisation numérique.

Contents

1.1	Nature des combustibles solides : charbon et biomasse	6
1.1.1	Biomasse	6
1.1.2	Charbon	7
1.1.3	Méthodes d'analyse	11
1.2	Combustion des solides pulvérisés	15
1.2.1	Phase de dévolatilisation	15
1.2.2	Combustion du résidu carboné	18
1.2.3	Suies	20
1.2.4	Formation des cendres	20
1.2.5	Pollutions liées à la combustion du charbon	21
1.2.6	Cocombustion charbon/biomasse	23
1.3	Modélisation numérique de la combustion turbulente des solides pulvérisés	25
1.3.1	Mécanique des fluides	25
1.3.2	Chimie et énergie	27
1.3.3	Injection et granulométrie des particules	28
1.3.4	Dévolatilisation	28
1.3.5	Combustion en phase hétérogène	29
1.3.6	Radiations	29
1.3.7	Formation et oxydation des suies	29
1.3.8	Oxydes d'azote	29

1.1 Nature des combustibles solides : charbon et biomasse

Le charbon et la biomasse, les deux combustibles utilisés dans cette étude, sont d'une nature proche. Le charbon dérive de la biomasse. La combustion de la biomasse est bien plus ancienne que la combustion du charbon, cependant la combustion du charbon est liée à la Révolution Industrielle et a permis d'obtenir les quantités d'énergie nécessaires au développement de la civilisation actuelle. En tant que support énergétique majeur, le charbon a été extensivement étudié. L'utilisation de la biomasse comme combustible revient actuellement pour une raison de contrôle des émissions de CO_2 ^[2]. Puisque le charbon est bien étudié, la combustion de la biomasse est comparée avec celle du charbon.

1.1.1 Biomasse

Dans le domaine de l'énergie, biomasse est le nom donné à tout combustible d'origine organique formé récemment. La biomasse est principalement composée des éléments carbone, hydrogène et oxygène. On trouve encore dans la composition élémentaire des plantes, de l'azote, du soufre, des composés alcalins. Comme cette étude utilise du bois, il sera fait référence sous le terme biomasse dans ce document à la biomasse ayant pour origine les plantes. Elle est composée majoritairement de lignine et de cellulose^[34].

Lignine

La lignine est un composé phénolique, commun aux différentes plantes avec de légères variations de composition en fonction des espèces (Figure 1.1).

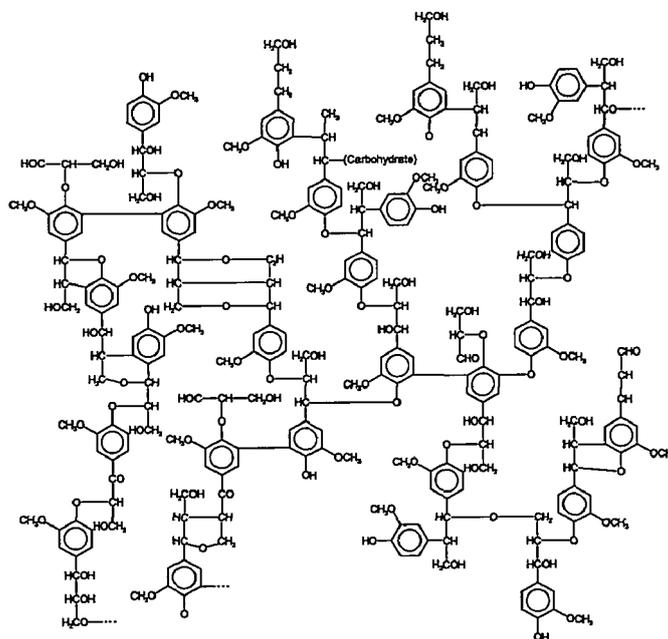


FIGURE 1.1 – Exemple de structure de lignine

On trouve la lignine principalement dans les parois pectocellulosiques de certaines cellules végétales, c'est le composé qui apporte la rigidité des plantes. C'est un composé résistant à la décomposition.

Cellulose

La cellulose est un glucide, c'est le principal constituant des végétaux. C'est un composé qui résiste mal à la décomposition. La figure 1.2 présente un élément de cellulose.

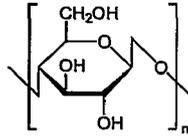


FIGURE 1.2 – Élément de cellulose

Autres

La cellulose et la lignine ne sont pas les seuls constituants de la biomasse, il existe un certain nombre de parties de la plante, minoritaires, qui ne rentrent pas dans cette catégorie. Les parties qui résistent à la décomposition, comme les organes de protection (par exemple : cuticules, spores) et les résines peuvent être retrouvées dans les charbons, généralement en quantité négligeable, mais elles peuvent se retrouver en quantité significative si la décomposition de la matière organique est importante.

1.1.2 Charbon

Le charbon est une roche sédimentaire organique. Elle est formée à partir de la déposition de tissus organiques divers, principalement des plantes en zone marécageuse deltaïque, puis de leur transformation en roche (Diagénèse)^[20]. Elle est composée principalement de carbone, d'oxygène et d'hydrogène ; plus minoritairement d'azote et de soufre. On trouve également dans le charbon différents composés minéraux de nature variable, *Si*, *Al*, *Fe*, *S*, etc, dans des quantités variables en fonction des conditions de sédimentation. Le soufre peut être présent dans le charbon sous forme organique, en tant que constituant des plantes, mais aussi sous forme de pyrite (*FeS*).

Formation

Le milieu principal de formation des charbons sont les marais côtiers deltaïques. Les charbons sont formés par sédimentation de matière organique dans un milieu réducteur. Dans une eau stagnante, l'oxygène est vite consommé par les bactéries qui ne peuvent plus survivre. De plus en absence de recyclage de l'eau, la décomposition de la biomasse augmente l'acidité de l'eau, ce qui empêche la survie des bactéries. La matière organique non décomposée sédimente pour former de la tourbe.

Rang

Le rang représente le degré de maturation du charbon ; son degré d'évolution entre la tourbe et le graphite (Figure 1.3^[72]).

Le processus de maturation est lié au temps, à la pression et à la température. Le rang est un critère de grande importance pour connaître la combustion des charbons car les propriétés physicochimiques du charbon changent avec le rang. La température de dévolatilisation augmente, la quantité de matières volatiles baisse, la nature des matières volatiles change et le pouvoir calorifique augmente. On divise le rang des charbons en trois grandes parties :



FIGURE 1.3 – Charbons de rang croissant
De gauche à droite, lignite à anthracite

Les lignites (brown coals) Le terme lignite est utilisé pour les charbons nouvellement formés (diagénèse). Ils sont formés par compression de la tourbe, l'eau est expulsée de manière mécanique par la pression. Ces roches présentent encore la structure reconnaissable de la matière organique. La matière organique légèrement décomposée forme un gel constitué d'un ensemble de chaînes aliphatiques. La maturation de ces roches carbonées va conduire à une création d'eau et de dioxyde de carbone par la restructuration chimique de la matière organique. Le principal effet sur la composition élémentaire est la perte d'oxygène. Ce sont des charbons à faible pouvoir calorifique. En général, ils contiennent une grande quantité de matières volatiles, mais les matières volatiles produites par la pyrolyse contiennent beaucoup d'eau, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, ce qui donne aux matières volatiles un faible pouvoir calorifique. De plus, ils contiennent encore une grande quantité d'eau et de cendres qui diminuent leur pouvoir calorifique. La maturation des lignites mène aux charbons bitumineux.

Les charbons bitumineux ou charbons Les charbons bitumineux sont des roches carbonées en phase de catagenèse. Cette phase se caractérise par une perte de CH et une aromatisation de la matière organique. On peut voir une structure chimique théorique d'un charbon bitumineux sur la figure 1.4^[18].

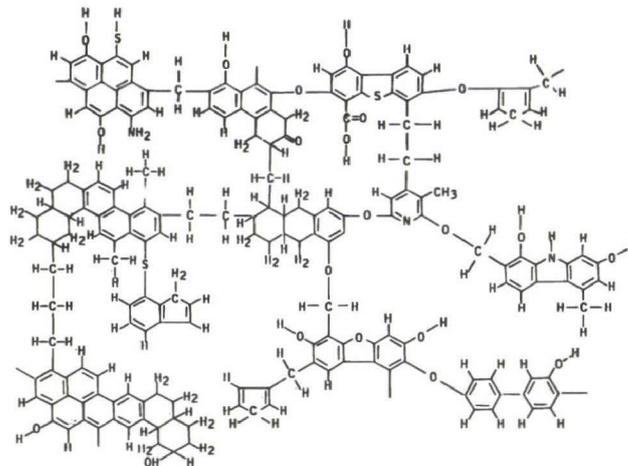


FIGURE 1.4 – Structure représentative des fonctions chimiques d'un charbon bitumineux

La teneur en matière volatile est forte et la matière volatile libérée est la plus riche en goudrons à cause de la forte aromaticité de ces charbons. Le pouvoir calorifique est important. La maturation des bitumineux mène aux anthracites.

Les anthracites La phase finale de la maturation est la métagénèse qui se caractérise par une formation de méthane et une graphitisation de la matière organique : les composés aromatiques s'organisent en de plus en plus grandes structures proches de la structure du graphène puis du graphite comme sur la figure 1.5^[16]. Durant cette étape, le charbon perd principalement de l'hydrogène. Le pouvoir calorifique est important, mais la faible teneur en matière volatile et la compacité du résidu carboné demandent un temps de séjour long pour une combustion complète. Les matières volatiles formées sont légères.

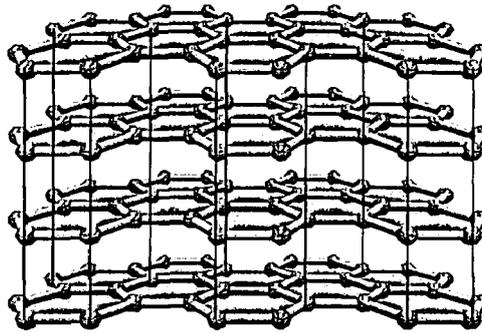


FIGURE 1.5 – Structure du graphite

Il est possible d'utiliser un diagramme de Van Krevelen^[20] qui présente les rapports élémentaires H/C et O/C pour identifier le rang d'un charbon. Un diagramme est présenté sur la figure 1.6, les flèches représentent le rang croissant.

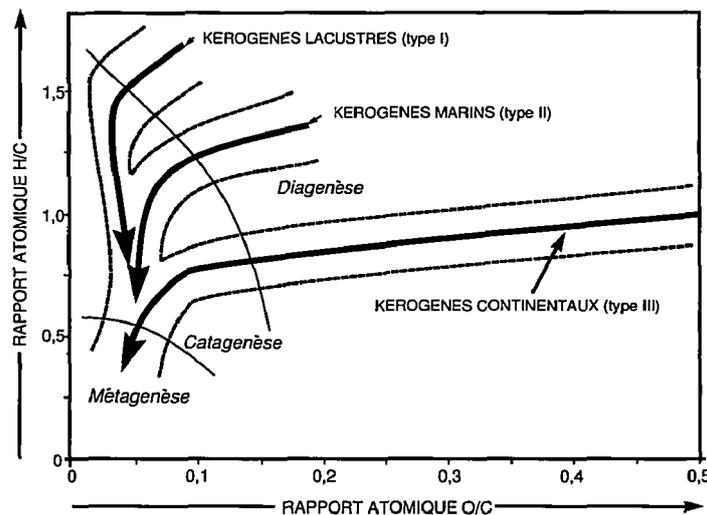


FIGURE 1.6 – Diagramme de Van Krevelen

Le terme kerogene désigne tout type de roche organique. Les kerogenes continentaux sont ceux qui donnent généralement les charbons, mais en fonction des conditions de sédimentation

et d'enfouissement les deux autres types de kerogènes peuvent aussi donner des charbons (charbon sapropélitiques)^[20].

Composition macérale

On observe à l'œil nu différents éléments stratifiés composants les charbons (voir figure 1.7), on appelle ces éléments les lithotypes.

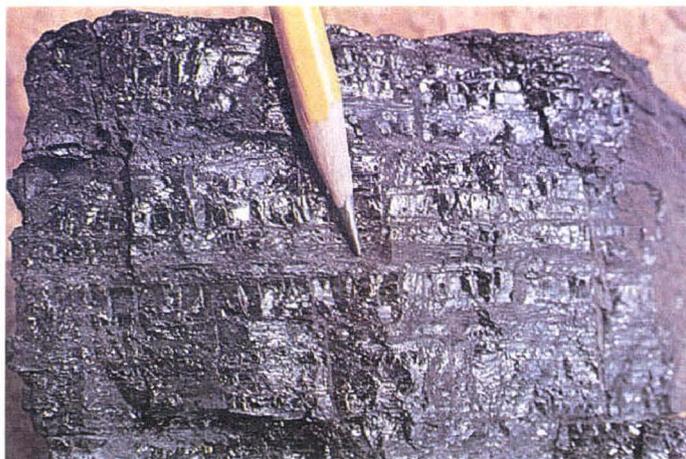


FIGURE 1.7 – Litage d'un bloc de charbon
(Image par West Virginia Geological and Economic Survey)

Les microlithotypes sont les composants microscopiques des lithotypes composés eux-mêmes par des éléments appelés macéraux par analogie avec les minéraux. Actuellement la composition macérale est généralement obtenue par une analyse manuelle au microscope, ou par la technique du « float and sink ». On classe les macéraux en trois groupes principaux :

Vitrinite La vitrinite, dont les précurseurs sont les produits lignocellulosiques gélifiés à l'abri de l'air, est le principal macéral du charbon. La formation de la vitrinite se fait en milieu anaérobie ; elle présente une faible décomposition, seule la cellulose est attaquée. C'est le macéral de référence^[36]. Il peut aussi être appelé huminite pour les charbons de bas rang^[35].

Inertinite L'inertinite représente le groupe des macéraux les plus dégradés, par une décomposition forte liée à la présence/circulation d'oxygène, ou par oxydation directe dans l'atmosphère (fusinite). Ils sont très peu réactifs et contiennent une quantité d'hydrogène inférieure aux autres macéraux. L'inertinite possède une teneur en matière volatile faible, son résidu carboné brûle difficilement et l'inertinite est souvent associée à une forte teneur en cendres^[37].

Exinite ou Leptinite Le groupe de l'exinite, également nommé leptinite, regroupe tous les macéraux formés d'éléments préservés de l'oxydation autres que les parties lignocellulosiques. Les éléments à la base de l'exinite sont variables, il s'agit d'éléments résistants à la décomposition, par exemple des résines ou des organes de protection. L'exinite possède la plus grande teneur en hydrogène et en matière volatile des trois groupes de macéraux^[20].

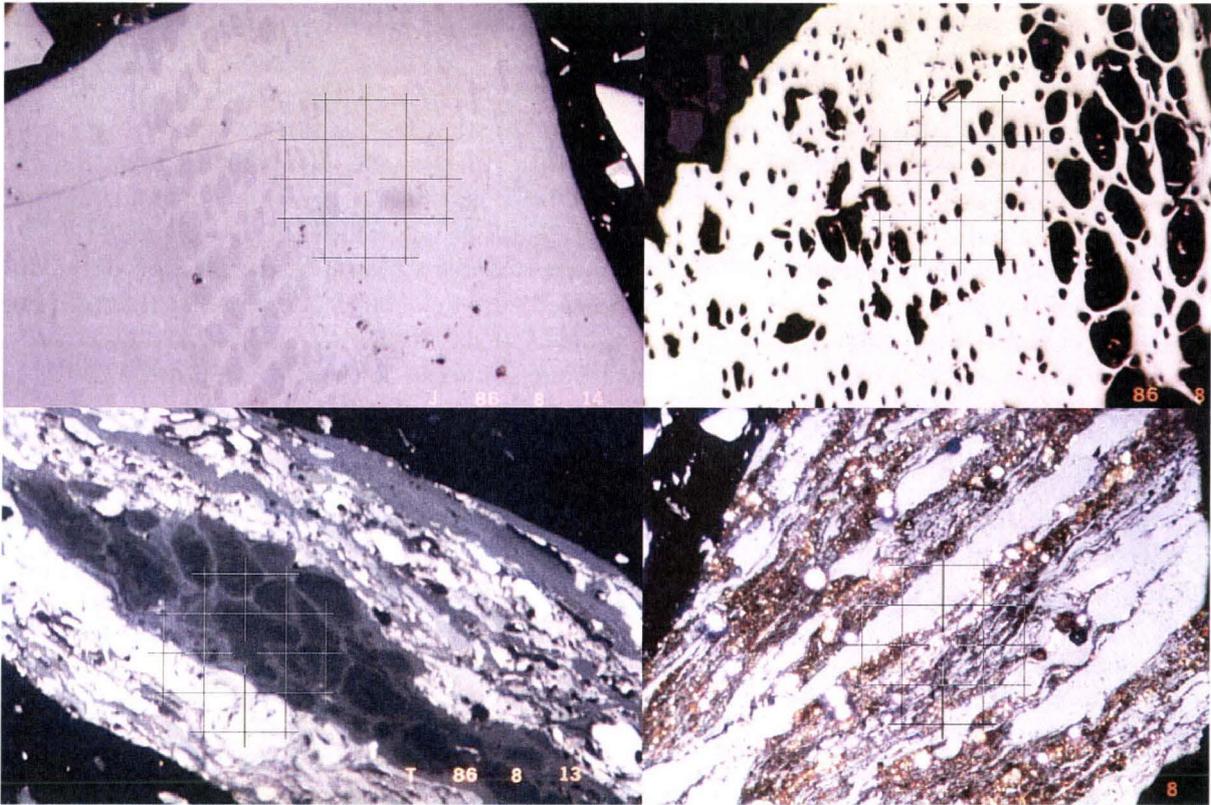


FIGURE 1.8 – Microlithotypes

En haut à gauche : Vitrite (Vitrinite), en haut à droite : Inertite (Inertinite), en bas à gauche : Durite (Leptinite (sombre) et Inertinite (clair)), en bas à droite : Minerite (Mineral (doré) et Vitrinite) La largeur d'une case du reticule est de $12,5 \mu\text{m}$

La figure 1.8 présente quatre microlithotypes différents, ce qui permet de présenter les trois grands groupes de macéraux. Plus le rang augmente, plus les différences entre les macéraux diminuent. Avec le rang croissant, tous les macéraux tendent vers une structure graphitique.

1.1.3 Méthodes d'analyse

Les analyses peuvent donner des résultats différents en fonction des protocoles utilisés. Afin de pouvoir comparer les charbons entre eux, il existe des normes. Les deux principales analyses standards utilisées dans l'industrie sont l'analyse immédiate et l'analyse élémentaire^[5].

Analyse immédiate

L'analyse immédiate d'un charbon est la mesure du pouvoir calorifique, de la quantité de matière volatile, de la quantité de cendre et de l'humidité sur une base massique. Elle est faite à partir de mesures par bombe calorimétrique et en thermobalance^[43].

Pouvoir calorifique Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité d'énergie que l'on peut obtenir par unité de masse du combustible. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)

représente l'énergie totale qui pourrait se dégager. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) exclut l'énergie de condensation de l'eau.

Matières volatiles Un élément crucial pour la combustion des solides pulvérisés comme le charbon et la biomasse est la quantité de matière volatile. La quantité, la nature des matières volatiles et la cinétique de dévolatilisation lors de la combustion sont liées principalement à la nature du charbon, à la taille des particules, à la vitesse de chauffe et à la température maximale^{[10][48]}. Les tests standards en thermobalance^[43], sont faits avec des vitesses de chauffe de l'ordre du °C.min⁻¹. La température maximum est souvent de l'ordre de 1000°C. Ces conditions sont très inférieures et non représentatives relativement aux conditions présentes dans les centrales à charbon pulvérisé qui sont de l'ordre de 10⁵ °C.min⁻¹ pour la vitesse de chauffe et à plus de 1500 °C pour la température maximum.

Humidité et cendres Il reste une certaine quantité d'eau présente dans les combustibles, cette eau diminue la réactivité du combustible. Déposés pendant la sédimentation ou la diagénese, une fraction de matière minérale se trouve dans les charbons, il s'agit principalement d'alumino-silicates et de quartz. La masse du résidu après combustion complète en thermobalance est appelée cendre.

La figure 1.9 montre les variations d'humidité, de carbone fixe et de matières volatiles en fonction du pouvoir réflecteur de la vitrinite équivalent au rang. Avec le rang croissant le pouvoir réflecteur de la vitrinite est croissant (Voir paragraphe 1.1.3). Les valeurs utilisées sont celles des charbons de référence du BCURA^{1[19]}.

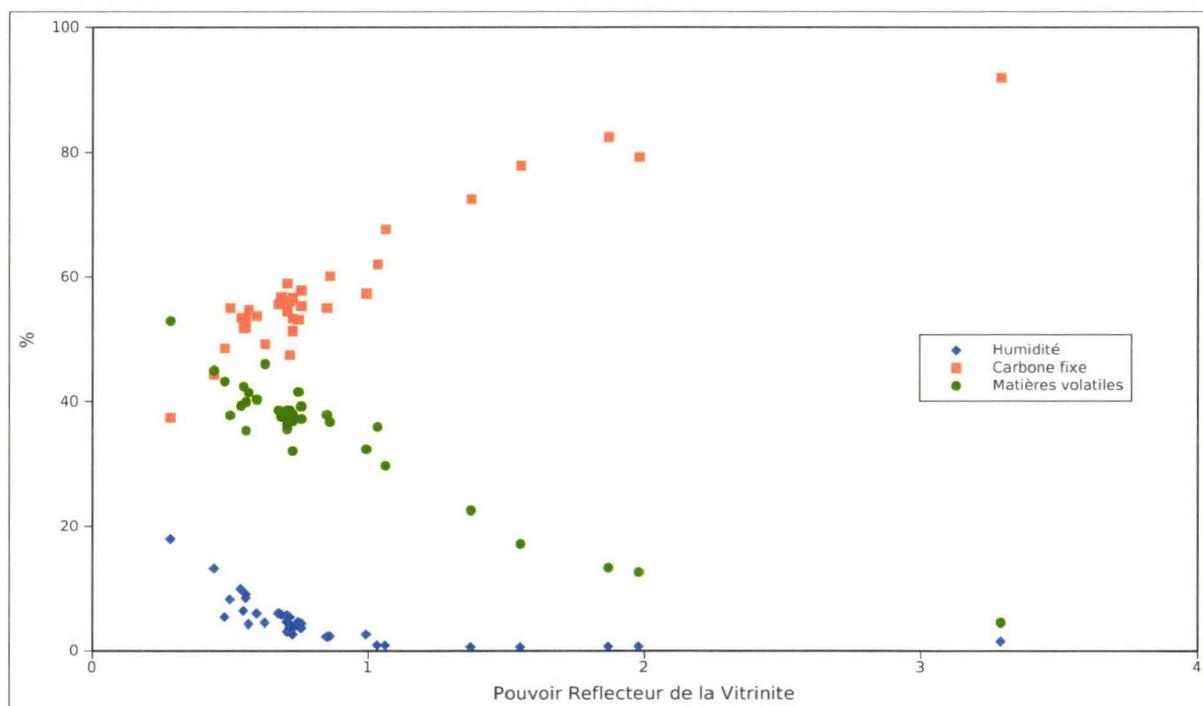


FIGURE 1.9 – Humidité, carbone fixe et quantité de matières volatiles en fonction du pouvoir réflecteur de la vitrinite

1. British Coal Utilisation Research Association

Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire des charbons donne le pourcentage massique des différents atomes de carbone, oxygène, hydrogène, soufre et azote. On peut présenter les résultats sous trois formes différentes :

- comme l'eau et les cendres ne participent pas à la combustion, on peut établir la proportion des éléments sans tenir compte dans le pourcentage, de la quantité d'eau et de cendres. Ce type de donnée est appelé « composition élémentaire eau et cendres exclues » ou « sur pur » (*dry ash free* en anglais).
- la composition est nommée « sur sec » si on compte la masse de cendres mais on ignore la masse d'eau (*dry* en anglais)
- si le charbon est considéré dans son intégralité on dit : « sur brut » (*as received* en anglais).

La composition élémentaire d'un charbon est liée à son rang, comme on peut le voir sur le diagramme de Van Krevelen (figure 1.6). Avec le rang, la proportion de carbone augmente au détriment de l'oxygène dans un premier temps (Diagenèse), au détriment de l'hydrogène dans un deuxième temps (Catagenèse puis Metagenèse). La composition élémentaire est liée à la composition macérale : l'exinite augmente la quantité d'hydrogène présent tandis que l'inertinite va diminuer la concentration d'hydrogène.

Rang et pouvoir réflecteur de la vitrinite

Avec le changement progressif de structure lors de la maturation, on observe une variation de la réflectivité des macéraux. La vitrinite est caractéristique de la décomposition des tissus lignocellulosiques. L'inertinite a, dès le début de sa maturation, une réflectivité forte qui changera peu. Les composés non dégradés de l'exinite présentent une réflectivité faible, variable en fonction de la nature de la biomasse dégradée.

Le pouvoir réflecteur de chacun des macéraux est liée aux éléments suivants :

- Inertinite : type de biomasse + degré de dégradation + rang
- Exinite : type de biomasse + rang
- Vitrinite : rang

Le pouvoir réflecteur de la vitrinite (PRV) d'un charbon est défini comme étant le pourcentage de lumière réfléchi par la vitrinite du charbon. Plus la structure carbonée de la vitrinite approche de celle du graphite, plus elle est réflectrice de la lumière. Le test de réflectivité de la vitrinite est un test objectif et quantitatif car il ne dépend que du rang.

Porosité

La porosité du charbon est mesurée par des méthodes d'adsorption de gaz à la surface du solide (méthodes BET)^[63] ou par injection de mercure sous pression. La porosité naturelle peut changer fortement lors du processus de combustion.

Indice de gonflement et méthode Gray-King

On utilise l'indice de gonflement et la méthode de Gray-King^{[5][20]} pour caractériser le gonflement des particules. Ce sont des indicateurs des propriétés cokéfiantes du charbon pour les aciéries, mais aussi une indication sur la structure du résidu carboné et donc sur sa combustion.

2. Brunauer, Emmett et Teller

Densité

La densité des macéraux est variable, leurs compositions élémentaires sont différentes. L'exinite, qui contient beaucoup d'hydrogène, est la moins dense tandis que l'inertinite, qui contient le moins d'hydrogène, est la plus dense. La porosité du charbon et sa teneur en matière minérale sont variables. La densité des particules est variable pour un même charbon.

La flottation autrement appelée *Float and Sink* est une méthode qui permet d'identifier les macéraux par la mesure de leur densité. Le principe de cette méthode est basé sur la teneur en hydrogène des macéraux. Le charbon doit être broyé suffisamment fin afin de séparer les macéraux. Leur densité est mesurée en immergeant les particules dans des solutions à densité variable. Les macéraux qui flottent sont moins denses que la solution étalon, on classe de cette façon les particules broyées en fonction de leur densité^[41].

Composition macérale des particules

Il existe une méthode de mesure par microscope à immersion d'huile de la composition macérale des particules, cette procédure est rarement utilisée par les industriels car elle est manuelle et demande du temps. Cependant, des procédés d'automatisation existent, issus des nouvelles techniques de reconnaissance d'image. Ces techniques sont utilisées actuellement pour la prédiction de la cinétique de combustion hétérogène du résidu carboné^{[21][70]}.

1.2 Combustion des solides pulvérisés

La flamme de charbon pulvérisé, ainsi que celle de la biomasse, est une flamme de diffusion turbulente. Le charbon est broyé sous la forme de grains d'un diamètre de l'ordre de la centaine de microns. Le charbon pulvérisé est injecté dans la chaudière précédemment allumée/chauffée, où il subit une pyrolyse sous l'effet d'un apport brusque de chaleur. Lors de cette pyrolyse, il change plus ou moins de structure avec une possibilité de fluidification de la particule. Il perd ses matières volatiles qui subissent craquage, polymérisation et oxydation. La partie solide restante ou résidu carboné est ensuite oxydée. Il en reste juste des cendres si la combustion est complète (Figure 1.10).

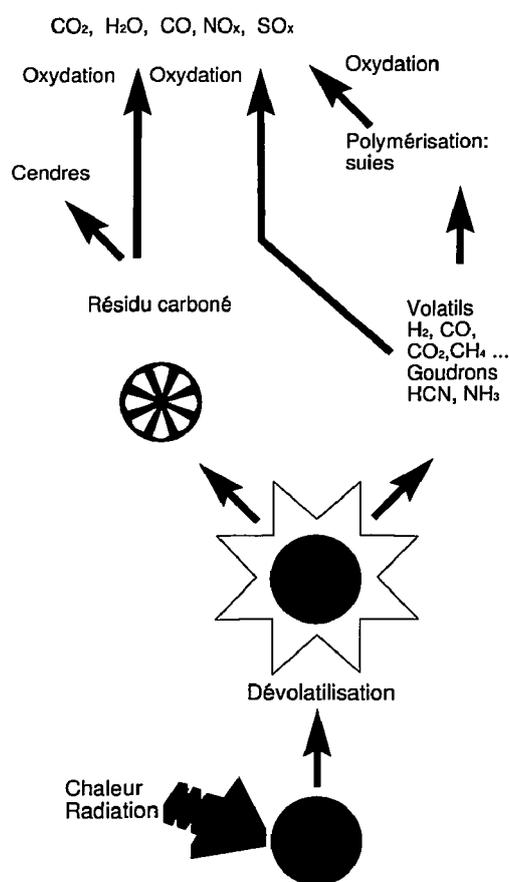


FIGURE 1.10 – Schéma simplifié de combustion des solides pulvérisés

1.2.1 Phase de dévolatilisation

Stage plastique

Le stage plastique est la période où, éventuellement, la particule de charbon se fluidifie. Lors de l'injection d'une particule dans la flamme, cette particule atteint une température entre 1000 et 2000 K en quelques millisecondes. Sous l'effet de cette chauffe intense la particule va commencer à se décomposer, et en fonction de la température, du rang et de la composition macérale, la particule peut plus ou moins se fluidifier.

- Plus la température est élevée, plus la fluidité est grande.
- Les charbons de bas rang, type lignite, donnent des résidus carbonés très fluides.
- Pour les charbons bitumineux, on observe un phénomène, cyclique ou pas, de formation de bulles par effet de minimisation de la tension de surface. La polarité des matières volatiles liée à l'aromaticité des charbons bitumineux semble être un facteur dominant ce phénomène^[41].
- Les anthracites sont peu affectés, la forme de la particule reste globalement la même.
- La vitrinite, fortement présente dans les charbons, donne un comportement plastique de la lignite aux bitumineux.
- L'exinite est un macéral qui présente un phénomène de bulles sur une gamme de rang plus large que la vitrinite.
- L'inertinite est peu affectée par cette phase quel que soit son rang.

La figure 1.11^[48] montre l'effet de la température, du rang et la composition macérale sur la fluidification et certains changements morphologiques du résidu carboné.

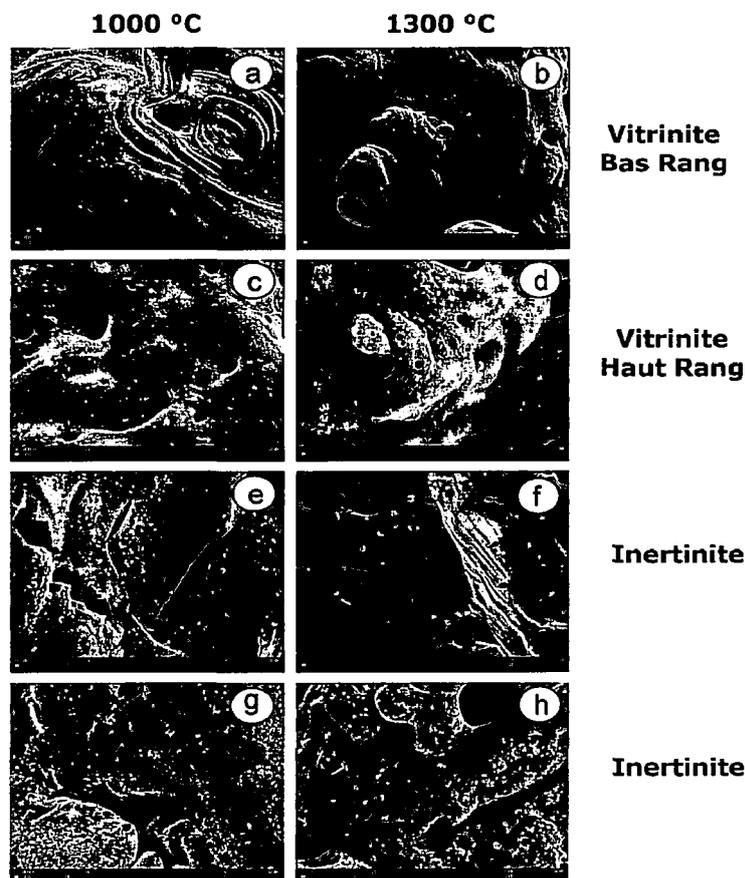


FIGURE 1.11 – Effet de la température, des macéraux et du rang sur les transformations du métaplaste

Pour la figure 1.11, sur la colonne de gauche la température est de 1000 °C, sur la colonne de droite, est de 1300 °C. La première ligne présente une vitrinite de bas rang, la seconde ligne présente une vitrinite d'un rang plus élevé. Les troisième et quatrième lignes présentent des inertinites. On observe nettement la formation de porosité pour laisser passer les matières

volatiles et dans les cas (e) et (f) des craquelures qui montrent un comportement fragile.

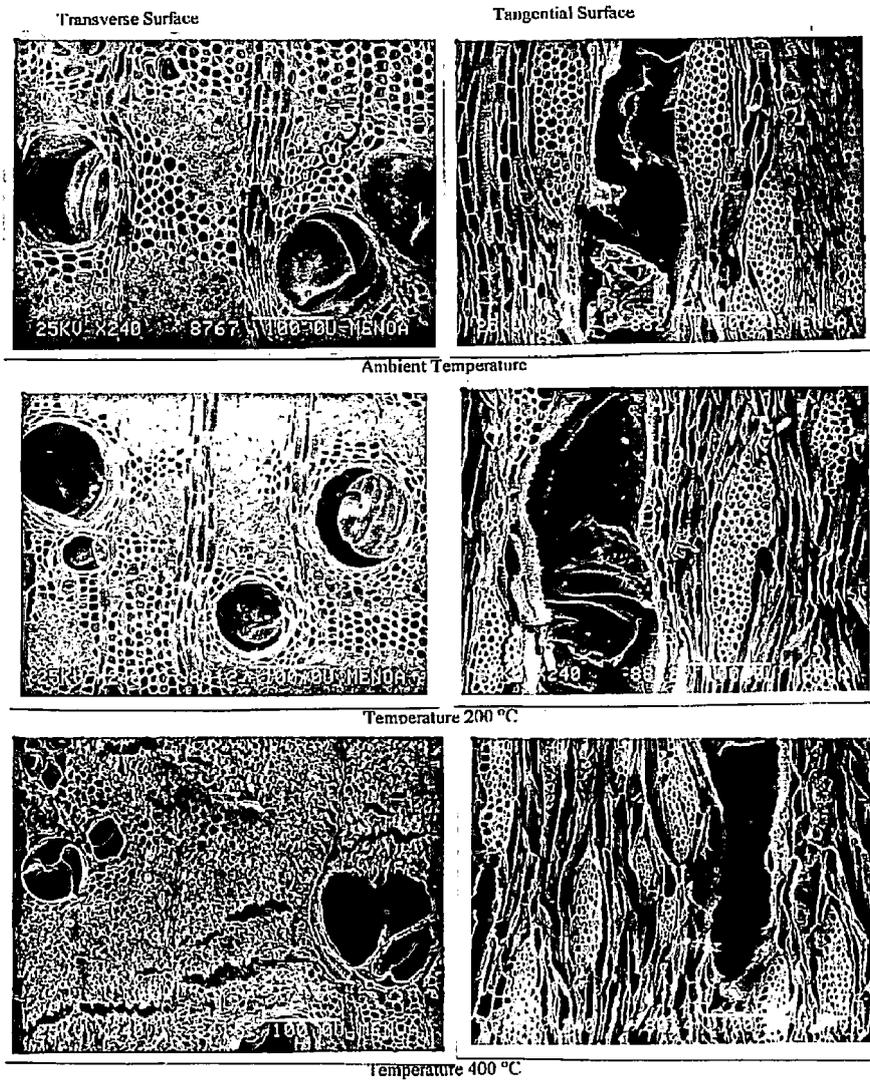


FIGURE 1.12 – Pyrolyse de bois

Les travaux sur les transformations des particules de biomasse sont moins bien étudiés, cependant on peut voir dans l'exemple présenté sur la figure 1.12 des particules de bois (*Prosopis Nigra*) qui sont observées au microscope à balayage, à température ambiante en haut, après pyrolyse à 200 °C au milieu et à 400 °C en bas^[15]. Cet exemple à basse température montre un craquellement de la particule à 400 °C. Dans un autre travail l'oxydation incomplète de coquilles de noisette à 700 °C et à 1000 °C^[67], fait apparaître une porosité sphéroïde mais la forme de la particule est globalement conservée. On peut donc supposer le résidu carboné de la biomasse moins poreux que des particules de vitrinite ou d'exinite des lignites et charbons, mais plus poreux que les particules d'inertinite et d'anthracite, puisque la biomasse possède une quantité très importante de matières volatiles.

Quantité et composition des matières volatiles en fonction du rang et de la composition macérale

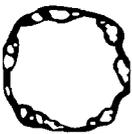
La phase de dévolatilisation est le processus de décomposition thermique qui permet la libération d'une phase gazeuse de la particule. Elle est variable en fonction de la vitesse de chauffe, de la température maximum, du rang et de la composition macérale et du diamètre des particules. Les hydrocarbures formés sont généralement classés en deux catégories : les goudrons qui se condensent à température ambiante et les matières volatiles légères. La biomasse donne une quantité très importante de matières volatiles. Ces matières volatiles contiennent une quantité importante d'eau, de dioxyde de carbone, de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures légers et de dihydrogène. Pour le charbon, avec le rang augmentant jusqu'aux bitumineux, les quantités de matières volatiles diminuent, les quantités d'eau, de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone diminuent tandis que les quantités d'hydrocarbures lourds augmentent. De la biomasse jusqu'aux bitumineux, on observe, avec l'augmentation du rang, une quantité croissante de goudrons et de composés aromatiques. Les anthracites ne contiennent plus que de très faibles quantités de matières volatiles sous forme de matières volatiles légères.

En fonction du rang, la forme sous laquelle l'azote est relâché diffère. Pour la biomasse et les charbons de bas rang, on observe principalement un relâchement sous la forme de NH_3 , tandis qu'avec le rang croissant dans les bitumineux, l'azote inclus dans des cycles pyridiniques et pyrroliques est de plus en plus relâché sous la forme de HCN ^[52]. Les inertinites relâchent des quantités plus faibles de matières volatiles tandis que les exinites relâchent de très fortes quantités de matières volatiles sous forme de composés lourds. La température de dévolatilisation augmente avec le rang. La vitesse de dévolatilisation diminue avec le rang.

1.2.2 Combustion du résidu carboné

Lors de la dévolatilisation, la particule de charbon subit des transformations morphologiques qui vont lui donner une porosité particulière^[40]. Cette porosité va contrôler la vitesse d'accès de l'oxygène dans le résidu carboné^[46]. Le tableau 1.1 donne une classification (Bailey, Benfell et al.) de la morphologie du résidu carboné^[42].

TABLE 1.1 – Classification du résidu carboné

Type de résidu carboné	Groupe I	Groupe II	Groupe III
			
Sous-types	Cénosphère, Tenuinetwork	Crassisphère, Crassinetwork, Mésosphère	Inertoid, fusinoid
Forme	Sphérique	De sphérique à irrégulier	Rectangulaire ou irrégulier
Porosité	>80%	>50%	~50%
Epaisseur de la paroi	<5 μm	Variable	>5 μm

La combustion du résidu carboné se fait par oxydation du carbone à la surface du matériau. La réactivité du résidu carboné est liée à la température, à la présence de minéraux à la surface capable de catalyser les réactions; et surtout à la capacité de l'oxygène d'accéder au résidu carboné. La diffusion de l'oxygène se fait en fonction de la température et de la porosité du

résidu carboné. Avec une température croissante, la réactivité augmente plus que la diffusion. La diffusion de l'oxygène se fait donc de plus en plus insuffisante au fur et à mesure que la température augmente, en d'autres mots :

1. Lorsque la température est basse, la diffusion de l'oxygène est suffisante pour que la combustion se fasse dans tout le système de pores. La particule brûle donc avec un diamètre constant et une densité décroissante (I de la figure 1.13).
2. Lorsque la température augmente, la diffusion devient insuffisante; l'oxygène pénètre de moins en moins loin dans la particule. La combustion devient alors plus importante en surface qu'au centre. La combustion ne se fait plus à diamètre constant (II de la figure 1.13).
3. A une température encore plus élevée la combustion ne se fait pratiquement plus que sur la surface; on observe alors une combustion à densité constante et à diamètre décroissant (III de la figure 1.13).
4. Si la température est particulièrement élevée, alors l'enveloppe de gaz de combustion devient trop épaisse; la diffusion de l'oxygène ne peut plus se faire vers la surface de la particule. Le CO_2 devient le pourvoyeur d'oxygène, il s'adsorbe sur la surface de la particule : un atome d'oxygène reste lié à un atome de carbone pour donner $2 CO$. Les deux molécules de monoxyde de carbone diffuseront alors jusqu'à l'oxygène pour former du gaz carbonique. Un autre mécanisme d'oxydation connu pour la combustion en surface à température très élevée est l'adsorption de H_2O en surface pour donner H_2 et CO (III de la figure 1.13)^[8].

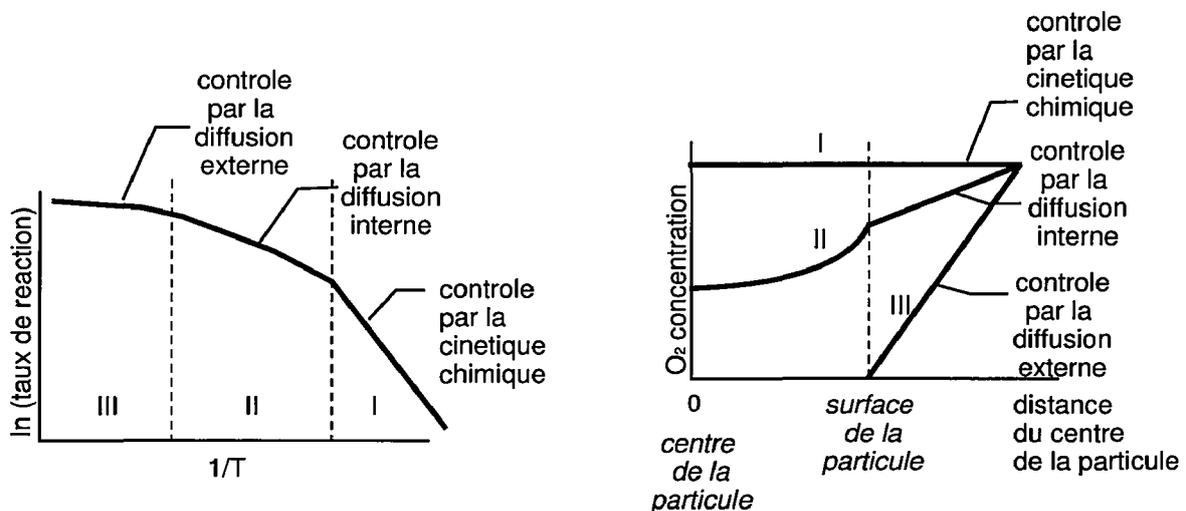


FIGURE 1.13 – Oxydation du résidu carboné en fonction de l'inverse de la température

La combustion du résidu carboné va varier en fonction de la structure de sa porosité. Par exemple : les cénosphères brûleront forcément mieux que les résidus carbonés denses car l'accès de l'oxygène à la matière carbonée est beaucoup plus simple. On observe que la teneur en inertite augmente la quantité d'imbrûlés d'un charbon. La porosité du résidu carboné est due à sa structure, et donc liée aux conditions de dévolatilisation de la particule, à son rang et à sa composition macérale. Pour la biomasse, la cellulose donne une meilleure combustion du résidu

carboné que la lignite^[58]. La réactivité du matériel du résidu carboné de la biomasse est plus importante que celle des charbons^[47], cependant une plus grande compacité et une taille plus importante donnent souvent une combustion plus lente du résidu carboné.

1.2.3 Suies

Dans le cas du charbon, les mécanismes de formation des suies sont relativement peu connus. Ces mécanismes sont mieux connus pour d'autres combustibles. Pour les flammes gaz, on considère l'acétylène comme précurseur d'éléments aromatiques qui se combinent pour donner des suies. Dans le cas du charbon, on est en présence de composés aromatiques lourds dès la dévolatilisation, il est donc supposé que le mécanisme peut commencer à partir de ces composés aromatiques dévolatilisés^[71].

La figure 1.14 montre un mécanisme classique pour le gaz de formation de suies^[31], pour le charbon le mécanisme peut commencer à partir des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP/PAH). On observe des dépôts de suie sur les résidus carbonés^[38].

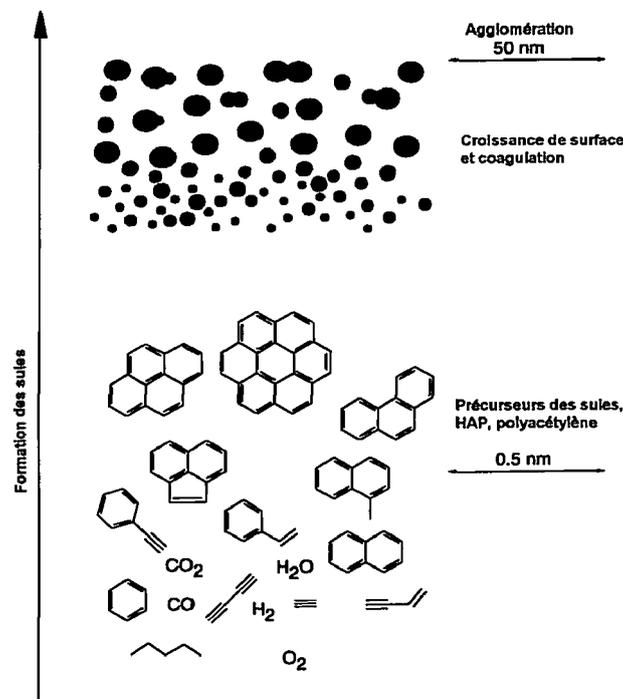


FIGURE 1.14 – Mécanisme de formation des suies

1.2.4 Formation des cendres

Les cendres viennent des matières minérales qui brûlent avec le charbon. Leur morphologie est liée à celle du métaplast. L'argile incluse dans une particule de charbon va, généralement, suivre la fusion de la particule. Elle va donner un verre aluminosiliceux, dont la structure dépendra, pour la plupart des cas, de la structure du résidu carboné. La gamme de températures de fusion des argiles est entre 900 °C et 1800 °C^[26]. On observe ainsi sur la figure 1.15, à gauche en haut, une plérosphère, qui possède une structure à plusieurs bulles, avec des inclusions de cendres plus petites de type ferrosphère (oxydes de fer) ou composées de mullite. On retrouve aussi des argiles

sous forme de particules céramiques exclusives submicroniques pleines. Des cénosphères, qui sont des sphères creuses, sur lesquelles on trouve des dépôts variés. On observe des phénomènes de condensation ou de cristallisation sur les surfaces, intérieures et extérieures des cendres.

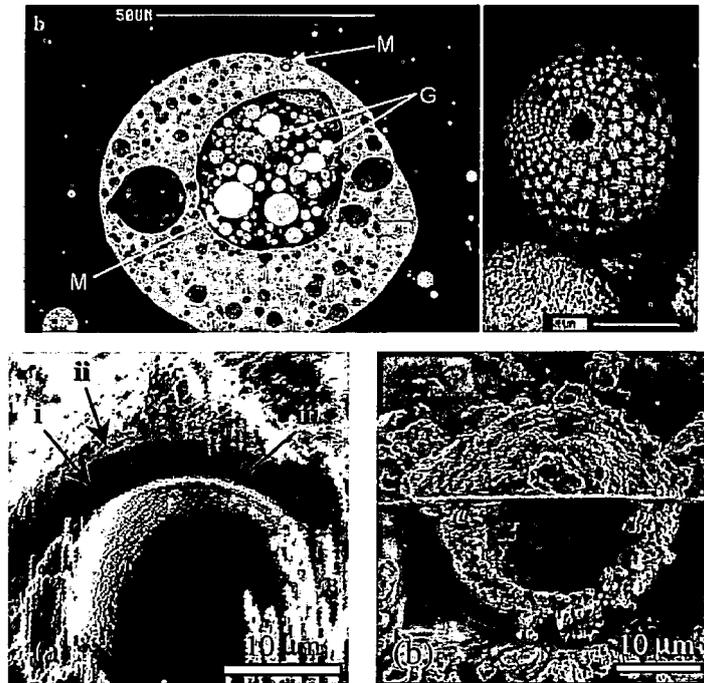


FIGURE 1.15 – Exemples de cendres fondues

En haut à gauche : plérosphère avec des inclusions de mullite (G) et de ferrosphères (hematite/magnetite) (M)^[26]

En haut à droite : cristallisation d'oxydes de fer en surface d'une cénosphère^[7]

En bas : dépôts sur une cénosphère (-i : paroi principale riche en Na, -ii : dépôt externe riche en Ca, -iii : surface interne riche en Al, Si)^[69]

1.2.5 Pollutions liées à la combustion du charbon

Cendres

Les cendres volantes sont les cendres suffisamment légères pour être emportées par les fumées dans l'atmosphère. Les cendres présentent des phénomènes d'enrichissement en métaux lourds et en éléments radioactifs. Les cendres fines présentent des dangers pour l'organisme car ces particules ont la capacité de pénétrer profondément dans les alvéoles pulmonaires. Sur les installations de combustion, il est généralement utilisé des électrofiltres ou des filtres à manche pour capturer ces cendres.

Oxydes d'azote

La dénomination des oxydes d'azote (NO_x) regroupe plusieurs molécules :

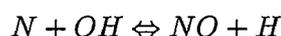
- Le monoxyde d'azote (NO) qui est une molécule toxique et qui contribue à la formation d'ozone troposphérique, également toxique.

- Le dioxyde d'azote (NO_2) est un gaz à effet de serre notable.
- Le protoxyde d'azote (N_2O) n'a pas d'impact notable dans la troposphère

Lors des mesures en foyer, on prend en général en compte NO et NO_2 et on néglige N_2O .

On définit trois grandes voies de formation des oxydes d'azote dans les flammes : NO-précoce, NO-thermique, NO-combustible :

- Le NO-précoce est défini comme la proportion de monoxyde d'azote formé à partir de l'azote atmosphérique dans le front de flamme par la réaction avec les radicaux qui fournissent une énergie suffisante pour rompre la triple liaison ; ce mécanisme passe par HCN comme intermédiaire. Il est mineur dans le cas de la combustion du charbon^[30].
- Le NO-thermique est le monoxyde d'azote créé par l'oxydation de l'azote sous l'effet d'une chaleur importante. Il est proportionnel à la température. Il est en général considéré comme représentatif de 20-30% des émissions de NO_x dans le cas du charbon pulvérisé. Il est couramment décrit par le mécanisme de Zeldovitch avancé^[30] :



- Le NO-combustible représente la principale source de monoxyde d'azote lors de la combustion du charbon pulvérisé (70-80%). Le NO-combustible est le monoxyde d'azote formé à partir de l'azote contenu dans le combustible. Une partie de l'azote venant du combustible quitte la particule de charbon pendant la dévolatilisation (NO-volatil) ; l'autre partie reste dans le résidu carboné et est oxydé lors de la combustion en surface (Char-NO). L'azote relâché avec la matière volatile est beaucoup plus réactif pour la formation et la réduction de NO que l'azote lié au char.

Il est possible de réduire dans les fumées les NO_x formés (Méthodes secondaires de réduction). On peut créer aussi des mécanismes de réduction dans la flamme en jouant sur les débits d'injection (Méthodes primaires de réduction). Une bonne connaissance de la proportion d'azote relâché avec la matière volatile est nécessaire pour modéliser correctement cette réduction.

NO-Volatil

Lors de la dévolatilisation des charbons bitumineux, l'azote est relâché dans les goudrons sous forme de pyridines et de pyrroles. La décomposition de ces composés cycliques (1300 K pour les pyrroles et 1500 K pour les pyridines^[52]) va donner principalement HCN puis NH_3 ^[61], pour finir par donner NO ou N_2 ^[29]. Pour les charbons de bas rang l'azote va être relâché dans des composés aliphatiques pour donner directement NH_3 .

Char-NO

Lors de la combustion du résidu carboné, l'azote lié au carbone peut s'oxyder et former NO , il peut aussi réagir avec NO pour le réduire et donner N_2 ^[29]. La réactivité de ces réactions est liée à la surface d'adsorption disponible et à la présence de minéraux sur la surface du charbon.

Réduction des oxydes d'azote

Le monoxyde d'azote dans un milieu réducteur se trouve privé d'oxygène ce qui empêche la conversion des NH_i en NO ; de plus la présence de radicaux CH_i permet la transformation de NO en HCN . N_2 est un composé plus stable que NO . N_2 forme donc un puits ; la répétition des

cycles est donc favorable à la réduction de NO . De plus, NO est réduit à la surface du résidu carboné.

Plusieurs techniques de réduction primaire des NO_x , telles que la surcombustion réductrice ou l'étagement de l'air, sont basées sur le principe de créer localement une zone réductrice. La figure 1.16^[29] résume les chemins de formation et de réduction des oxydes d'azote.

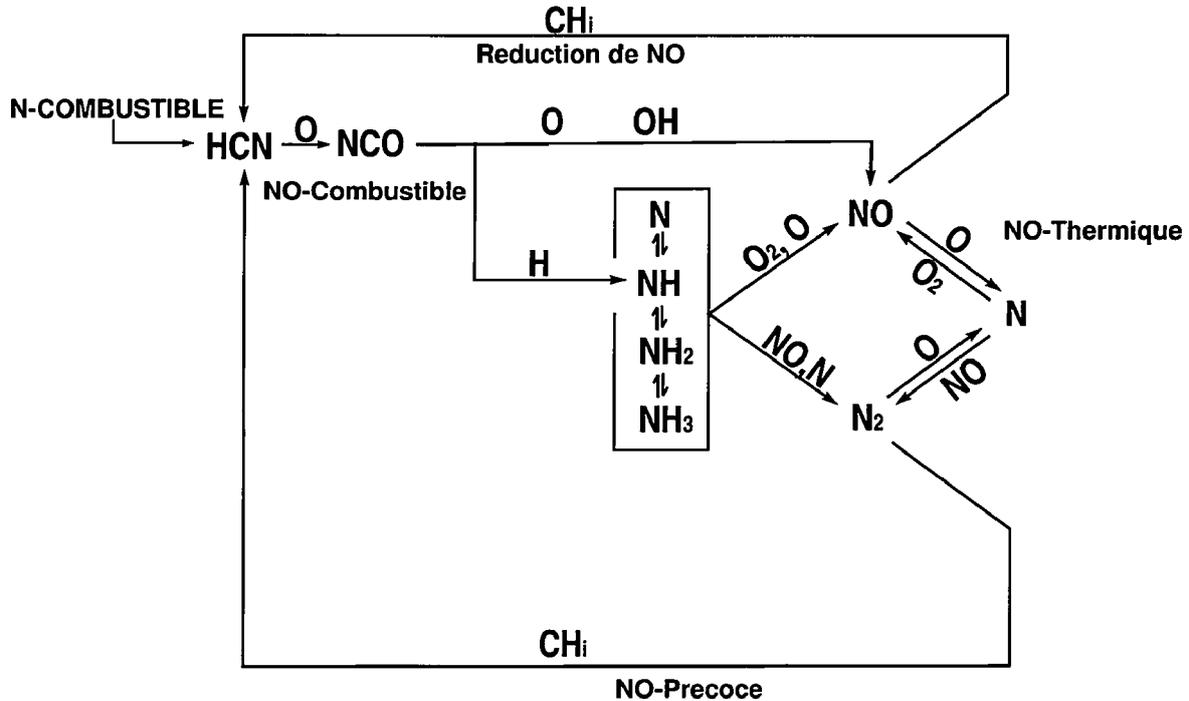


FIGURE 1.16 – Schéma résumé de la formation et destruction des oxydes d'azote

Oxydes de soufre

Le soufre est présent dans le charbon, soit sous forme organique, soit sous forme minérale généralement sous forme de pyrite. Sous forme de pyrite la décomposition est très rapide et mène à une formation atomique de S et Fe . Sous forme organique la décomposition est plus lente. Les deux sources mènent à la formation de SO_2 et SO_3 .

Dioxyde de Carbone

Il existe actuellement une augmentation de température anthropogène corrélée à l'utilisation des combustibles fossiles. L'effet de serre lié à l'augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique en est considéré comme la principale cause. Une partie du CO_2 atmosphérique est dissous dans l'océan et contribue à son acidification.

1.2.6 Cocombustion charbon/biomasse

Avantages

L'utilisation de biomasse en cocombustion avec du charbon présente les avantages suivants :

– Effet de serre

La biomasse est considérée comme neutre du point de vue du CO_2 , l'ajout de biomasse dans les centrales à charbon permet de réduire le bilan CO_2 de ces centrales. L'utilisation de biomasse en cocombustion est subventionnée dans certains pays. De plus, la combustion de la biomasse évite sa décomposition qui relache du méthane, gaz possédant un impact plus important à court terme en tant que gaz à effet de serre.

– Réduction des émissions polluantes

La biomasse inclut moins de soufre et d'azote ; mécaniquement les émissions polluantes en sont réduites. Il a aussi été observé dans certains cas, des effets synergiques au niveau des émissions des NO_x et de SO_x . Les émissions polluantes résultantes étaient inférieures à la moyenne des émissions polluantes de chacun des combustibles^{[3][50]}.

Problèmes techniques

La biomasse est un combustible proche du charbon ce qui permet une utilisation comme combustible pulvérisé, cependant il existe des différences qui posent des problèmes techniques.

– Ressources

Il existe différentes ressources de biomasse utilisables actuellement :

– Bois énergie

– Cultures énergétiques dédiées

– Co-produits agricoles ou agro-industriels

Ces ressources sont globalement limitées et/ou nécessitent une surface importante. Le passage de l'utilisation de la biomasse au charbon pendant la révolution industrielle s'est faite pour une question de quantité. On ne peut donc pas compter sur ces ressources pour couvrir l'ensemble des besoins énergétiques.

– Broyage

La présence de lignine et d'humidité rend la biomasse particulièrement difficile à broyer ; ce qui donne aux particules de biomasse une granulométrie supérieure à celle du charbon et diminue la qualité de la combustion. Généralement, les broyeurs à charbon ne peuvent pas broyer directement la biomasse, ce qui implique des méthodes spécifiques d'injection de la biomasse avec un broyage différencié puis une injection avant le brûleur ou encore avec des brûleurs spécifiques pour la biomasse.

– Cendres

La quantité d'alcalin supérieure à celle du charbon rend les cendres plus fusibles. Elles sont plus facilement collantes, s'agglomèrent sur différentes surfaces des chaudières. Celles qui se fixent sur les échangeurs thermiques réduisent la récupération de chaleur. Une forte accumulation de cendres peut créer des agglomérats massifs susceptibles de tomber et d'endommager la chaudière. La présence d'alcalin au niveau des systèmes catalytiques de traitement des fumées peut neutraliser les catalyseurs rendant l'efficacité de ces systèmes de dépollution nulle. De plus, si la biomasse possède une teneur en chlore importante, elle rend les cendres plus acides ce qui provoque de la corrosion^[13].

1.3 Modélisation numérique de la combustion turbulente des solides pulvérisés

La partie modélisation numérique a été faite en utilisant le logiciel Fluent 6.3, qui utilise la méthode des volumes finis. Cette méthode est basée sur la résolution d'équations de conservation (1.1) dans un espace discrétisé Eulerien. Dans un volume V , la variation temporelle d'une grandeur ϕ est calculée comme la somme du flux au travers du volume et de la création/destruction de cette grandeur dans ce volume^[25]. Le flux est divisé en deux termes, un convectif, un autre diffusif^[56], D représente un coefficient de diffusion et S_ϕ un terme source de ϕ quelconque, comme par exemple les matières volatiles dégagées par les particules.

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot dA = \oint D \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (1.1)$$

Les grandeurs sont stockées au centre des cellules du maillage ; les valeurs sont calculées aux faces par interpolation, la méthode utilisée dans les calculs est un schéma amont premier ordre. C'est une méthode stable mais qui crée de la diffusion numérique ; la diffusion est amplifiée quand l'écoulement n'est pas perpendiculaire aux faces des cellules.

1.3.1 Mécanique des fluides

Les équations de conservation utilisées en mécanique des fluides sont appelées équations de Navier Stokes. Ce sont les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Équation de conservation de la masse et équation de continuité (conservation de la quantité de mouvement)

Les deux premières équations utilisées sont les équations de conservation de la masse (1.2) et de conservation de la quantité de mouvement (1.3) aussi appelée équation de continuité. L'équation de conservation de la masse prend en compte $\phi=1$ pour travailler sur la densité.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1.2)$$

L'équation de conservation de la quantité moment prend en compte la vitesse pour ϕ . Le gradient de pression et le poids sont des termes source.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \vec{\nabla} \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (1.3)$$

avec $\bar{\tau}$ tenseur des contraintes visqueuses défini comme :

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \vec{\nabla} \cdot \vec{v} I \right] \quad (1.4)$$

Turbulence

La turbulence désigne l'état d'un fluide dans lequel la vitesse présente un caractère tourbillonnaire en tout point. On peut caractériser la turbulence d'un écoulement par un nombre de Reynolds qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{U.L}{\nu} \quad (1.5)$$

Avec U vitesse de l'écoulement et L longueur caractéristique.

Moyenne de Reynolds et moyenne de Favre

En général, le maillage utilisé n'est pas suffisamment fin pour capter toutes les échelles de la turbulence. On effectue alors une moyenne statistique nommée moyenne de Reynolds, qui divise les grandeurs en une valeur moyenne et ses fluctuations, présentée ci dessous :

Moyenne de Reynolds

$$\begin{aligned} \phi &= \bar{\phi} + \phi' \\ \bar{\phi}' &= 0 \end{aligned} \quad (1.6)$$

Les équations moyennées sont appelées « Reynolds Averaged Navier Stokes » ou RANS. La moyenne de Reynolds est équivalente à une moyenne en temps. On ne peut donc comparer avec des résultats expérimentaux que si ils intègrent un intervalle de temps suffisant. Pour les écoulements à densité variable, on utilise une moyenne en masse nommée moyenne de Favre. Cette moyenne ne correspond pas à une moyenne physique. Elle tend à dilater le front de flamme [65].

Moyenne de Favre

$$\begin{aligned} \phi &= \tilde{\phi} + \phi'' \\ \tilde{\phi} &= \frac{\rho\phi}{\bar{\rho}} \\ \overline{\rho\phi''} &= 0 \end{aligned} \quad (1.7)$$

L'équation de conservation de la masse devient :

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = S_m \quad (1.8)$$

L'équation de continuité devient :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\rho u_i'' u_j''} \right) + S_n \quad (1.9)$$

Le terme $\overline{\rho u_i'' u_j''}$ forme le tenseur de Reynolds et fait apparaître 6 termes supplémentaires. Pour fermer le système d'équations, on peut utiliser différentes techniques afin de représenter le tenseur de Reynolds. Une technique couramment utilisée est l'utilisation du modèle $k - \varepsilon$ qui rajoute deux équations de conservation pour la turbulence, une pour k la production de la turbulence, une pour ε , la dissipation de la turbulence. Un modèle plus complet, le Reynolds Stress Model (RSM) ajoute 6 équations ce qui permet de saisir l'anisotropie de la turbulence. La viscosité est variable en fonction de la température. Elle est calculée en fonction de la loi de Sutherland :

$$\frac{\mu(T)}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (1.10)$$

μ_0 est la viscosité dynamique à la température de référence T_0 et S la constante de Sutherland

1.3.2 Chimie et énergie

La flamme issue des matières volatiles du charbon pulvérisée est considérée comme une flamme de diffusion turbulente. Le temps de réaction chimique est considéré comme très rapide en raison de la forte température. La combustion se fait dès qu'il y a mélange pour la plupart des espèces. Afin de simplifier le calcul on utilise une fraction de mélange^[17]. La fraction de mélange f représente la fraction de masse du combustible, elle est définie de la façon suivante :

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (1.11)$$

avec Z_i : fraction massique élémentaire de l'élément i , $Z_{i,ox}$ fraction massique élémentaire de l'élément i dans l'oxydant, $Z_{i,fuel}$ fraction massique élémentaire de l'élément i dans le combustible

On résout une équation de transport pour \tilde{f} et pour sa variance $\tilde{f'^2}$ définie comme $\tilde{f'^2} = \overline{(f - \tilde{f})^2}$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{f}) + \nabla \cdot (\rho\tilde{v}\tilde{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \tilde{f} \right) + S_f \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho\tilde{v}\tilde{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \tilde{f'^2} \right) + C_g\mu_t(\nabla \tilde{f})^2 - C_d\rho\frac{\epsilon}{k}\tilde{f'^2} \quad (1.13)$$

Avec $C_g = 2$; $C_d = 2,86$, $\sigma_{t\tilde{f}} = 0,85$ d'après W.P. Jones et J.H. Whitelaw^[73]. Pour calculer une grandeur ϕ dépendante de f on utilise une équation de la forme :

$$\tilde{\phi}_i = \int_0^1 p(f, \tilde{H})\phi_i(f, \tilde{H})df \quad (1.14)$$

On utilise la fonction densité de probabilité (« pdf ») $p(f, \tilde{H})$ afin de représenter les fluctuations de f dans un écoulement turbulent. La fonction utilisée est une fonction bêta définie par :

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}df} \quad (1.15)$$

avec

$$\alpha = \tilde{f} \left[\frac{\tilde{f}(1-\tilde{f})}{\tilde{f'^2}} - 1 \right] \quad (1.16)$$

et

$$\beta = (1-\tilde{f}) \left[\frac{\tilde{f}(1-\tilde{f})}{\tilde{f'^2}} - 1 \right] \quad (1.17)$$

L'intégration du modèle de chimie dans la « pdf » permet la création d'une table, qui sera appelée par le code de calcul.

La « pdf » permet différentes méthodes pour calculer la chimie, le *mixt-is-burnt* (réaction immédiate irréversible des réactifs mis en présence), l'équilibre chimique (minimisation de l'énergie libre de Gibbs), les flammelettes stationnaires ou instationnaires^[33]. La méthode de l'équilibre chimique permet de représenter une chimie plus complexe que le *mixt-is-burnt*, en particulier l'obtention de radicaux nécessaires pour le calcul des NO_x . Les flammelettes stationnaires utilisent une cinétique couplée à l'étirement de la flamme pour précalculer des flammes à l'équilibre, cependant l'étirement de la flamme dans les cas étudiés est de faible impact sur la chimie. Les flammelettes instationnaires ajoutent une variable de progression qui permet l'inclusion d'une

chimie lente et évite la réversibilité. L'ajout de la variable de progression dans Fluent se fait par le calcul d'un maillage Lagrangien.

L'équation de l'énergie se calcule par l'enthalpie \tilde{H} sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{H}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}u_j\tilde{H}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{k_t}{c_p}\frac{\partial\tilde{H}}{\partial x_j}\right) + S_H \quad (1.18)$$

\tilde{H} est calculé par la minimisation de l'énergie libre de Gibbs (Méthode de l'équilibre chimique) par l'intermédiaire d'une table qui donne l'enthalpie du système et les fractions molaires des différentes espèces en fonction de \tilde{f} et \tilde{f}'^2 .

1.3.3 Injection et granulométrie des particules

Les particules de charbon sont injectées dans le système. Un nombre de particules virtuelles égal au nombre de cellules de la face d'injection est introduite et évolue ensuite par le biais d'un calcul Lagrangien. Chaque particule virtuelle représente donc un ensemble de particules de charbon. Le nombre de particules virtuelles doit être suffisamment grand pour pouvoir être réaliste. Cette méthode ne considère pas le volume des particules et n'est applicable que pour des fraction volumique de solide faible (de l'ordre du %) face à la fraction volumique de fluide entraînant. Le charbon pulvérisé entre dans cette gamme de fraction volumique. La granulométrie est prise en compte suivant une distribution des diamètres de Rosin-Rammler. La loi de traînée est prévue pour des sphères ou des ellipsoïdes.

Il est possible que les particules de charbon dans le flux entraînant aient un écoulement préférentiel. On caractérise ce comportement à partir du nombre de Stokes.

$$St = \frac{\rho d_p^2 U}{18\mu L} \quad (1.19)$$

Le nombre de Stokes est un nombre adimensionnel qui représente le ratio entre le temps cinétique des particules et le temps caractéristique de modification de vitesse de la phase porteuse [9]. Pour un nombre de Stokes très inférieur à 1, les particules agissent comme traceur de l'écoulement, elles se déplacent simultanément avec le fluide. Pour un nombre de Stokes très supérieur à 1, l'inertie des particules domine. Les particules traversent les tourbillons. En absence d'un champ de gravité, les particules se retrouveraient réparties de façon homogène dans l'écoulement.

1.3.4 Dévolatilisation

Composition des matières volatiles

La composition des matières volatiles peut être mesurée, il est cependant difficile de mesurer précisément toute l'étendue des matières volatiles créés lors de la pyrolyse. Il existe des logiciels capables de calculer une composition et une cinétique des matières volatiles en fonction d'une analyse élémentaire (FlashChain, FG-DVC « Functional Group - Depolymerisation Vaporisation and Cross-Linking »)[55][66][64], développés pour le charbon, il en existe une version pour la biomasse[57].

Cinétique de dévolatilisation

Le logiciel Fluent offre trois possibilités de calcul de la cinétique de dévolatilisation.

- une méthode de dévolatilisation constante.
- une méthode de dévolatilisation à une cinétique^[62].

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}] \quad (1.20)$$

Avec $k = Ae^{-(E/RT)}$

- une méthode de dévolatilisation à deux cinétiques^[32].

$$\frac{m_v(t)}{(1 - f_{w,0})m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) e^{-(\int_0^t (k_1 + k_2) dt)} dt \quad (1.21)$$

Avec $k_1 = A_1 e^{-(E_1/RT)}$ et $k_2 = A_2 e^{-(E_2/RT)}$.

1.3.5 Combustion en phase hétérogène

La variation de masse de la particule du résidu carboné est calculée de la façon suivante^[49] :

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{ox} T_\infty \rho}{S_b (T_p + T_\infty)} \quad (1.22)$$

Le diamètre de la particule varie en fonction du gonflement. $D_{i,m}$ est le coefficient de diffusion de l'oxydant à la surface. La cinétique de réaction de surface est ignorée, car la combustion du résidu carboné se fait dans des zones de forte température.

1.3.6 Radiations

Le modèle utilisé pour les radiations est le modèle des harmoniques sphériques d'ordre 1 (P-1). Il a été choisi pour sa simplicité, et donc son faible temps de calcul, ainsi que pour sa validité dans les milieux optiquement épais. Le calcul du coefficient d'absorption des gaz se fait par la méthode de la somme pondérée des gaz gris (WSGG *Weighted Sum of Gray Gases*).

1.3.7 Formation et oxydation des suies

Il existe deux modèles disponibles sous Fluent pour les suies. Ils utilisent une méthodes semi-empirique en un ou deux temps avec des constantes basées sur des flamme acétylènes. Ces deux méthodes sont difficilement applicables pour la modélisation des flammes charbon.

1.3.8 Oxydes d'azote

Les cinétiques des NO_x sont calculées en post-traitement. Il est calculé une équation de transport par espèce. La turbulence est prise en compte par l'intermédiaire d'une méthode par fonction de probabilité de présence

- Précoce :

Le calcul du NO précoce se fait de manière empirique avec une constante de richesse de flamme globale, ce modèle est inadapté aux flammes présentant des variations de richesse locales comme celles étudiées dans ce travail où une zone réductrice est crée au centre de la flamme.

- Thermique :

Les NO_x thermiques sont basés sur les équations de Zeldovitch, les constantes cinétiques utilisées sont celles de Hanson & Salimian^[59].

– Combustible :

L'azote du combustible est partagé entre N-Volatil et N-Char. N-Volatil est mis sous forme de HCN ou NH_3 ; ces deux espèces peuvent être oxydées ou réduites par NO ^[27]. N-char est relâché sous forme de HCN , qui sera réduit ou oxydé, ou directement sous forme de NO . NO est potentiellement réduit par le résidu carbonné^[44] en fonction de la surface accessible du résidu carbonné et d'une loi d'Arrhenius.

2

Mise en place expérimentale et obtention des conditions aux limites

Contents

2.1	Projet COSAMM	32
2.1.1	Définition	32
2.1.2	Objectifs	32
2.1.3	Répartition des rôles	32
2.2	Le four du CERCHAR	33
2.2.1	Description du four	33
2.2.2	Brûleur	34
2.2.3	Réglages du brûleur	35
2.2.4	Boucles de refroidissement	36
2.2.5	Cendriers	36
2.3	Instrumentation	37
2.3.1	Mesure de la vitesse des particules par sonde électromagnétique	37
2.3.2	Mesure de la granulométrie du combustible par réflexion laser	38
2.3.3	Système d'échantillonnage du charbon pulvérisé	39
2.3.4	Mesure de la température par imagerie deux couleurs et contrôle de la flamme	39
2.3.5	Système de mesure des températures et des espèces par sonde à aspiration	40
2.3.6	Comparaison des différentes zones de mesure des systèmes de température	41
2.4	Débits d'air et de charbon	41
2.4.1	Air tertiaire	42
2.4.2	Air secondaire	42
2.4.3	Air de transport et transport pneumatique du combustible pulvérisé	43
2.4.4	Les différents combustibles utilisés.	44
2.4.5	Les trois campagnes de mesure	47

Ce chapitre présente le cadre de travail : le projet COSAMM, le four d'essais, les différents instruments de mesure installés, les calculs faits pour les débits entrants, les différents combustibles utilisés et les trois campagnes de mesure.

2.1 Projet COSAMM

2.1.1 Définition

Le projet « Optimisation d'installations de combustion par systèmes de mesures avancés et modélisation » COSAMM est un programme Européen Franco-Britannique Interreg IIIA. L'objectif des projets Interreg est l'amélioration des collaborations scientifiques trans-frontalières européennes.

2.1.2 Objectifs

Le but principal est la validation de différents outils développés par l'université du Kent qui possède trois systèmes à valider :

- un système de mesure de la vitesse des particules,
- un système de mesure de la granulométrie,
- un système de contrôle de la flamme couplé à une mesure de température.

Ces outils sont développés pour une utilisation industrielle. Les mesures de validation sur le four pilote du CERCHAR, de taille semi-industrielle, constituent une étape intermédiaire avant un passage à une échelle industrielle. Le projet est réparti en quatre objectifs principaux :

- Caractériser et quantifier les écoulements de combustibles pulvérisés, par la mesure continue de la vitesse, du débit massique et de la distribution de taille des particules du combustible pulvérisé.
- Quantifier des caractéristiques des flammes issues de combustibles pulvérisés par l'analyse d'image (température, variation d'intensité lumineuse..., plus de détails en 2.3.4).
- Développer et valider des modèles numériques d'écoulements de combustibles pulvérisés et de flammes sous différentes conditions.
- Établir des recommandations pour l'optimisation des conditions de combustion à partir des mesures et modélisations sus-citées.

2.1.3 Répartition des rôles

Le projet COSAMM réunit trois équipes de travail. Une de Grande-Bretagne : l'université du Kent et deux françaises, le CORIA de l'université de Rouen et l'École des Mines de Douai. Les rôles sont répartis de la façon suivante :

- Université du Kent : Électronique et instrumentation
- CORIA (Université de Rouen) : Modélisation de l'écoulement des particules en amont du brûleur
- École des Mines de Douai : Coordination des essais, physique et modélisation de la flamme

Le centre de recherche du CERCHAR fournit une chaudière de taille semi-industrielle (3MW_{th}-Mazingarbe) pour mener trois séries de tests. De plus, il a fourni son savoir-faire, ses conseils et les mesures annexes. Son personnel est habitué au travail sur des chaudières industrielles.

De plus, Veolia Environnement a fourni la biomasse pour la troisième série de tests (Combustion biomasse/charbon). Du charbon de bois, fourni par la société Maguin, a également été testé en tant que combustible pulvérisé.

2.2 Le four du CERCHAR

2.2.1 Description du four

Le banc expérimental de combustion du charbon pulvérisé du CERCHAR est un foyer cylindrique horizontal, doté d'un brûleur bas NO_x , de puissance réglable jusqu'à $6 MW_{th}$ (Figure 2.1).

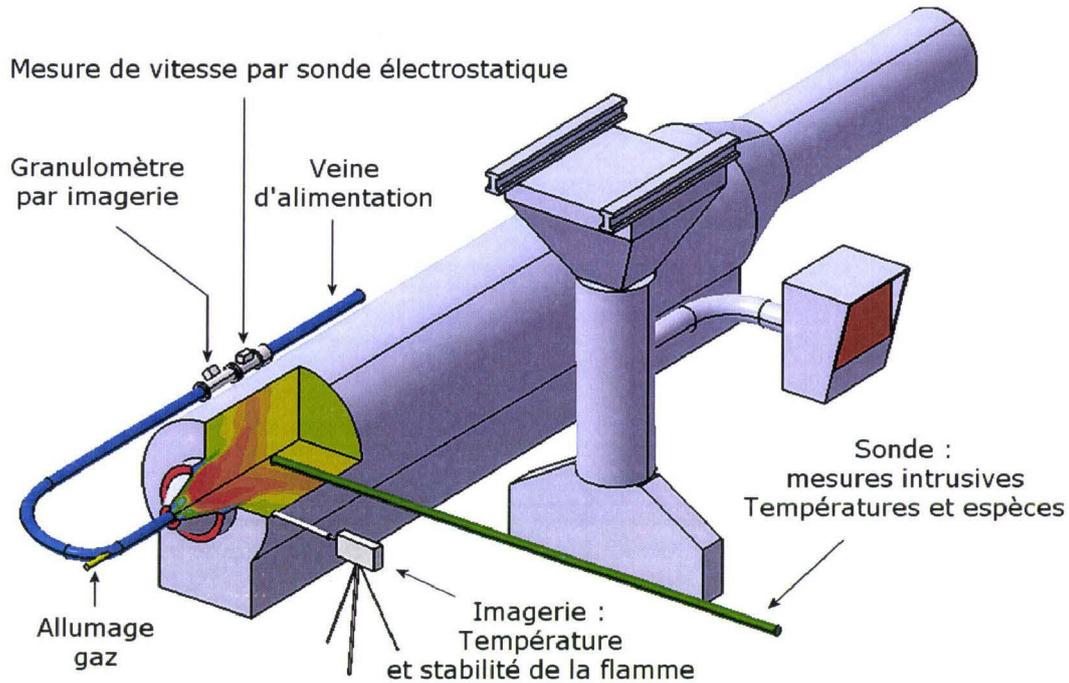


FIGURE 2.1 – Vue d'ensemble du four du CERCHAR

Le broyeur est alimenté en combustible par une vis. La vitesse de rotation de cette vis permet le contrôle du débit de charbon dans le broyeur. La vis a été étalonnée pour les combustibles suivants : charbon de La Loma, charbon de Freyming, charbon de Middelburg, mélanges de charbon (Middelburg)/biomasse (Pellets) à 5-10-15-20% massiques. Les mélanges de biomasse et de charbon ont été faits dans une bétonnière. Le broyeur à attrition pulvérise le combustible en particules d'une taille ayant un ordre de grandeur de la dizaine de microns. La granulométrie est variable en fonction du combustible. L'air ambiant est utilisé pour le transport du combustible, la quantité de charbon envoyé dans la veine d'injection est dépendante du débit d'air de transport (AIR I).

Sur la veine d'injection (en bleu sur la figure 2.1) sont placés deux instruments de mesure à tester dans le cadre du projet COSAMM : le système de mesure de vitesse des particules par capteur électromagnétique, suivi du granulomètre par imagerie. Un piquage sur la veine, suivant ces deux appareils, permet l'échantillonnage du charbon pulvérisé pour une mesure continue directe par Malvern, pour une mesure de granulométrie au tamis ou autre analyse.

Le combustible pulvérisé arrive au brûleur pour être injecté dans le foyer. Le foyer est entouré de boucles d'eau de refroidissement, le résidu carboné et les cendres peuvent tomber dans un cendrier positionné en dessous du foyer. La figure 2.2 présente une coupe verticale du foyer incluant le brûleur, les boucles de refroidissement et le cendrier.

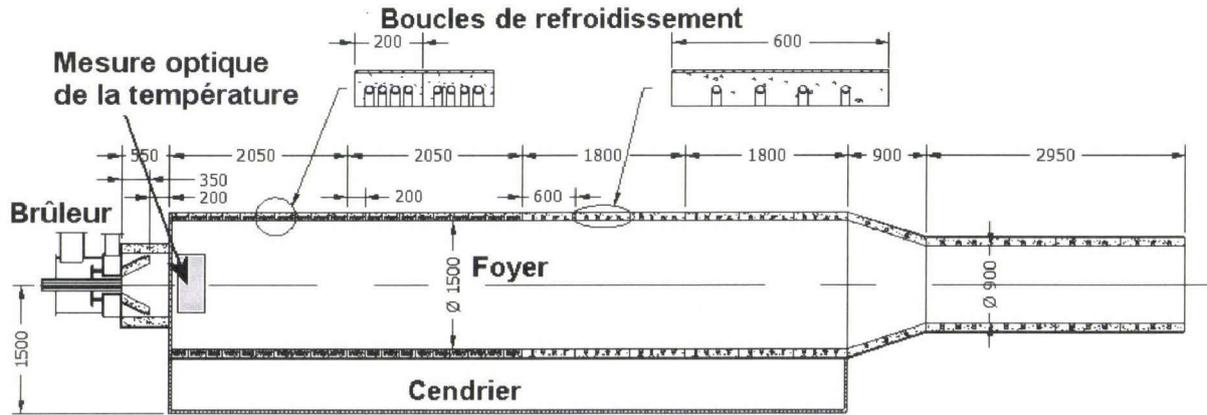


FIGURE 2.2 – Schéma du foyer avec le brûleur, les boucles de refroidissement, le cendrier, et la position de la camera du système d'imagerie de la flamme.

2.2.2 Brûleur

Le brûleur utilisé est un brûleur bas NO_x à swirl. Il est représenté sur la figure 2.3.

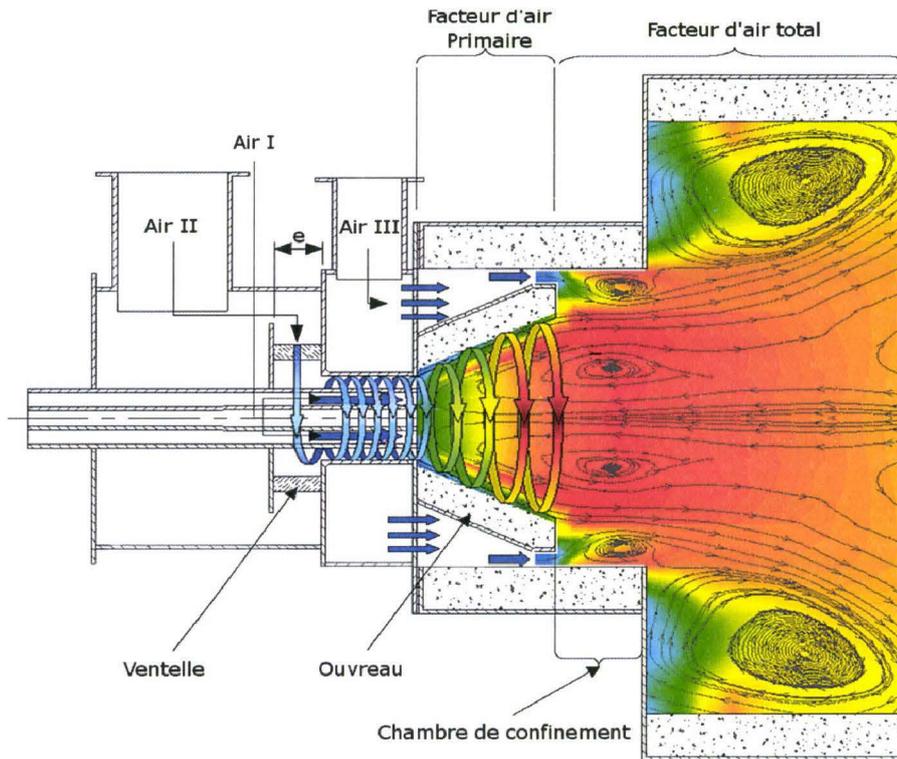


FIGURE 2.3 – Schéma de fonctionnement du brûleur bas- NO_x

Il est constitué de trois parties séparées. La première amène directement l'air de transport avec le charbon pulvérisé en provenance de la veine d'alimentation (Air I)(en bleu sur la figure 2.1). La seconde amène l'air secondaire (AIR II) (cercle rouge intérieur sur la figure 2.1), aussi appelé air de swirl. Cet air passe au travers de ventelles inclinées. La position de la plaque ventelle

définit la largeur de passage (e) (sur la figure 2.3) pour l'air secondaire. Par effet Venturi, la largeur de passage permet de contrôler la vitesse de l'air. Les ventelles créent une rotation de l'air, et la position de la plaque ventelle permet de contrôler l'intensité de cette rotation. En arrivant près de l'ouveau, l'air secondaire va entraîner l'air primaire et les particules de charbon près de l'ouveau constitué de béton réfractaire. Le béton réfractaire chauffé va permettre la dévolatilisation du charbon pulvérisé et le début de sa combustion. La quantité de chaleur emmagasinée dans le béton réfractaire de l'ouveau est un paramètre important pour la stabilité de la flamme. La quantité d'air primaire et secondaire introduite dans l'ouveau est insuffisante pour la combustion complète du charbon, l'air tertiaire est introduit pour finir la combustion. Le swirl crée une zone de recirculation interne qui ramène les gaz brûlés dans l'ouveau. Ce mécanisme a deux buts, le premier est de stabiliser la flamme ; le second est de créer une zone réductrice afin de réduire la quantité de NO_x . L'air tertiaire (Air III) (cercle rouge extérieur sur la figure 2.1) traverse une structure en nid d'abeille afin de réduire la turbulence puis est injecté dans la chambre de combustion afin d'atteindre une stœchiométrie globale oxydante et de finir la combustion.

Dans la suite de ce document le facteur d'air est défini comme le rapport entre la quantité d'air réelle et la quantité d'air théorique pour une combustion complète. Le facteur d'air primaire prend en compte l'air primaire (AIR I) plus l'air secondaire (AIR II), c'est le facteur d'air du début de la combustion. Le facteur d'air total prend en compte la somme des trois entrées d'air (AIR I, AIR II, AIR III).

Le facteur d'air primaire (λ_1) est défini comme :

$$\lambda_1 = \frac{\dot{m}_{AirI} + \dot{m}_{AirII}}{\dot{m}_{CP} \cdot V_a} \quad (2.1)$$

Le facteur d'air total (λ) est défini comme :

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{AirI} + \dot{m}_{AirII} + \dot{m}_{AirIII}}{\dot{m}_{CP} \cdot V_a} \quad (2.2)$$

Avec \dot{m}_X le débit massique de X et V_a le pouvoir comburivore (kg/kg)

2.2.3 Réglages du brûleur

Les paramètres normaux de fonctionnement du brûleur sont calculés en fonction du combustible, et en particulier, en fonction de sa vitesse de flamme afin d'éviter d'avoir un retour de flamme vers l'arrivée de charbon et d'air de transport qui déteriorerait le nez du brûleur. La vitesse de flamme est calculée à partir de fonctions définies expérimentalement par Kreisinger. Les courbes sont établies empiriquement en fonction de la quantité de cendre et de la quantité de matière volatile. Elle décrivent la vitesse de flamme en fonction de la stœchiométrie. Pour éviter un retour de flamme, le débit d'air secondaire doit être suffisant. La quantité de matière volatile et la quantité de cendre du combustible fixent donc le débit d'air secondaire minimum. Le transport d'air primaire est lié au débit de combustible. L'air tertiaire est débité en complément afin d'atteindre la stœchiométrie totale souhaitée.

Le swirl est défini comme le rapport de l'inertie de l'air injecté dans le sens de l'écoulement et celui injecté perpendiculairement à l'écoulement^[51]. Le CERCHAR a établi la loi suivante à partir d'une maquette froide :

$$SW = \frac{1,43 \times 0,0156}{\left[\left(\frac{\dot{m}_{AirI}}{\dot{m}_{AirII}} \right)^2 \frac{T_{AirI}}{T_{AirII}} \left(1 + \frac{\dot{m}_{CP}}{\dot{m}_{AirI}} \right) + 0,45 \right]} \times e \quad (2.3)$$

De plus, un système de chauffage de l'air secondaire et tertiaire permet une préchauffe de température variable de l'ordre de plusieurs centaines de degrés. Ce système est composé d'un brûleur gaz et d'un échangeur thermique. Ce système intègre une pièce disposant d'une inertie thermique importante qui engendre une difficulté de réglage précis de la température.

2.2.4 Boucles de refroidissement

Toute la longueur du four est refroidie par des boucles d'eau. Chaque boucle est munie d'un débitmètre à hélice et de deux thermocouples qui permettent de mesurer la température d'entrée et de sortie de l'eau des boucles. Après l'observation de résultats aberrants sur certaines boucles, les débits des débitmètres à hélice ont été validés par un débitmètre à ultrason. L'erreur a été attribuée aux thermocouples. Les mesures aberrantes de certains thermocouples ont été supprimées. Pour calculer les conditions aux limites, les boucles sans mesure valide ont été moyennées en fonction des boucles proches.

2.2.5 Cendriers

Sous le foyer se trouvent des cendriers qui sont séparés du foyer par les boucles de refroidissement ; ces boucles sont relativement resserrées à proximité du brûleur. Le problème majeur de ces cendriers est qu'ils accumulent les résidus carbonés incomplètement brûlés qui finissent leur combustion et apportent une énergie au système difficile à évaluer, même si des thermocouples permettent la mesure de température dans les cendriers.

2.3 Instrumentation

Les différents instruments de mesure sont présentés dans les paragraphes suivant. Les systèmes d'instrumentation du Kent ainsi que ceux du CERCHAR.

2.3.1 Mesure de la vitesse des particules par sonde électromagnétique

Le système de mesure de la vitesse des particules du Kent est basé sur la similitude du signal généré par les charges des particules de charbon entre deux points de la canalisation. Les particules de charbon se déplacent dans la canalisation et se chargent par frottement. En considérant que la position relative des particules de charbon ne change pas sur une petite distance, la charge électronique transportée par l'ensemble des particules de charbon est mesurée en deux points proches de la canalisation : amont et aval (Figure 2.4). Les deux signaux devraient être identiques dans le cas d'un mouvement d'ensemble de pure translation du charbon. Les deux signaux sont corrélés pour obtenir le temps mis par les particules pour aller de de l'électrode amont à l'électrode aval (Figure 2.5). Le coefficient de corrélation permet de valider l'hypothèse de mouvement régulier d'ensemble des particules.

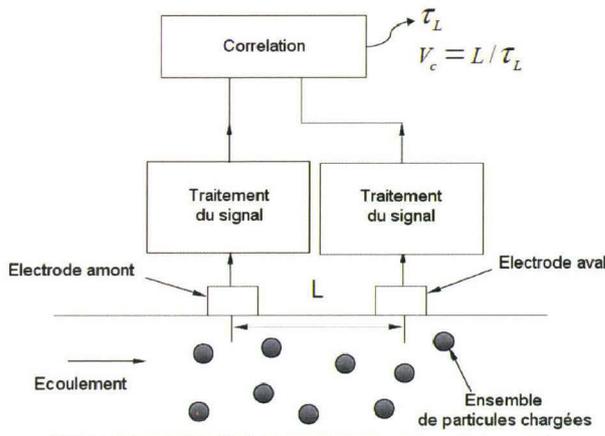


FIGURE 2.4 – Principe de fonctionnement du système de mesure de vitesse des particules.

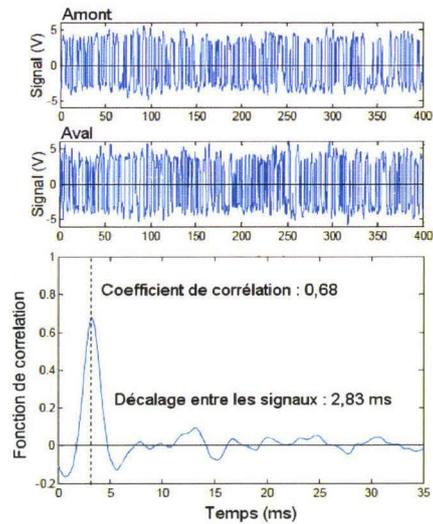


FIGURE 2.5 – Les deux signaux obtenus et leur corrélation

D'un point de vue pratique deux types d'électrodes ont été testés, des électrodes circulaires placées sur le périmètre de la canalisation (Figure 2.6 à gauche) et des tiges de métal intrusives dans la canalisation (Figure 2.6 à droite)^[39]. La méthode par insertion de sondes dans la canalisation a déjà été testée sur des installations industrielles, l'érosion a très vite dégradé les pièces métalliques insérées. Le système d'électrodes circulaires est nouveau.

Lors de la série de tests faite avec le charbon de Freyming, 4 positions différentes ont été testées avec les électrodes intrusives (Figure 2.6 à droite).

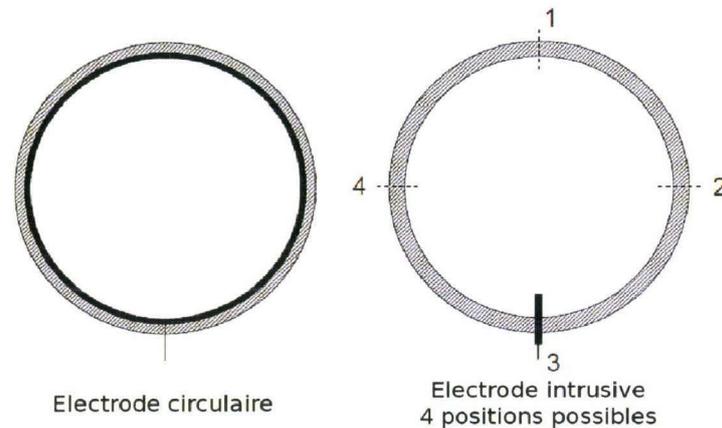


FIGURE 2.6 – Les deux types d'électrodes et les différentes positions des électrodes intrusives

2.3.2 Mesure de la granulométrie du combustible par réflexion laser

Le système de mesure de granulométrie du Kent (Figure 2.7) est basé sur la reconnaissance de forme sur des images de particules prises dans la canalisation.

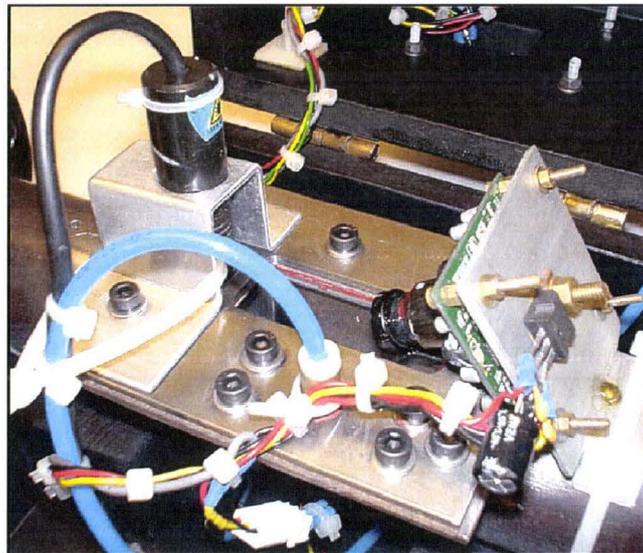


FIGURE 2.7 – Système de mesure de la granulométrie par réflexion laser

Un laser (He-Ne) émet un plan de lumière dans la canalisation, les particules traversant la canalisation réfléchissent la lumière du laser, les particules deviennent donc visible pour la camera. Un système de traitement d'image développé par l'université du Kent permet de déterminer les contours et ainsi de définir la forme de la particule^[60]. De cette forme sont tirés un grand axe et un petit axe, la granulométrie des particules en est déduite. La densité de particules ne permet pas

de mesurer la granulométrie sur une grande profondeur, la lumière du laser serait complètement absorbée. La zone de mesure est donc un plan pénétrant de quelques millimètres, ce qui est peu, comparé aux 10 cm de diamètre de la canalisation. Il n'a jamais été observé de variation notable de la granulométrie pour un même combustible au cours d'un même essai. Comme le système de mesure de vitesse, le granulomètre a été placé en 4 positions sur la canalisation.

2.3.3 Système d'échantillonnage du charbon pulvérisé

À la suite du système de mesure de la granulométrie du Kent, pendant certaines périodes, une canne de prélèvement à trois trous a été insérée dans la canalisation. Elle a permis la mesure de la granulométrie par un instrument de mesure classique dans l'industrie : un granulomètre laser à diffraction de type Malvern. La sonde, perturbant fortement l'écoulement de la canalisation, n'a pas été laissée en continu. La canne de prélèvement a aussi été utilisée pour échantillonner le charbon. Le tamisage ne permet pas de mesure en dessous d'une granulométrie de $60 \mu\text{m}$ car les forces électrostatiques deviennent prédominantes et les particules restent collées entre elles.

2.3.4 Mesure de la température par imagerie deux couleurs et contrôle de la flamme

L'équipe du Kent a développé un système de contrôle de la flamme. Ce système mesure un ensemble de paramètres qui permettent de caractériser la flamme. Les paramètres mesurés par le système sont les suivants :

- Géométriques : point d'allumage, zone de combustion, angle d'extension
- Lumineux : uniformité, brillance
- Physiques : fréquence d'oscillation, température

La figure 2.8 montre les paramètres géométriques mesurés.

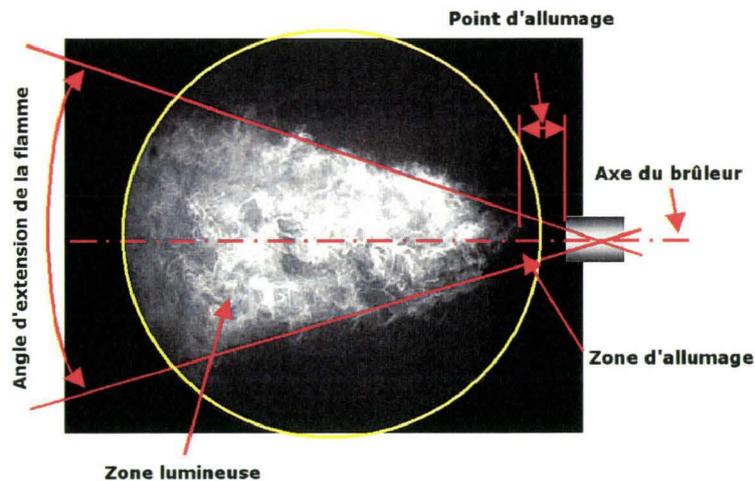


FIGURE 2.8 – Paramètres géométriques mesurés sur la flamme du brûleur pilote de RWE npower. (Charbon/500 kW)

A cause des particularités du brûleur utilisé dans notre cas, la base de la flamme, cachée par l'ouvrage, n'est pas visible. La flamme, dans certains cas, est sortie du champ de vision de la caméra. Les paramètres géométriques n'ont donc pas été utilisés. Les paramètres mesurés sont les suivants :

Brillance : la brillance est l'intégration de l'intensité lumineuse des pixels de la zone.

Uniformité : l'uniformité est la variance de l'intensité des pixels lumineux de la zone.

Fréquence d'oscillation : la fréquence d'oscillation est la variation temporelle de l'intégration des pixels de la zone.

Température : la température est mesurée avec une caméra différente. Un séparateur de faisceaux divise le signal lumineux en deux. Chaque partie est filtrée pour ne garder qu'une seule fréquence (rouge et vert). Les deux fréquences sont suffisamment proches pour considérer l'hypothèse de corps gris valable : l'émissivité entre les deux fréquences doit être la même. De plus les deux fréquences sont choisies éloignées au maximum afin d'augmenter la précision. La loi de Planck est utilisée pour retrouver la température^[28]. Ce système mesure la température des corps solides présents dans la flamme.

2.3.5 Système de mesure des températures et des espèces par sonde à aspiration

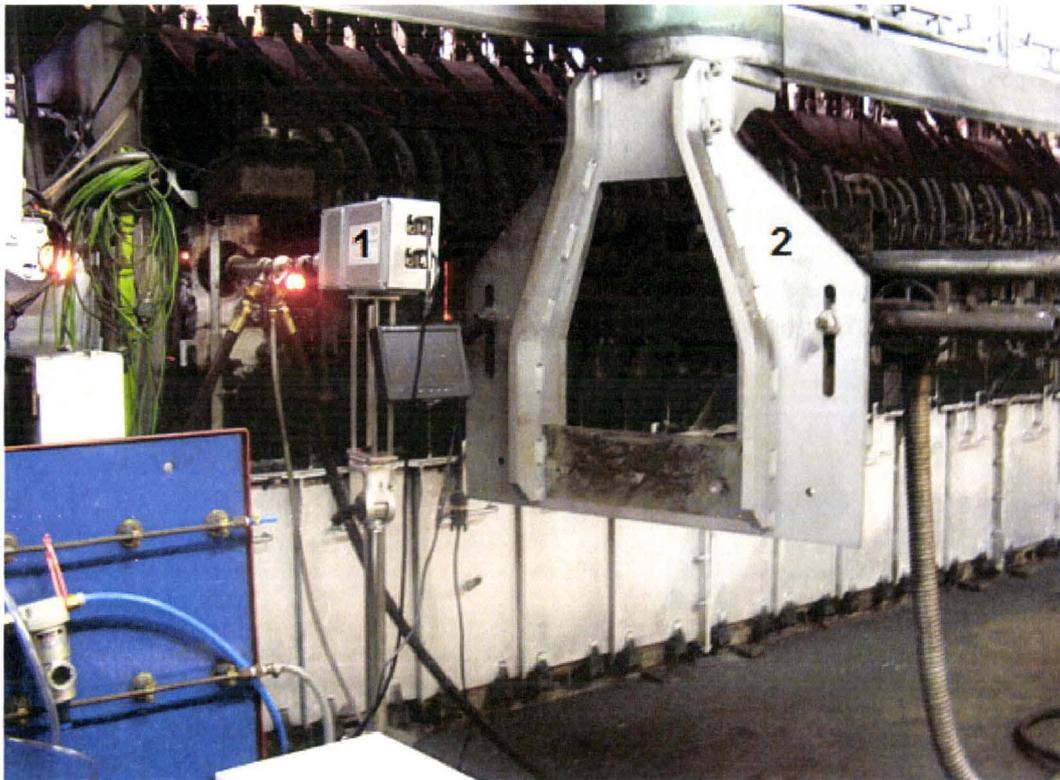


FIGURE 2.9 – Photo latérale du four avec les deux systèmes de mesure de température.

(1) Système de mesure de températures par imagerie deux couleurs.

(2) Système de sonde pour mesurer la température des gaz et les espèces.

Le brûleur est juste à gauche hors de l'image et la cheminée sur la droite, plus loin hors de l'image.

Tout du long du four du CERCHAR se trouvent des fenêtres de 20 cm de large qui peuvent être ouvertes. Ces ouvertures permettent l'insertion d'une sonde à aspiration refroidie. L'ouverture des fenêtres pour la sonde crée une entrée d'air qui pourrait perturber la flamme. La sonde

permet la mesure de la température des gaz par un thermocouple protégé des radiations par deux protections en céramique. Les gaz sont aspirés de façon à passer en contact de la dernière protection en céramique. La mesure par thermocouple peut être remplacée par un système de mesure des espèces. Les différentes espèces mesurées sont : O_2 , CO_2 , CO , NO , SO . Le système est encombrant et difficile à mettre en œuvre, il a fallu faire des mesures en biais pour accéder à des points de mesure en face de la camera qui mesure la température. On peut voir, sur la figure 2.9, le porte sonde et la sonde en 2. Les mesures dans la flamme par la sonde sont faites sur un intervalle de 10 minutes par point. La sonde a aussi été placée en cheminée pour une mesure en continu. Pour les essais de cocombustion, des cendres volantes ont été prélevées au même niveau de la cheminée.

2.3.6 Comparaison des différentes zones de mesure des systèmes de température

Les mesures de température par thermocouple et pyromètre deux couleurs concernent deux objets différents : les gaz pour le thermocouple et des particules pour le système optique deux couleurs. De plus, la camera intègre un volume en une surface, et le thermocouple mesure un petit volume autour d'un point. La figure 2.10 montre 4 lignes de mesure (L1, L2, L3, L4) sur lesquelles sont mesurées les températures par thermocouple ainsi qu'une coupe de la zone de vision de la camera.

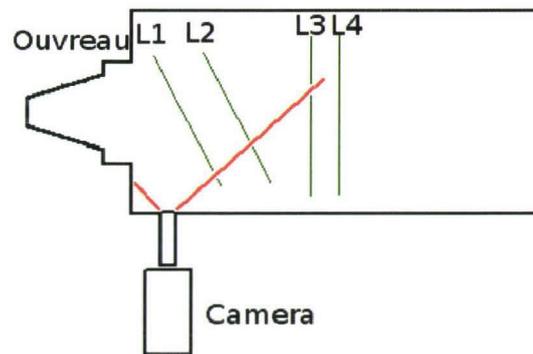


FIGURE 2.10 – Définition des zones de mesure par thermocouple et des espèces, comparées avec celle de la caméra bichromatique

Températures et espèces mesurées en différents points des lignes vertes. Champ de vision de la caméra bichromatique représenté par les lignes rouges.

2.4 Débits d'air et de charbon

Cette partie présente la définition des conditions aux limites pour la modélisation. Les flux de chaleur aux parois ont été mesurés comme décrit précédemment en 2.2.4 page 36. Les conditions aux limites des entrées d'air et de charbon dans le foyer ont été modélisées à partir des flux massiques mesurés par le CERCHAR. Des thermocouples ont mesuré les températures d'air en entrée. Les trois entrées d'air ont été modélisées séparément.

2.4.1 Air tertiaire

L'air tertiaire ou air de stabilisation a été le plus simple à modéliser ; il a cependant été noté une asymétrie de l'injection d'air ; en effet l'injection d'air se faisant par le haut, les débits d'injection en partie haute ont été observés légèrement plus intenses que les débits en partie basse.

2.4.2 Air secondaire

La modélisation de l'air secondaire a été la plus problématique. La modélisation s'est faite de l'arrivée d'air secondaire dans le brûleur jusqu'à la zone de l'ouvreau. Il a été vu que l'étranglement du flux entre les ventelles empêchait le flux d'être asymétrique comme dans le cas de l'air tertiaire. Le passage entre les ventelles étant critique pour la création du swirl, il a été décidé de modéliser seulement l'écoulement entre les ventelles pour comprendre les mécanismes pouvant entrer en jeu.

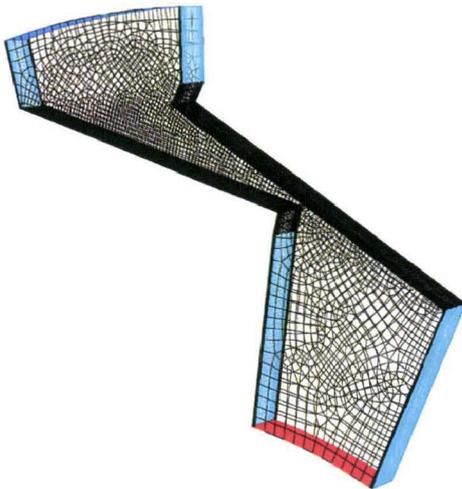


FIGURE 2.11 – Maillage du passage intra-ventelle pour 1 cm de position de la plaque ventelle

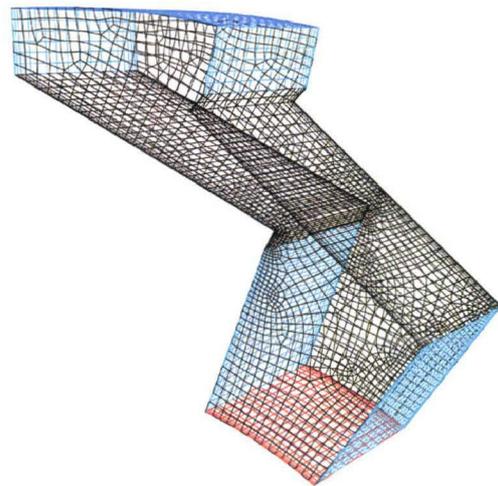


FIGURE 2.12 – Maillage du passage intra-ventelle pour 8 cm de position de la plaque ventelle

Sur les figures 2.11 et 2.12, les zones du bleu le plus foncé montrent l'entrée de l'air et les zones rouges sa sortie. Les parties noires représentent les parois. Les parois en avant plan et en arrière plan sont respectivement la paroi séparant l'air tertiaire et secondaire et la plaque ventelle. Les parois entre les deux sont les parois des ventelles elles mêmes. La paroi la plus basse est la paroi supérieure d'une ventelle, la paroi la plus haute est la paroi inférieure de la ventelle suivante. L'air s'écoule entre ces deux parois. Les parois du modèle en bleu ciel ne représentent pas de paroi réelle. Ce sont des conditions périodiques. En effet en répétant 24 fois ce motif avec une différence d'angle de 15 degrés, on décrit le système entier de ventelle, le système étant cyclique, ce qui rentre par une paroi, va ressortir par l'autre.

On observe clairement sur l'illustration 2.12 que la surface par laquelle passe le flux est plus grande que pour celle représentée en 2.11 ; pour un débit massique égal, la vitesse de l'air entre les ventelles sera plus forte dans le cas 2.11. Le swirl sera plus fort. La modélisation des ventelles a

rencontré un problème : dans les cas des swirls les plus importants, un simple calcul sur les débits et les sections de passage montre que à pression constante, on aurait une vitesse d'air maximale légèrement inférieure à la vitesse du son. Dans ces conditions, les calculs en incompressible ne sont plus valides. Les calculs en compressible ont posé des problèmes de convergence. Par conséquent, les configurations du brûleur avec les swirls les plus élevés n'ont pas été modélisées.

On a observé un faible impact de ce qui se passait en amont des ventelles. La modélisation des conditions d'entrée du swirl dans le foyer s'est donc faite à partir de l'étranglement maximum entre les ventelles, les faces d'entrées étant définies perpendiculairement au vecteur vitesse maximum. Il a été observé à cet endroit un profil d'écoulement très semblable à un profil de Poiseuille. Différents maillages ont été faits pour les différentes positions de plaque ventelle. Différent débits ont été utilisés pour modéliser les injections d'air de swirl correspondantes. La figure 2.13 montre un des maillages.

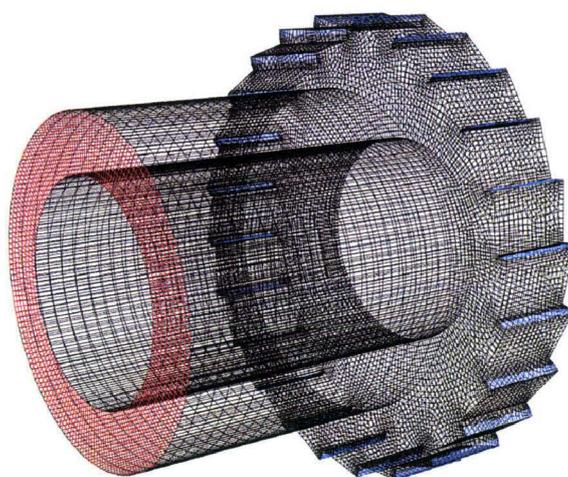


FIGURE 2.13 – Maillage utilisé pour le calcul de l'air de swirl
Entrées en bleu, sortie en rouge

Le modèle de turbulence utilisé est le modèle RSM (Reynold Stress Model). La couche limite a été modélisée par une approche par fonction. Dans ces cas, la rotation entraîne, par inertie, l'air près de la paroi. Les vitesses les plus élevées sont près de la paroi. La méthode de calcul par fonction de la couche limite engendre probablement une erreur ; mais pour calculer correctement la couche limite il faudrait raffiner fortement le maillage proche paroi. Étant donné que les maillages possèdent déjà sans ce raffinement de 3 à 5 millions de mailles et qu'il faut faire une modélisation pour chaque paramétrage de l'air de swirl, cette correction a été abandonnée.

2.4.3 Air de transport et transport pneumatique du combustible pulvérisé

La modélisation de la veine d'écoulement, malgré une structure complexe, n'a pas posé de problème particulier. Elle a été calculée du broyeur, jusqu'à l'entrée dans le foyer. La vitesse des particules correspondant bien à celle mesurée par le système du Kent. Le résultat le plus significatif de ce calcul est l'entrée absolument non homogène des particules dans le foyer. En effet par inertie, les particules sont concentrées du côté opposé au coude. A cause de leur masse, elles arrivent en dessous du maximum de vitesse de l'air de transport (Figure 2.14) tel que montré par modélisation sur la figure 2.15.

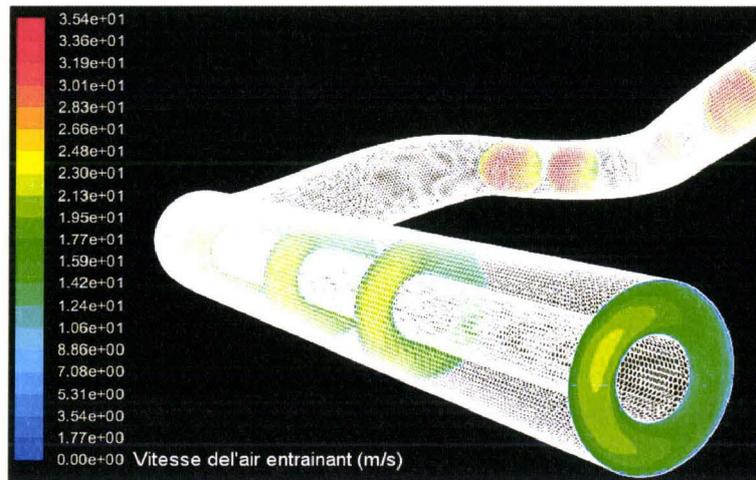


FIGURE 2.14 – Modélisation de la veine d'écoulement : vitesse de l'air I (m/s)

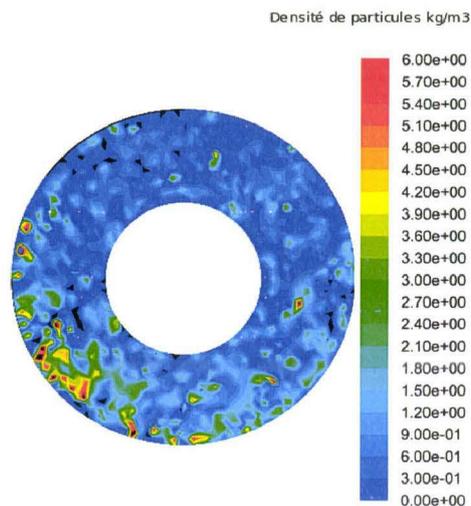


FIGURE 2.15 – Modélisation de la densité de particules en entrée du brûleur

En plus de connaître les flux thermiques aux parois, les vitesses d'injection du combustible, des différents débits d'air entrant, il faut connaître le combustible utilisé.

2.4.4 Les différents combustibles utilisés.

Durant la campagne de mesure 5 combustibles différents ont été utilisés :

- un charbon bitumineux de rang plutôt élevé (Freyning/France),
- un charbon bitumineux de bas rang (La Loma/Colombie),
- un charbon bitumineux de rang plutôt élevé réputé problématique (Middleburg/Afrique du Sud),
- des pellets, un résidu de scierie séché et extrudé, composé de 80% de chêne et de 20% de pin,
- du charbon de bois.

Analyse immédiate et analyse élémentaire des principaux combustibles

Les principaux combustibles ont été analysés afin d'obtenir la composition élémentaire et l'analyse immédiate. Le charbon de Freyming, de La Loma et de Middleburg ont été analysés par le laboratoire du CERCHAR. L'analyse immédiate a été faite par un LECO MAC400 à la vitesse de chauffe de 40°C/min jusqu'à une température de 900°C. L'analyse élémentaire a été faite avec un LECO CHN-600. Les analyses sur la biomasse ont été faites par la SOCOR avec des procédures similaires. Le tableau 2.1 présente la synthèse des différentes analyses.

TABLE 2.1 – Analyse élémentaire des combustibles

* sur sec, ** sur pur

	Freyming	La Loma	Middelbourg	Biomasse
Humidité	1,6	5	2,8	3,4
MV*	33,6	37,0	25,1	89,2
Cendres*	4,8	4,5	14,6	4,5
C **	86,2	80,6	84,4	48,6
H **	5,2	4,9	4,3	4,65
O **	6,9	12,7	9,4	42,0
N **	0,86	1,23	1,59	0,09
S **	0,87	0,51	0,41	0,09
Cl **	-	-	-	0,02
PCI (kJ/kg)	32 089	29 465	26 999	16 600
PCS (kJ/kg)	33 145	30 468	27 778	17 500

L'analyse élémentaire permet de placer les différents charbons sur un diagramme de Van Krevelen, voir la figure 2.16.

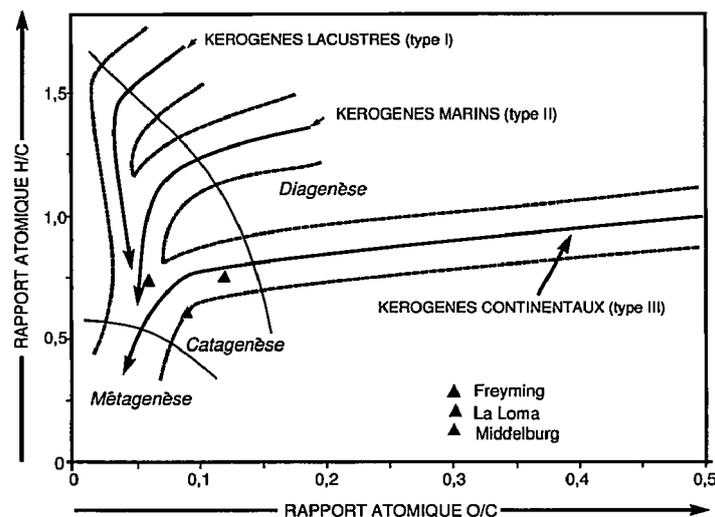


FIGURE 2.16 – Diagramme de Van Krevelen représentant les trois charbons utilisés

Ce diagramme permet de se faire une première idée sur les différents charbons. Ce sont des

charbons bitumineux. Le charbon de La Loma est le charbon de plus bas rang. Les rangs du Middleburg et du Freyming sont difficiles à comparer ; cependant, le Middleburg paraît particulièrement éloigné de l'axe de maturation moyen. Il est plus proche de la zone de maturation des inertinites. Au contraire le charbon de Freyming est plus proche du chemin de maturation des kéroènes de type I et II qui sont composés d'exinite.

Charbon de Freyming

Une analyse faite par le Centre de Pyrolyse de Marienaux dans le cadre de l'étude « Improvement in availability and reduction in operating costs of coal combustion »^[53] fournit la composition macérale du charbon de Freyming. Le tableau 2.2, qui reprend ces données, permet de voir que le charbon de Freyming est d'un rang relativement élevé (Pouvoir réflecteur de la vitrinite : $R_o = 0,85 \%$), ce qui explique sa faible concentration en oxygène et son PCI élevé, qu'il contient une quantité significative d'exinite qui contribue à une quantité importante de matière volatile et une forte quantité d'hydrogène ; mais aussi une petite quantité d'inertinite et de semi-fusinite qui vont diminuer sa réactivité en apportant peu de matières volatiles et un résidu carboné peu poreux.

TABLE 2.2 – Rang et composition macérale du charbon de Freyming.

(R_o : coefficient réflecteur de la vitrinite)

Vitrinite	Exinite	Inertinite	Semi-Fusinite	Fusinite	R_o (%)
77,8	10,6	5,6	3,2	0	0,85

Les analyses fournies par les mesures ATG utilisées de façon standard sont loin de la réalité physique de la combustion. En effet, les ordres de grandeur de la vitesse de chauffe sont totalement différents. La vitesse de chauffe d'une particule de charbon envoyée dans un foyer est de l'ordre de 10^5 °C par seconde, ce qui est très éloigné des quelques dizaines de degrés par minute utilisés de façon standard. Cependant le charbon de Freyming a été étudié sur un brûleur à flamme plate, dans des conditions de vitesse de chauffe réalistes^{[23][24]}. Les quantités de matières volatiles et leur composition élémentaire ont été mesurées. La quantité de matières volatiles sur brut mesurée dans ces conditions est de 46 % à la place de 33,6 % en ATG. La composition élémentaire des matières volatiles est donnée dans le tableau 2.3 en fraction molaire. Le soufre n'est pas mesuré et l'oxygène est calculé par différence.

TABLE 2.3 – Composition élémentaire en pourcentage molaire des volatils mesurés sur un brûleur à flamme plate^[22]

Element	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Fraction molaire	33,76	56,42	8,67	1,15

La Loma

Le charbon de La Loma est un charbon bitumineux de bas rang. En effet comparé aux deux autres charbons, il a eu moins de temps pour la maturation. Il est âgé de 58-65 Ma^[6] contre

303-299 Ma pour le charbon de Freyming et 299-250 Ma pour le charbon de Middleburg. Il a donc une température de dévolatilisation plus basse (La Loma : 295 °C ; Freyming : 333 °C)^[53] et une quantité de matières volatiles plus importante. Ces deux paramètres en font un combustible facile à brûler. Cependant, il est plus riche en oxygène et possède aussi une composition des matières volatiles moins riche en composés lourds et plus riche en composés aliphatiques. Il possède un pouvoir calorifique plus faible que le charbon de Freyming.

Middleburg

Le charbon de Middleburg est le combustible le plus difficile à brûler des trois. Les charbons sud-africains sont connus pour leur forte teneur en inertinite (40-60 %). L'inertinite est un macéral brûlant difficilement car ayant une faible teneur en matière volatile et une forte teneur en cendres. Son pouvoir calorifique est le plus faible et la combustion des résidus carbonés issus de particules d'inertinite est plus lente.

Biomasse : Pellets (80 % chêne/20 % pin)

L'utilisation de biomasse dans des installations prévues pour le charbon pulvérisé pose un certain nombre de problèmes techniques. En particulier le broyage qui, à cause de l'humidité et de la nature fibreuse du matériau, peut endommager l'installation. C'est pourquoi le choix de la biomasse s'est porté sur des pellets. En effet, les pellets sont constitués de sciure de bois. Ils sont donc déjà sous forme de particules agglomérées. De plus, les pellets sont séchés et possèdent une teneur en humidité extrêmement basse (3,4 %) comparée à d'autres types de biomasse végétale qui peuvent contenir jusqu'à 50 % d'humidité. Le taux de matière volatile extrêmement élevé et les taux d'humidité et de cendre très faibles en font un combustible particulièrement réactif. La faible teneur en *Cl* du bois permet d'éviter les problèmes de corrosion.

Charbon de bois

Le charbon de bois a été inclus dans la campagne de mesure au dernier moment, l'analyse n'a pu être faite qu'après la campagne. Le combustible contient en masse sur pur 2,6 % d'humidité, sur sec 81,8 % de résidu carboné, 16,1 % de matières volatiles et 2,2 % de cendres.

2.4.5 Les trois campagnes de mesure

Les expériences sur le four du CERCHAR ont été divisées en trois campagnes.

Première campagne : validation des systèmes de mesure expérimentaux et modélisation

Cette campagne a servi de test pour les différents instruments de l'équipe du Kent et pour une série de mesures classiques sur le four. Le charbon de Freyming est bien connu, cette connaissance a été utilisée pour la modélisation numérique de la combustion. L'ensemble des données a été utilisé pour la validation des instruments du Kent et la compréhension des phénomènes physiques en jeu.

Deuxième campagne : influence du facteur d'air primaire et du swirl

Lors de cette campagne, un grand nombre de changements de paramètres du brûleur ont été effectués. L'impact des variations de swirl et du facteur d'air primaire sur la combustion

et ses effets a été étudié. L'utilisation du charbon de la Loma qui assure une bonne stabilité de flamme autorise une gamme de variation importante. Cette campagne est utilisée pour pouvoir interpréter les résultats de cocombustion. En effet, il y a besoin de changer les débits d'air avec le changement de combustible ; le facteur d'air primaire et le swirl en sont affectés.

Troisième campagne : cocombustion charbon/biomasse et résidu carboné de bois

Cette campagne de mesure teste la cocombustion. Le charbon de Middleburg, de combustion difficile, est brûlé seul et avec des pellets afin de voir si on observe une amélioration de la combustion par l'apport de matière volatile. La quantité de matière volatile changeant avec l'ajout de biomasse, le débit d'air secondaire a été changé, le débit d'air tertiaire a été ajusté pour obtenir un débit d'air total constant. De plus, un test de faisabilité a été fait avec du charbon de bois.

Première campagne : validation des systèmes de mesure et modélisation

Contents

3.1	Présentation de la campagne d'essais	50
3.1.1	Objectifs	50
3.1.2	Description	50
3.1.3	Résultats préliminaires	50
3.2	Éssais des systèmes de mesure dans la veine d'alimentation	51
3.2.1	Système de mesure de vitesse des particules	51
3.2.2	Système de mesure de la granulométrie par imagerie	52
3.3	Modélisation : choix des modèles	53
3.3.1	Écoulement fluide	53
3.3.2	Résolution de la chimie en phase gazeuse	53
3.3.3	Composition des matières volatiles	54
3.3.4	Particules : cinétique de dévolatilisation et combustion hétérogène du résidu carboné	56
3.4	Comparaison des mesures et de la modélisation numérique	57
3.4.1	Observation visuelle	57
3.4.2	Calcul de l'écoulement fluide	57
3.4.3	Mesure du flux de chaleur aux parois	58
3.4.4	Températures : mesures et modélisation	59
3.4.5	Validation du système de mesure de la température	60
3.4.6	Dioxygène	62
3.4.7	Dioxyde de carbone	64
3.4.8	Monoxyde de carbone	64
3.4.9	Oxyde d'azote	65
3.5	Synthèse du chapitre	67
3.5.1	Validation	67
3.5.2	Représentation de la physique	67

3.1 Présentation de la campagne d'essais

3.1.1 Objectifs

Les premiers objectifs de cette campagne de mesure sont la mise en pratique, le test et la validation des systèmes d'instrumentation du Kent. Il est aussi cherché à mettre en évidence les différents mécanismes physicochimiques en jeu et le fonctionnement du brûleur afin d'évaluer la pertinence des mesures. Les deux instruments de mesure pour la vitesse et pour la granulométrie sont présentés en premiers. Par la suite, pour la validation du système de mesure de température de la flamme, la modélisation est utilisée. La modélisation est donc présentée avant la validation de l'instrument. On s'appuie sur la modélisation numérique pour l'étude du comportement de la flamme, la modélisation se concentre donc sur la représentation de la zone mesurée.

3.1.2 Description

Durant la campagne, les trois instruments du Kent (vitesse et granulométrie des particules de charbon dans la veine d'alimentation plus température et stabilité de la flamme) ont été testés. Le four a été utilisé sur un fonctionnement de référence, et avec une stœchiométrie primaire supérieure et inférieure à la référence. Des mesures dans la flamme et dans la cheminée (températures, O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_x), des tests de granulométrie (Malvern, méthode de diffraction laser) ont été effectués. Sur une même journée, des variations de swirl ont été effectuées sans mesure dans la flamme, mais avec des mesures de température par imagerie de la flamme et des mesures en cheminée.

3.1.3 Résultats préliminaires

Le tableau 3.1 résume les différentes configurations utilisées et les résultats obtenus.

TABLE 3.1 – Conditions et résultats de la première session

	λ_1 Bas	Référence	λ_1 Elevé	e :1 cm	e :6 cm	e :8 cm
λ_1 calculé	0,35	0,57	0,74	0,51	0,59	0,6
Swirl	0,84	1,27	1,11	3,92	0,68	0,51
Puissance (MW)	3,5	3,6	3,6	3,5	3,5	3,4
Débit charbon (kg/h)	404	396	414	395	405	390
Débit Air I (kg/h)	590	584	594	579	596	591
Débit Air II (kg/h)	898	1822	2657	1693	1937	1877
Débit Air III (kg/h)	3871	1764	1869	2678	2598	2650
Plaque ventelle (e :cm)	3	3	3	1	6	8
T Air I (°C)	38	43	45	39	38	42
T Air II (°C)	33	44	34	38	35	36
T Air III (°C)	35	45	35	39	35	37
O_2 (%)	4,2	3,9	3,1	3,8	3,4	4
CO_2 (%)	14,8	15,5	16,1	16,0	15,8	13,4
CO (ppm)	494	1064	1090	576	643	1812
NO_x (ppm)	140	332	369	190	194	163
SO_2 (ppm)	465	410	476	490	493	480

Le swirl le plus élevé avec une position de plaque ventelle à 1 cm était stable. Les swirls les plus bas, avec des positions de ventelle à 6 et 8 cm, étaient instables. On a observé des extinctions dans ces deux cas. Les effets des variations de swirl et de facteur d'air primaire sont étudiés dans le chapitre 4. Dans le présent chapitre, c'est la flamme de référence qui est prise en compte au niveau des mesures et du modèle.

3.2 Essais des systèmes de mesure dans la veine d'alimentation

3.2.1 Système de mesure de vitesse des particules.

Le système de mesure a été présenté dans la partie 2.3.1 page 37. Les résultats en fonction des deux types de sonde et en fonction de la position de la sonde intrusive sont présentés dans le tableau 3.2. Les positions des électrodes ont été montrées sur la figure 2.6 page 38.

TABLE 3.2 – Résultats des capteurs de vitesse électrostatiques

Voir la figure 2.6 page 38 pour les positions des électrodes

	Vitesse moyenne $m.s^{-1}$	σ (%) Deviation standard normalisée de la corrélation
Sonde circulaire	15,64	2,82
Sonde intrusive en 1	17,50	2,33
Sonde intrusive en 2	16,53	2,40
Sonde intrusive en 3	14,93	5,85

Les résultats donnent une vitesse moyenne des particules de 15,64 m/s ; le calcul de la vitesse à partir des débits volumiques donne une vitesse moyenne des gaz de 20,40 m/s ; soit une différence de 30 %. Cette différence de 30 % sera gardée pour estimer la différence de vitesse entre les gaz et les particules. On observe de plus que la vitesse en position haute (17,5 m/s) est plus élevée et moins dispersée ($\sigma = 2,33$ %) que la vitesse en position basse (14,93 m/s ; $\sigma = 5,85$ %). Le nombre de Stokes est le rapport du temps de retournement des tourbillons et du temps de réponse de la particule lié à l'inertie ; son calcul, en fonction de la taille, avec $Re = 86000$ ^[4] donne le tableau suivant :

TABLE 3.3 – Nombre de Stokes sur la gamme de taille des particules de charbon

Diamètre	1 μm	10 μm	30 μm	40 μm	50 μm	100 μm	500 μm
Nombre de Stokes	7.10^{-4}	0,07	0,59	1,05	1,64	6,58	164,41

- Un nombre de Stokes très inférieur à 1 montre des particules qui sont suffisamment légères pour suivre le flux ; on parle de particules traceurs.
- Un nombre de Stokes proche de 1 montre un écoulement préférentiel des particules ; autrement appelé avec une expression plus imagée par nos confrères Britanniques : « roping »
- Un nombre de Stokes très supérieur à 1 montre la prépondérance de la masse sur la turbulence.

L'étude LES³ menée par le CORIA^[4] a montré que l'écoulement établi subissait probablement l'effet de la gravité et avait un écoulement préférentiel en partie basse. On peut donc supposer avoir en partie basse un écoulement plus dense avec une granulométrie moyenne plus élevée qu'en partie haute. La sonde intrusive, qui pose des problèmes d'érosion dans les canalisations de taille industrielle permet de détecter un écoulement localisé.

3.2.2 Système de mesure de la granulométrie par imagerie

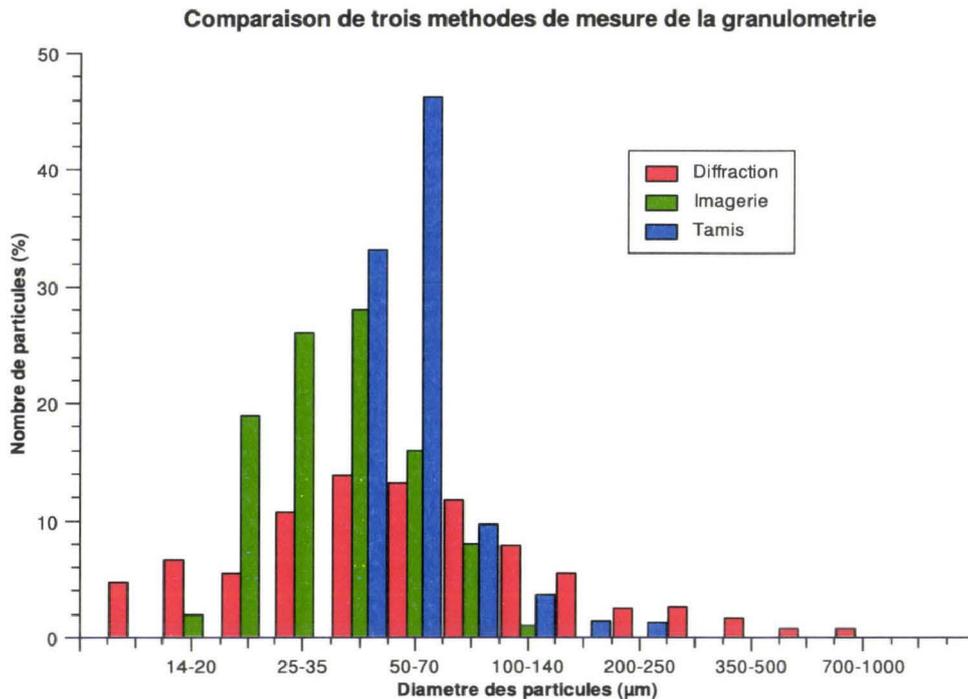


FIGURE 3.1 – Granulométrie des particules en nombre par tamisage, par réflexion laser, et par diffraction

La figure 3.1 montre les résultats de granulométrie obtenus avec les trois méthodes différentes : réflexion laser, diffraction laser (Malvern) et granulométrie. On observe pour les grosses particules une prédiction plus importante par le Malvern que par le système par réflexion. Pour connaître la granulométrie réelle, on utilise une méthode de tamisage. Cette méthode n'est valide que pour les grosses particules, plus la taille (donc la masse) des particules diminue, plus le rapport entre la force de gravitation et les forces électrostatiques devient faible. Les particules ont alors de plus en plus tendance à se coller les unes aux autres. C'est pourquoi, sur le tamis on observe que les particules se collent les unes aux autres pour les granulométries 50-70 μm et 35-50 μm. C'est un phénomène régulièrement observé par les techniciens du CERCHAR. Les mesures par diffraction et par réflexion dénombrent les particules. La mesure par tamis donne un résultat massique. La masse des grosses particules étant liée au cube de leur dimension, il est préférable de passer la mesure en masse en une mesure en nombre plutôt que de démultiplier l'erreur sur les grosses particules. Par conséquent, le petit nombre de particules vues sur le tamis 350-500 μm, qui représente une masse petite mais non négligeable, disparaît complètement du graphique

pour le tamis. Le Malvern donne un nombre de particules non négligeable dans cet intervalle. L'échantillonnage pour le tamisage et pour la diffraction est le même, la différence entre les deux résultats est donc liée à une erreur de la mesure par diffraction.

Le système de tamis montre la présence des quelques particules de grosse taille qui représentent une petite proportion massique du combustible, cette tranche granulométrique est totalement absente des mesures par imagerie. La différence entre les mesures par tamis et les mesures par réflexion pour les grosses particules peut être liée à une différence d'échantillonnage : la pénétration du laser du système par imagerie dans la canalisation n'est que de quelques millimètres.

Pour conclure sur les particules de grosse taille, le Malvern les sur-prédit et le système par réflexion les sous-prédit.

En ce qui concerne les particules de petite taille, pour la méthode par réflexion, la résolution des pixels de la caméra limite la mesure à $10 \mu\text{m}$.

S'il y a un phénomène de « roping », on le rate probablement avec le système par imagerie. En effet, on observe une granulométrie identique dans toutes les positions.

Malgré ces différences ; le pic du maximum de granulométrie est cohérent, il est dans l'intervalle $35\text{-}50 \mu\text{m}$; il est plus précisément de $45 \mu\text{m}$ par diffraction et par réflexion.

3.3 Modélisation : choix des modèles

3.3.1 Écoulement fluide

Les calculs ont été faits en RANS (voir 1.3.1 page 26), le maillage du foyer est 2D axisymétrique. Ces choix ont été faits pour des raisons de temps de calcul. L'écoulement en swirl nécessite un modèle de turbulence particulier. RSM a été préféré à $k\text{-}\varepsilon$ RNG, en raison de sa plus grande représentativité physique, malgré un temps de calcul plus important, car il donne des résultats plus fréquemment convergés. La loi de paroi est calculée par une fonction, ce qui permet de ne pas raffiner le maillage près de la paroi.

3.3.2 Résolution de la chimie en phase gazeuse

Le choix du modèle chimique est un élément déterminant du calcul. Pour la modélisation de la chimie, le charbon pulvérisé pose un problème majeur : la complexité et la variabilité de la composition des matières volatiles des charbons. Les matières volatiles sont composées en grande partie de molécules simples, comme CH_4 ou H_2 , pour lesquelles on dispose de schémas cinétiques validés. Cependant, les proportions de molécules lourdes, cycliques, aromatiques, peuvent être importantes. Les schémas cinétiques de la combustion de ces molécules sont souvent inconnus et posent des problèmes de temps de calcul si jamais ils sont disponibles.

Pour ces différentes raisons un modèle de type « *pdf* » à l'équilibre a été choisi (voir 1.3.2 page 27).

Le modèle chimique de type « *pdf* » à l'équilibre est rapide et permet d'avoir des espèces radicalaires prédites pour le calcul des oxydes d'azote. Cependant il faut garder à l'esprit que la vitesse de réaction contrôlée par la turbulence crée une erreur pour les cinétiques lentes comme celles intervenant pour CO et les suies. De plus, il y a une possibilité de retour sur le chemin cinétique, par exemple CO_2 peut revenir à CO dans une zone réductrice ce qui réduit la température. Le tableau 3.4 présente les différents modèles utilisés.

TABLE 3.4 – Modèles utilisés

Modélisation	RANS
Géométrie	2D axisymétrique
Turbulence	RSM
Loi de paroi	fonction
Radiation	P-1
Chimie	pdf à l'équilibre

3.3.3 Composition des matières volatiles

Le logiciel Fluent offre une approche à deux combustibles différents qui, dans un premier temps peut paraître une excellente solution. Cette méthode permet d'utiliser une composition pour les matières volatiles et une autre pour le résidu carboné. Cependant, elle donne des résultats aberrants pour une composition secondaire très riche en carbone associée avec un modèle à l'équilibre. En effet, les méthodes à l'équilibre sont réversibles, ce qui dans des conditions très riches, conduit à un refroidissement très fort de la flamme par un retour à des formes riches en carbone. Il faut donc choisir une composition qui va représenter les matières volatiles et le résidu carboné de la même façon. La méthode préconisée par Fluent est d'utiliser la composition élémentaire totale du charbon.

Le système d'imagerie de la température de la flamme mesure la flamme à la sortie de l'ouvrage. On s'intéresse à la partie visible de la flamme; à cet endroit, on a une combustion quasi complète des matières volatiles et une combustion partielle du résidu carboné.

Une composition moléculaire des matières volatiles a été construite artificiellement à partir du PCI, en considérant le résidu carboné comme du graphite, et à partir de la composition élémentaire des matières volatiles du charbon de Freyming mesurés par Therssen dans sa thèse^[22]. Ces résultats sont donnés dans le tableau 3.5. Le soufre n'a pas été mesuré, l'azote a été négligé, l'oxygène a été calculé par différence. La seconde ligne présente la composition élémentaire résultant du choix de la composition moléculaire des matières volatiles.

TABLE 3.5 – Compositions élémentaires des volatils (fraction molaire)

	C	H	O
Composition mesurée	0,280	0,640	0,080
Composition utilisée	0,338	0,564	0,087

Le choix des espèces volatilisées s'est fait difficilement car il fallait concilier le PCI et le pouvoir comburivore. Les espèces choisies pour la composition des matières volatiles sont présentées dans le tableau 3.6.

H_2 et CH_4 représentent les matières volatiles légères. Le benzène est utilisé pour les matières volatiles lourdes et les goudrons. La présence d'éléments aromatiques est une obligation pour ne pas fausser le rapport C/H. Ceci est tout à fait cohérent avec le fait que le charbon est un bitumineux d'un rang plutôt élevé. Les bitumineux sont connus pour être le type de charbon contenant le plus d'aromatiques.

Le PCI calculé des matières volatiles du modèle est de 31 852 kJ/kg, celui du charbon total

TABLE 3.6 – Composition moléculaire des volatils modélisés

Espèce	Fraction molaire
CH_4	0,35
H_2	0,15
C_3H_8	0,01
C_6H_6	0,13
CO	0,36

mesuré de 32 089 kJ/kg. On peut estimer le pouvoir calorifique en estimant que le résidu carboné est du graphite (32 808 kJ/kg). Ce qui donne, en prenant en compte l'eau et les cendres, pour 47 % massique de matières volatiles : un PCI des matières volatiles de 34 204 kJ/kg.

La composition des matières volatiles utilisée ici donne un pouvoir calorifique de 31 852 kJ/kg. Les calculs à l'équilibre ont tendance à surprédire la température dans un milieu oxydant, ce qui peut compenser l'erreur du PCI des matières volatiles sous-évalué.

La composition élémentaire des matières volatiles est utilisée pour calculer leur pouvoir comburivore. Ce qui donne un pouvoir comburivore pour les valeurs du modèle de 5,40 $kg_{air}/kg_{charbon}$ et les valeurs de la mesure de 5,30 $kg_{air}/kg_{charbon}$. La composition des matières volatiles donne un pouvoir comburivore correct malgré quelques différences dans la composition élémentaire.

À partir des mesures des flux massiques entrants d'air et de charbon et de l'excès d'air mesuré, on calcule un pouvoir comburivore global de 8,53 $kg_{air}/kg_{charbon}$. Cette valeur est très forte en comparaison de celle du modèle (5,40 $kg_{air}/kg_{charbon}$).

En calculant le pouvoir comburivore à partir de la composition élémentaire mesurée des matières volatiles et en considérant le résidu carboné comme du carbone pur on obtient : 8,60 $kg_{air}/kg_{charbon}$.

Donc, si l'on pouvait considérer le résidu carboné comme du graphite, le PCI et le pouvoir comburivore du modèle seraient adaptés dans les différentes phases de la combustion. Seulement, une telle solution n'est pas applicable. On se contentera d'une combustion correctement représentée par son PCI et le pouvoir comburivore pour la matière volatile. Pour la phase solide, le PCI est correct mais le pouvoir comburivore est très sous-estimé.

TABLE 3.7 – PCI et pouvoir comburivore dans l'ouveau et dans la cheminée

	PCI (kJ/kg)			Pouvoir Comburivore ($kg_{air}/kg_{charbon}$)		
	Volatils	Charbon	Réel	Volatils	Charbon	Réel
Ouvreau	31 852	32 089	34 204	5,4	9,6	5,3
Cheminée	31 852	32 089	32 089	5,4	9,6	8,53

Le tableau 3.7 présente les valeurs qui pourraient être utilisées dans le modèle. Soit en prenant en compte la composition des matières volatiles pour les matières volatiles et le résidu carboné (colonne volatils), soit en prenant en compte la composition du charbon dans sa totalité pour les matières volatiles et le résidu carboné. Pour comparaison on donne les valeurs que l'on devrait avoir (colonne réel). La première ligne permet de donner les valeur en ne considérant que la combustion des matières volatiles, comme si on était peu après l'ouveau, dans la flamme. La seconde ligne montre les résultats que l'on devrait avoir à la sortie du foyer.

Pour le PCI noté « Réel » dans l'ouvrage, il s'agit d'une évaluation considérant le résidu carboné comme du graphite.

On constate que les deux méthodes vont donner des résultats corrects pour le PCI. La méthode qui ne tient compte que des matières volatiles sera plus réaliste dans la flamme, mais donnera des résultats erronés en sortie. Celle qui tient compte seulement du charbon donnera des concentrations d'espèces irréalistes dans la flamme, mais donnera des résultats tout à fait satisfaisants en cheminée. On s'intéresse à la température de la partie visible de la flamme : on ne prendra en compte que les matières volatiles.

3.3.4 Particules : cinétique de dévolatilisation et combustion hétérogène du résidu carboné

Les premiers calculs ont montré un pic de température juste à l'extérieur de l'arrivée d'air III, ce pic de température calculé est dû à une fraction importante du résidu carboné qui reste indéfiniment dans la zone de recirculation externe. En réalité, le résidu carboné observé paraît visiblement peu important dans cette zone de recirculation. La trajectoire du résidu carboné est calculée par pas de temps. Le nombre de pas de temps a été réduit pour éviter un nombre de recirculations important dans la zone de recirculation externe. Par conséquent, seule une très faible quantité de particules traverse la chaudière jusque à la cheminée. La modélisation est concentrée sur la flamme.

La dévolatilisation dans l'ouvrage est un phénomène calculé comme une fonction de la température. La combustion des matières volatiles émises par la dévolatilisation fournit la chaleur qui permet par la suite la dévolatilisation. On voit clairement que l'on a un système de « *feedback* » important.

On a comme paramètres contrôlant la dévolatilisation, non pas seulement les paramètres cinétiques de dévolatilisation, mais aussi les conditions aux limites sur le réfractaire de l'ouvrage, la stœchiométrie dans l'ouvrage, la dynamique des fluides qui va régler la répartition des matières volatiles et de l'oxygène, la composition des matières volatiles qui contrôle la température, et aussi, le modèle chimique qui va contrôler la cinétique de combustion.

Dans le cas de l'utilisation d'une chimie à l'équilibre, d'un côté la réaction est instantanée, ce qui accélère le processus en milieu oxydant, d'un autre côté, en milieu réducteur, la température calculée est plus froide, ce qui ralentit le processus. Lors du lancement du calcul, la température initiale est fixée élevée, la première dévolatilisation peut donc avoir lieu. Par la suite, la température de la paroi du réfractaire de l'ouvrage est fixée avec une condition aux limites de flux thermique nul.

Le jet de particules a été conçu en trois injections : deux pour représenter le comportement variable des macéraux et une injection qui devait initialement représenter la combustion des suies. On verra plus loin ce que cette injection apporte.

- Une injection représente l'association des particules de vitrinite et d'exinite. Ces deux composants possèdent une forte teneur en matières volatiles et un résidu carboné qui devient fortement poreux et présente donc une forte réactivité.
- Une autre représente l'association des cendres et de l'inertinite. En effet, ces deux éléments sont souvent associés : l'inertinite possède une quantité de matières volatiles très faible et son résidu carboné reste très dense.
- Le troisième jet de particules devait initialement représenter les suies. On considère 20% de combustion supplémentaire pris sur la combustion hétérogène de l'association vitrinite/exinite. Les suies viennent des matières volatiles, on suppose donc que les mesures sur brûleur à flamme plate de la quantité de matières volatiles sont inférieures de 20% à

la réalité. Les particules sont petites et de forte diffusivité dans le but de représenter la combustion hétérogène des suies. Il était supposé que cette combustion hétérogène aurait lieu après celle des matières volatiles.

La répartition entre les différents macéraux du charbon de Freyming a été mesurée par le Centre de Pyrolyse de Marieneau. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.2, page 46.

Dans le calcul, la combustion hétérogène est entièrement contrôlée par la diffusion, les différents paramètres utilisés pour les injections de particules sont donnés dans le tableau 3.8.

TABLE 3.8 – Propriétés utilisées pour les différentes injections de particules

(A et Ea sont les constantes de dévolatilisation) * %massique

Injection	Char*	Diffusivité	Gonflement	Volatils*	A (s^{-1})	Ea ($J.kmol^{-1}$)
Réactif	32	4.10^{-5}	4	68	92000	$7,4.10^7$
Peu réactif	59	1.10^{-5}	1	0	NA	NA
Artificiel (<i>suies</i>)	100	4.10^{-4}	1	0	NA	NA

Au total on obtient un charbon avec 47% de matières volatiles (+20% de « suies »), 49% de résidu carboné (-20% de « suies »), 4% de cendres en masse sur sec.

3.4 Comparaison des mesures et de la modélisation numérique

3.4.1 Observation visuelle

Dans les conditions de flamme standard, il a été observé visuellement que la flamme était divisée en deux parties, une première part de la flamme juste après l'ouvreau avait une forme bien nette, elle était lumineuse et claire. La seconde partie de la flamme sortait de la première par intervalles réguliers de quelques secondes. Elle formait une ligne d'un orange plus sombre, qui s'enroulait en suivant la paroi avec une forme de tire-bouchon. Cette seconde partie de la flamme peut être interprétée comme la trajectoire des particules et/ou des suies.

3.4.2 Calcul de l'écoulement fluide

Comme il est techniquement difficile de faire des mesures de vitesse dans une flamme de charbon pulvérisé. Il n'y a pas de mesures de vitesse pour l'écoulement réactif. La validité de l'écoulement doit donc être jugée de façon indirecte. La figure 3.2 montre les lignes de courant d'un calcul de la flamme de référence avec la position des différentes lignes de mesure ; le système de graduation utilisé ici est conservé dans la suite du document. Il faut remarquer sur cette figure les deux zones de recirculation :

- La première zone interne est provoquée par l'air de swirl, elle est essentielle sur ce type de brûleur, car elle aide l'accroche de la flamme par la recirculation et surtout elle crée une zone réductrice qui permet la réduction des NO_x . L'écoulement modélisé montre cette recirculation interne qui rentre jusque dans l'ouvreau.
- La seconde zone de recirculation est externe, elle est provoquée par l'arrivée de l'air tertiaire. L'amplitude de la zone de recirculation externe peut être corroborée visuellement : la fin de cette zone de recirculation correspond à l'endroit où la flamme va entrer en contact avec la paroi du foyer. En suivant cette logique on peut observer la récupération de la chaleur par les boucles d'eau pour juger de la position de la zone de recirculation externe.

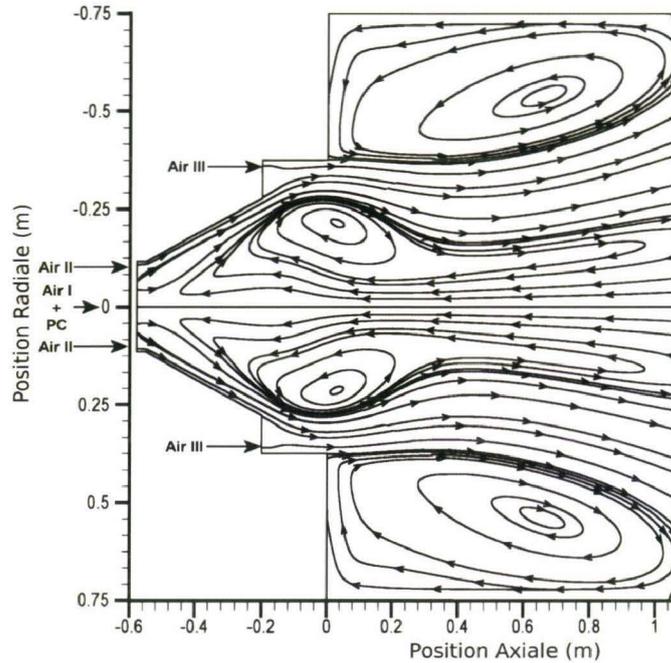


FIGURE 3.2 – Lignes de courant dans le foyer modélisées dans le plan horizontal

3.4.3 Mesure du flux de chaleur aux parois

La figure 3.3 montre le flux de chaleur surfacique gagné par les boucles de refroidissement.

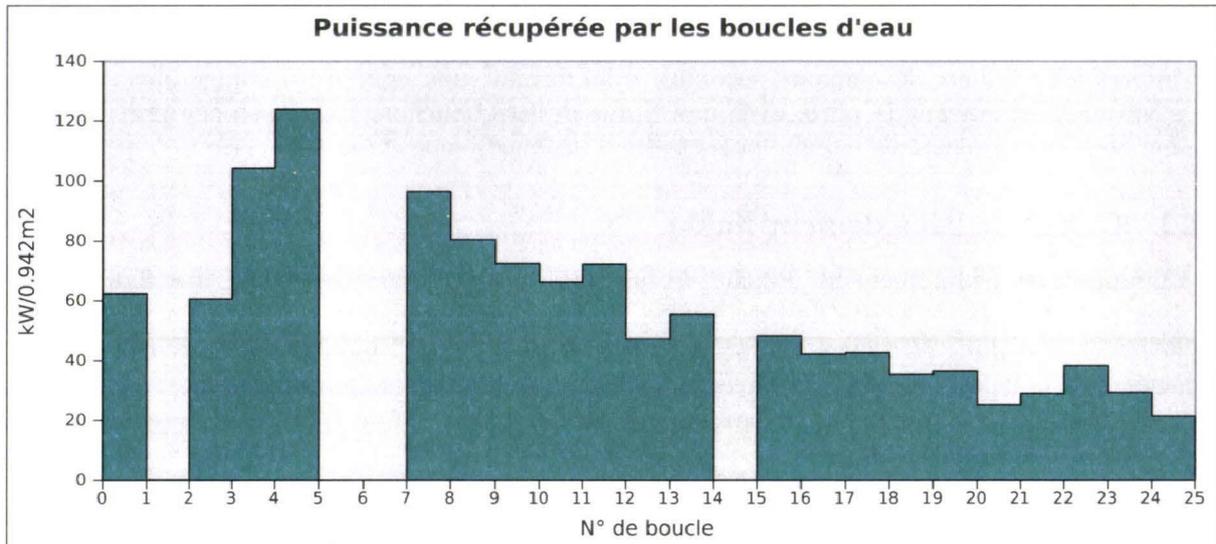


FIGURE 3.3 – Flux de chaleur récupéré par les boucles d'eau

On constate une récupération d'énergie plus importante qui commence au niveau de la boucle 4 et un pic de température aux environs des boucles 5 et 6 vers 0,6 – 1,2 m. De plus, la flamme avait tendance à sortir régulièrement par la fenêtre numéro 4 [0,6 m-0,8 m]. La valeur calculée en RANS de 1,2 m (visible sur l'illustration 3.2) paraît donc surestimer la taille de la recirculation

externe. Il pourrait être argumenté que ce résultat de 1,2 est une valeur moyenne et qu'il y peut y avoir une variation de +/- 60 cm par rapport à ce point d'arrivée de la flamme ; mais visiblement la flamme était stable et ne présentait pas ces variations. On peut conclure de ces observations que la zone de recirculation externe est d'une amplitude trop importante dans le calcul.

3.4.4 Températures : mesures et modélisation

La figure 3.4 présente les points de mesure par thermocouple présentés sur une cartographie de température obtenue par modélisation.

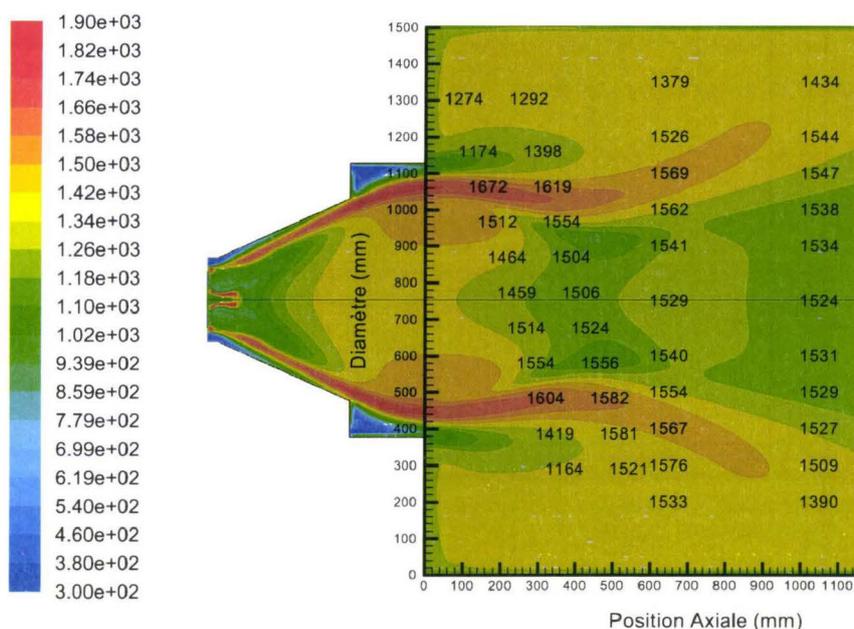


FIGURE 3.4 – Températures mesurées (valeurs)(K) et températures calculées (couleurs)(K)

Dans cette série de mesure, il a été possible de faire une quatrième ligne de mesures pour la température. On observe près du réfractaire de l'ouvreau une zone de forte température : elle correspond à la zone de combustion des matières volatiles et des particules utilisées pour les suies (voir 3.8 page 57). L'utilité de ces particules est de consommer l'oxygène avant l'oxydation complète des matières volatiles. Par conséquent, lors de l'arrivée du mélange de gaz et de particules dans la zone d'air III, les matières volatiles qui restaient imbrûlés se consomment en même temps que le résidu carboné des particules. Les particules sont ensuite propulsées par l'inertie vers la paroi du foyer. Une partie des particules reste coincée dans la zone de recirculation externe, l'autre part en rotation en direction de la sortie du foyer. On observe dans l'ouvreau, à proximité des arrivées d'air I et II une zone relativement froide : c'est une zone à faible vitesse où la recirculation est stoppée par l'entrée de l'air primaire et secondaire. C'est une zone de mélange entre les gaz brûlés et les premiers gaz dévolatilisés, l'oxygène y est vite consommé, la zone est réductrice. C'est ce qui, dans un système à l'équilibre explique une faible température alors que l'on est en présence majoritairement de gaz brûlés. En pratique, la chaleur des gaz brûlés aide à la dévolatilisation. Une autre zone de faible température se trouve au niveau de la ligne de mesure L2, dans la zone de recirculation. Il s'agit encore d'un artefact lié à un mélange pauvre en oxygène dans une chimie à l'équilibre.

La figure 3.5 présente, sur les 4 lignes, les résultats des mesures de la température par thermocouple, associées aux températures modélisées.

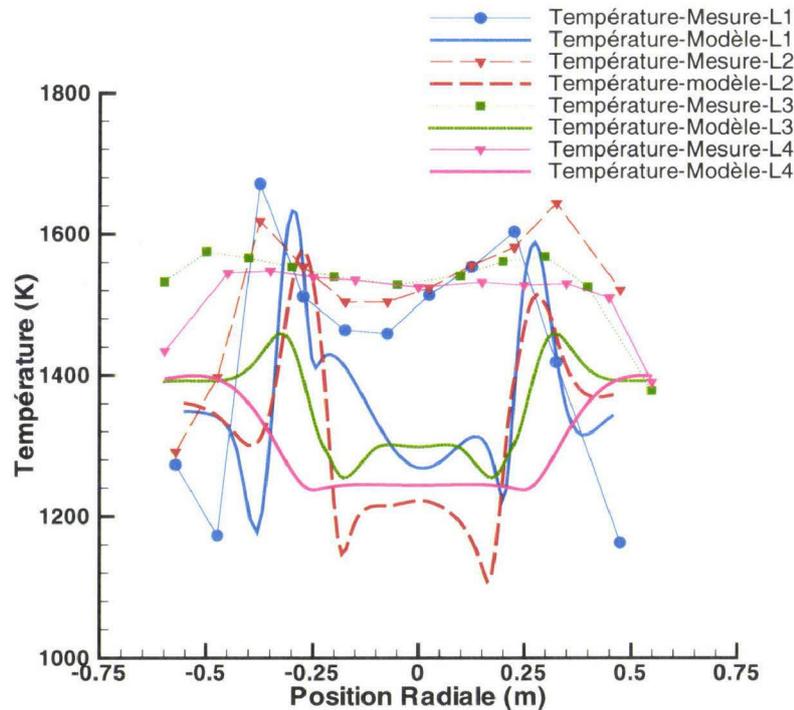


FIGURE 3.5 – Températures des lignes de mesure et modélisation

On observe que les températures dans la zone de recirculation interne sont toutes sous évaluées. Cependant, les pics de température des lignes L1 et L2 correspondent à 100 K près de différence entre modèle et mesure. Il est aussi important de noter que la température au niveau des maximums décroît plus vite dans le modèle que dans la réalité, pour arriver à des valeurs très inférieures à la mesure pour les lignes L3 et L4. Il y a une différence de température importante au niveau de la cheminée, 1230 K pour le modèle 986 K pour la mesure.

3.4.5 Validation du système de mesure de la température

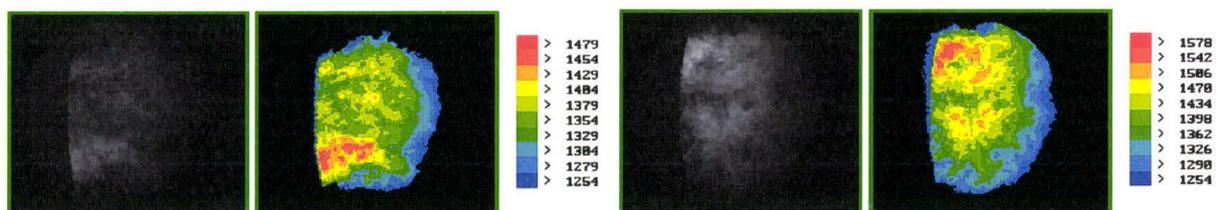


FIGURE 3.6 – Deux résultats instantanés de mesure de température par imagerie deux couleurs. Chaque résultat montre, de gauche à droite l'image traitée, sa conversion en une cartographie de température et la légende associée en °C.

La figure 3.6 montre deux résultats de mesure instantanée de température par le système à

deux couleurs. On aperçoit sur ces deux instantanés des zones de température plus élevée. Afin de pouvoir comparer avec les mesures réalisées sur 5 minutes par les thermocouples et avec les calculs moyennés en RANS, 60 images de température sont moyennées. On obtient une image du type de la figure 3.7. On observe une flamme qui n'est pas symétrique. On peut interpréter cette forme de zone de flamme comme étant définie par l'arrivée de particules avec un mouvement de swirl. Dans certains cas on les voit disparaître avant la fin du champ de visibilité. Ce qui veut dire qu'elle sont soit trop froides pour être détectées, soit complètement brûlées.

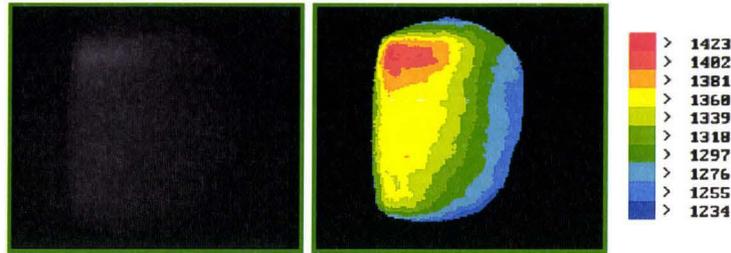


FIGURE 3.7 – Résultat moyenné sur 10 minutes de mesure de température par imagerie deux couleurs en °C

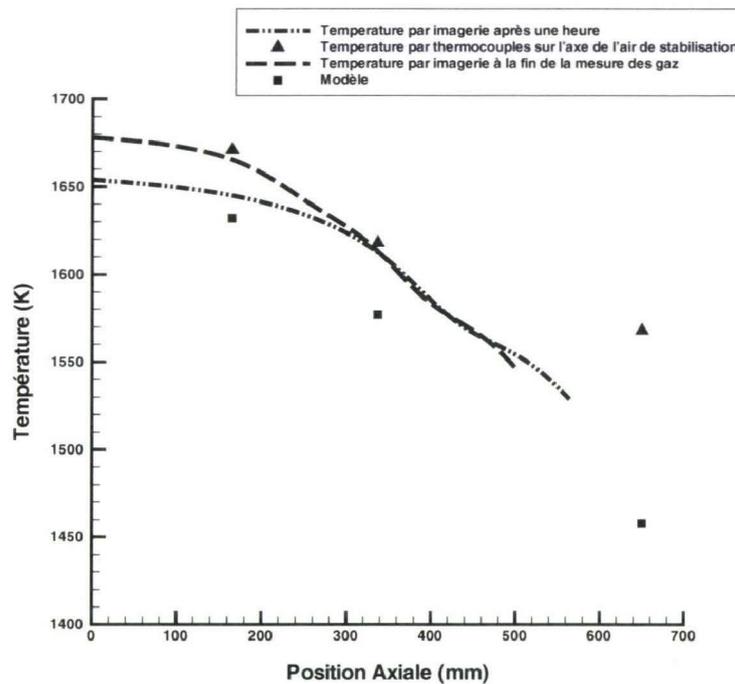


FIGURE 3.8 – Comparaison des deux types de mesure de température et du modèle

La mesure par imagerie représente l'intégration d'un volume sur une surface et la mesure par thermocouple se fait sur des points qui définissent un plan horizontal. Puisque la zone chaude paraît localisée, on prend les points les plus chauds de chaque ligne de mesure, ce qui correspond à la zone d'oxydation par l'air III, pour les comparer avec les températures de la ligne horizontale médiane des images de température sur la figure 3.8. Une mesure de température par imagerie est faite une heure après les changements de paramètres du brûleur, juste avant les mesures dans

la flamme avec la sonde intrusive ; une autre mesure est faite juste après les mesures par sonde. Les points du modèle correspondant aux points de mesure sont aussi ajoutés.

Le modèle avec les particules de « suies » est le seul à présenter une tendance de température décroissante juste à la sortie de l'ouvreau. La figure 3.8 montre que la concordance entre les deux types de mesure est excellente. L'écart entre les deux mesures ne paraît pas être différentiable de la variabilité de la flamme dans la zone de détection de la température par la caméra. Cela signifie que la différence de température entre les gaz et les particules émissives est faible. On sait que les particules se refroidissent lorsque elles émettent un rayonnement de type corps noir. E. Therssen a observé que les particules de charbon Freymining étaient de 200°C inférieures à la température des gaz environnants lors d'une pyrolyse en atmosphère très légèrement oxydante^{[23][24]}. On peut donc supposer que les particules émissives sont en équilibre thermique avec les gaz, ce qui implique soit une conductivité thermique très grande, soit des particules de petite taille. Dans notre ensemble on a deux types de particules susceptibles d'émettre le rayonnement : les particules de charbon et les suies. On suppose donc que l'on observe les suies en cours de combustion.

3.4.6 Dioxygène

La figure 3.9 montre les fractions molaires de dioxygène obtenues par mesure et par modélisation.

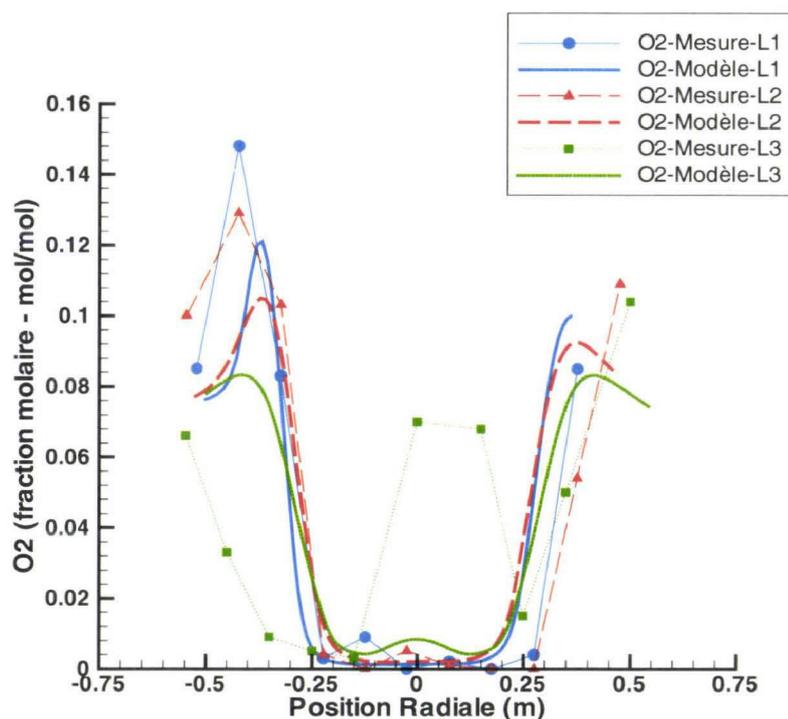


FIGURE 3.9 – Fraction molaire de O_2 des lignes de mesure et modélisation

La première observation est que la troisième ligne L3 de mesure présente le plus de différence entre mesure et modèle. On observe entre $-0,25\text{m}$ et $-0,6\text{m}$, une différence qui peut s'expliquer facilement si la flamme entre en contact avec la paroi du foyer plus tôt que calculé par le modèle : la position du front de flamme n'est pas correctement modélisée.

Toujours au niveau de la ligne L3, dans la partie centrale, deux points ressortent particulièrement avec 7% d' O_2 alors que tous les autres points sont à 0% dans la zone de recirculation. On n'observe pas sur la ligne L2, en position radiale équivalente, de concentration d'oxygène significative alors que l'écoulement se fait dans le sens de L3 vers L2 dans la zone de recirculation. Il est peu probable que la zone de recirculation s'arrête précisément entre les ligne L2 et L3 ou que le flux d'air soit suffisamment localisé pour passer précisément par les deux points distants de 20 centimètres sur la ligne L3 mais nettement à coté de la ligne de mesure L2 qui est à 20 cm de distance. Une hypothèse crédible pour expliquer la différence en oxygène entre la ligne L2 et L3, serait une perturbation de l'écoulement par la sonde qui changerait en fonction de l'angle d'inclinaison de la canne. En effet, une mesure est faite perpendiculairement, une autre est faite en diagonale. Puisque dans la zone de recirculation il n'y a que deux points avec de l'oxygène, et que l'ouverture de la fenêtre par laquelle les deux lignes de mesure sont faites est plus proche des points de mesure de L3, on peut supposer que ce sont ces deux points qui sont faussés.

Il est aussi à noter que la sonde devrait être placée face à l'écoulement. La sonde est placée dans un écoulement tourbillonnant fortement turbulent ; l'aspiration se fait donc rarement dans le sens de l'écoulement.

La figure 3.10 montre la cartographie calculée de l'oxygène.

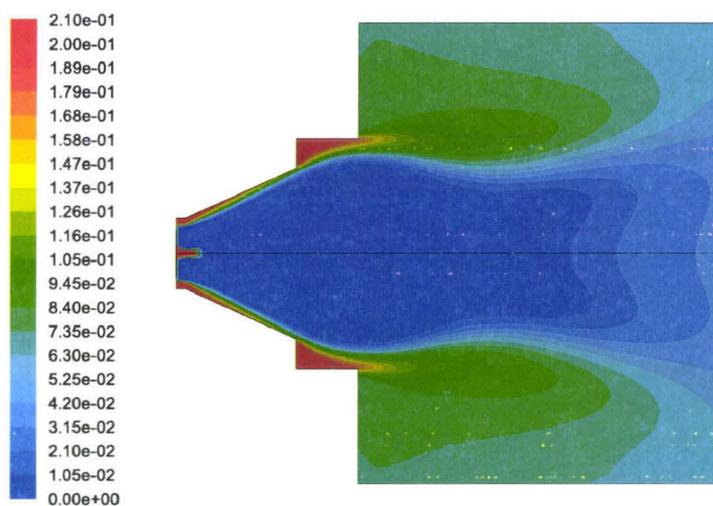


FIGURE 3.10 – Modélisation de la fraction molaire d'oxygène dans le four

On observe une petite quantité de dioxygène qui passe dans la zone de recirculation (direction axiale – sens : gaz brûlés vers brûleur) pour être consommée avec les gaz et particules provenant de la zone de combustion liée à l'air III.

3.4.7 Dioxyde de carbone

La figure 3.11 montre les fractions molaires de dioxyde de carbone obtenues par mesure et par modélisation.

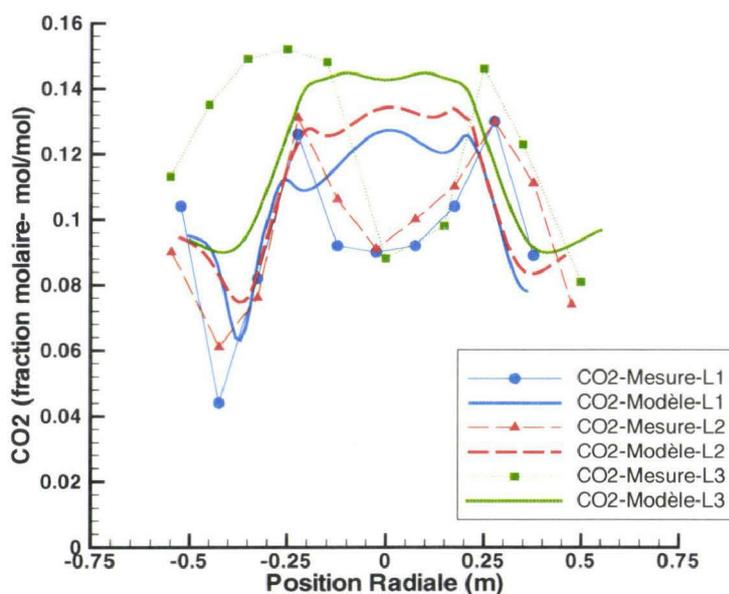


FIGURE 3.11 – Fraction molaire de CO_2 des lignes de mesure et modélisation

Les valeurs de CO_2 de la figure 3.11 sont cohérentes dans les zones oxydantes avec les mesures d'oxygène. Les deux points qui posent problème sur la ligne L3 paraissent aux mesures sur la ligne L3 paraissent aux mesures sur le même axe vers le brûleur de la ligne L1 et L2; ils pourraient aussi être liés avec les quantités de CO_2 mesurées sur les côtés du four. On observe, dans la partie réductrice, un manque au bilan oxygène sur CO_2 et O_2 qui s'explique facilement en observant les résultats du monoxyde de carbone sur la figure 3.12.

3.4.8 Monoxyde de carbone

On observe, dans la zone réductrice, une présence de monoxyde de carbone, ce qui explique simplement la diminution de CO_2 dans cette zone. Avant de discuter du modèle, il est particulièrement important de noter qu'un modèle à l'équilibre n'est pas adapté pour le CO . CO a été inclus pour respecter PCI et composition élémentaire simultanément. Un modèle à l'équilibre prédit de façon instantanée les taux de formation et de disparition de CO qui physiquement ne sont pas instantanées; on induit donc différentes erreurs : dans un milieu oxydant on obtient pour le CO des résultats proches de zéro, et dans un milieu réducteur on obtient une surestimation. Or dans la zone de recirculation réductrice, on obtient une sous-estimation du CO par le modèle, on observe aussi en comparant la somme des fractions molaires de CO_2 et de CO mesurées $[20\%]_{mol}$ avec celles modélisées $[17\%]_{mol}$ que la quantité de carbone calculée dans la zone réductrice est insuffisante. C'est cohérent avec le fait que la combustion du résidu se fait avec la même composition élémentaire que les matières volatiles. La méthode standard de Fluent avec

une composition élémentaire globale du charbon sans utilisation d'un jet de particule artificiel donne aussi un total de $[17\%]_{mol}$. Mais il reste 2% d'oxygène dans la zone de recirculation dans ces conditions. Ce qui impliquerait une erreur importante pour la réduction des NO_x .

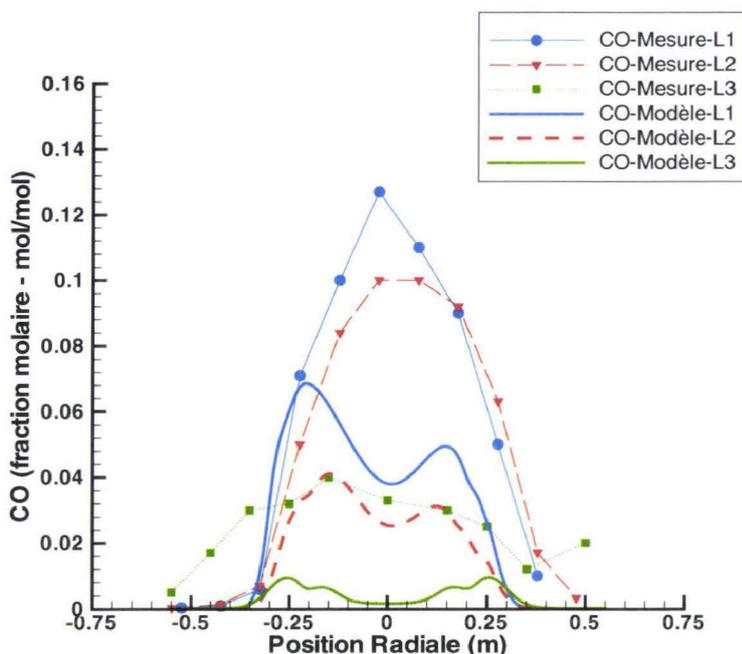


FIGURE 3.12 – Fraction molaire de CO des lignes de mesure et modélisation

3.4.9 Oxyde d'azote

Le calcul du NO -précoce est ignoré car le calcul de Fluent est empirique et particulièrement peu adapté aux zones réductrices, ce qui ne pose pas excessivement de problème puisque le NO -précoce est très minoritaire dans le cas du charbon pulvérisé.

Le calcul des oxydes d'azote est basé sur un champ de température réaliste, la chimie de NO -thermique est bien étudiée. Elle est calculée à partir des équations de Zeldovich ; on peut supposer le calcul de NO -thermique réaliste en zone oxydante.

Le NO -combustible est majoritaire. Le taux de N -volatil a été mesuré par E. Therssen, il est de 0,257 [22]. L'azote relâché est considéré totalement sous la forme de HCN puisque le charbon est un bitumineux d'un rang plutôt élevé. La forme sous laquelle l'azote du résidu carboné est relâché est inconnue. Elle est considérée arbitrairement comme à 50% sous forme de HCN et à 50% sous forme de NO . C'est une valeur constante pour le modèle qui varie probablement en réalité en fonction de la nature oxydante/réductrice du milieu environnant. La partie extérieure du jet de particules est oxydante, car elle rencontre l'air III. La partie intérieure est réductrice.

La réduction passe par HCN et est basée sur les espèces radicalaires CH , CH_2 , CH_3 . Étant donné que la composition élémentaire du milieu réducteur contient plus d'hydrogène et moins de carbone qu'en réalité, cela va induire une erreur sur l'équilibre des espèces. Cependant cette erreur est faible, comparée à celle induite par un milieu où il y aurait encore de l'oxygène.

Les figures 3.13 et 3.14 présentent les cartographies de HCN et de NO obtenues.

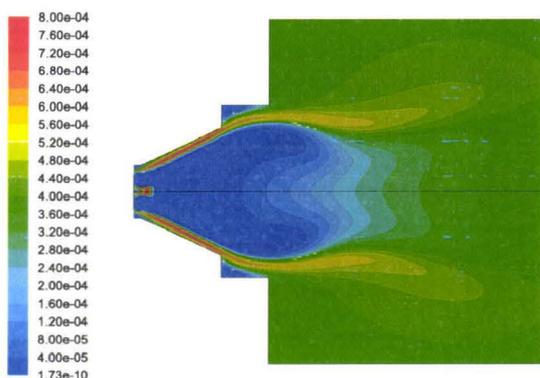


FIGURE 3.13 – Modélisation de la fraction molaire de monoxyde d'azote dans le four

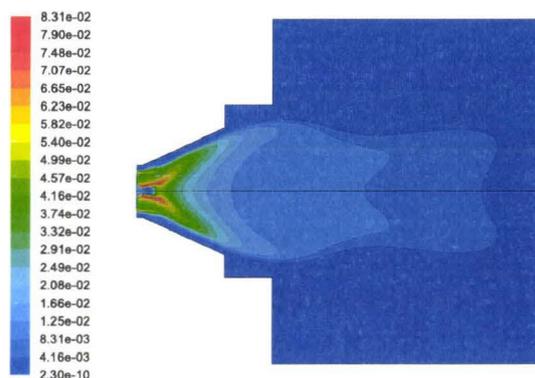


FIGURE 3.14 – Modélisation de la fraction molaire de cyanure d'hydrogène dans le four

La quantité de NO se trouve au niveau des zones de forte température et de passage des particules et devient nulle dans la zone de recirculation interne. On observe une réduction très importante. La quantité de HCN dans la zone de mesure est suffisante pour réduire très vite la totalité de NO . Cette réduction totale des NO est liée à la quantité de HCN du résidu carboné ; si l'azote relâché est sous forme de NO , on obtient des quantités de NO supérieures au niveau de la zone d'oxydation du résidu carboné par l'air III, mais aussi au niveau de la zone de recirculation où on n'observe aucune réduction de NO .

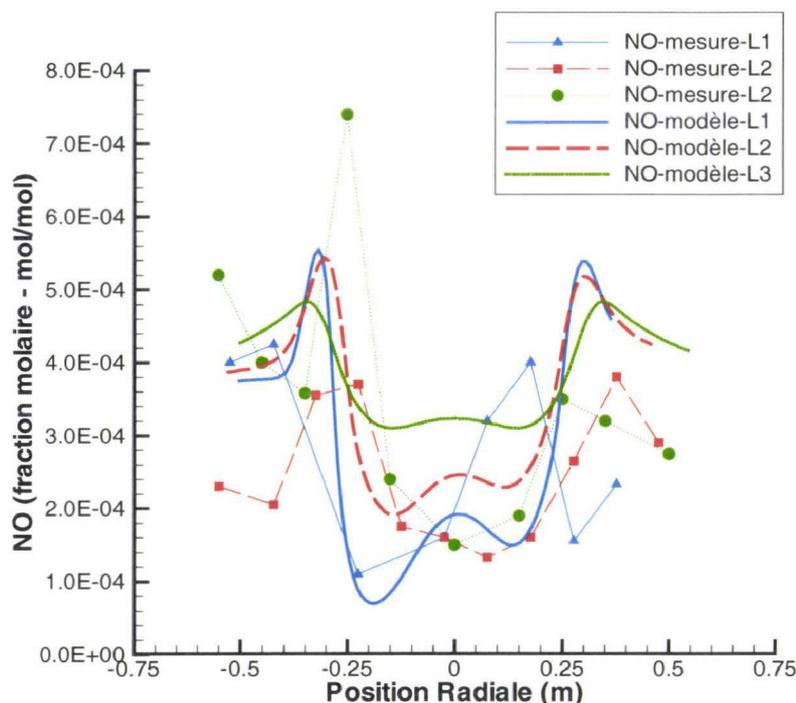


FIGURE 3.15 – Fraction molaire de NO des lignes de mesure et modélisation

La figure 3.15 montre la comparaison entre les mesures de NO et les valeurs modélisées. La

zone réductrice centrale est bien modélisée à 0 % d'O₂ : c'est une nécessité pour observer la réduction des oxydes d'azote par la modélisation.

En cheminée, on mesure 330 ppm de NO, tandis que le modèle donne 280 ppm, cette valeur en bon accord paraît être le fruit d'une coïncidence. En effet, la trajectoire des particules est incomplète, on néglige donc l'impact de la combustion du résidu carboné sur NO.

3.5 Synthèse du chapitre

3.5.1 Validation

- La première série de mesure a permis de tester les instruments du Kent pour leur validation :
- pour le système de mesure de vitesse, on a observé une mesure de vitesse des particules inférieure de 30% à celle des gaz. Ce résultat paraît réaliste sans pour autant démontrer la fiabilité de l'appareil. Par contre ces mesures ont permis de mettre en évidence le comportement de « *roping* » des particules dans la canalisation de l'arrivée de charbon,
 - le système de mesure de la granulométrie a donné des résultats similaires au Malvern, à deux différences significatives : les particules les plus petites ne sont pas dans la gamme de détection de la caméra, les particules les plus grosses n'ont pas été détectées non plus. La zone de mesure est probablement non-représentative de tout l'échantillon.
 - la caméra deux couleurs s'est avérée fiable, grâce à la comparaison des mesures par thermocouple. Elle possède par rapport au thermocouple l'avantage de ne pas être intrusive. Elle a mesuré la température des suies formées.

3.5.2 Représentation de la physique

Cette étude sur la première série de mesures a permis également de mettre en évidence un certain nombre de mécanismes à l'œuvre lors de la combustion du charbon pulvérisé dans le foyer du CERCHAR. En considérant le pouvoir comburivore du charbon et les flux massiques de charbon, d'air I et II, on obtient une stœchiométrie dans l'ouvrage de 0,57 fortement réductrice. Tout le charbon ne brûle pas dans l'ouvrage. On peut par contre aisément considérer une dévolutilisation quasi-complète. En considérant que seuls les matières volatiles brûlent, avec 46% de matières volatiles (massiques), on a une stœchiométrie de 1,06 ; ce qui devrait être suffisant pour une combustion complète. Cependant les particules sont groupées. On a donc vraisemblablement des poches nettement réductrices autour des groupes de particules. On est donc probablement dans le cas d'une combustion dans un « brouillard »^[56]. C'est un milieu propice à la création des suies. On peut aussi avoir localement un milieu oxydant s'il n'y a pas de combustion hétérogène significative. L'ajout de particules pour représenter les suies aide à rendre le milieu réducteur là où passent les particules, peut-être à cause d'une sous-prédiction des matières volatiles, peut-être à cause d'une combustion hétérogène importante dans l'ouvrage. Sans cet ajout artificiel, tous les modèles testés présentent des quantités significatives d'oxygène dans la zone de recirculation et présentent une température croissante avec l'éloignement du brûleur. Dans les modèles présentant de l'oxygène dans la zone de recirculation, les matières volatiles sont déjà brûlés dans l'ouvrage et l'apport de chaleur se fait par la combustion du résidu carboné. Tandis que lorsque l'on utilise un modèle avec une zone réductrice au niveau du passage des particules, il reste des imbrûlés à passer de l'ouvrage à la zone de combustion de l'air III. La vitesse de combustion en phase gaz du modèle est la vitesse de mélange turbulent. On a donc très probablement, physiquement, une combustion contrôlée par le mélange turbulent au niveau de l'arrivée de l'air III.

Deuxième campagne : influence du facteur primaire et du swirl

Contents

4.1	Présentation de la campagne d'essais	70
4.1.1	Objectifs	70
4.1.2	Description	70
4.1.3	Modèles utilisés	71
4.2	Erreurs sur les mesures	71
4.2.1	Calcul des incertitudes	71
4.2.2	Validation par gradient	71
4.2.3	Température des cendriers et température des fumées	71
4.2.4	Bouchage des sondes par le résidu carboné	71
4.2.5	Extinctions	72
4.2.6	Pression	72
4.2.7	Durée de la mesure	72
4.3	Variations de swirl	72
4.3.1	Validation par gradient	72
4.3.2	Écoulement	72
4.3.3	Espèces	74
4.3.4	Température et variation d'intensité lumineuse	75
4.4	Variations de facteur d'air primaire	78
4.4.1	Validation par gradient	78
4.4.2	Écoulement	78
4.4.3	Espèces	80
4.4.4	Température et variation d'intensité lumineuse	80
4.5	Variations combinées de swirl et de facteur d'air primaire	84
4.5.1	Validation par gradient	84
4.5.2	Espèces	84
4.6	Comparaison de l'imagerie de la flamme pour le charbon de Frey- ming et celui de La Loma	85
4.7	Synthèse de l'impact du swirl et du facteur d'air primaire	85

4.1 Présentation de la campagne d'essais

4.1.1 Objectifs

Cette campagne a été prévue pour préparer la campagne de cocombustion et améliorer la compréhension physique du comportement de la flamme en fonction des réglages du brûleur. Pour la cocombustion, les variations de quantité de biomasse entraînent des variations de fraction volatile du combustible. Plus de matières volatiles signifie une combustion plus rapide. Afin de maintenir la flamme poussée loin du nez du brûleur, il faut augmenter la quantité d'air secondaire. Les paramètres du brûleur seront donc changés en même temps que le combustible. Il est donc cherché dans cette campagne à anticiper les effets des changements des paramètres du brûleur pour ne pas les confondre avec les effets des variations de combustible.

4.1.2 Description

Le fonctionnement du brûleur a été étudié. On a procédé à des variations de swirl à facteur d'air primaire constant, à des variations de facteur d'air primaire associées à une légère variation du nombre de swirl puisque le débit d'air secondaire qui passe entre les plaques ventelles change. De plus, les variations de swirl et de facteur d'air combinés ont été testés. La figure 4.1 montre les différents swirls et facteur d'air primaires testés.

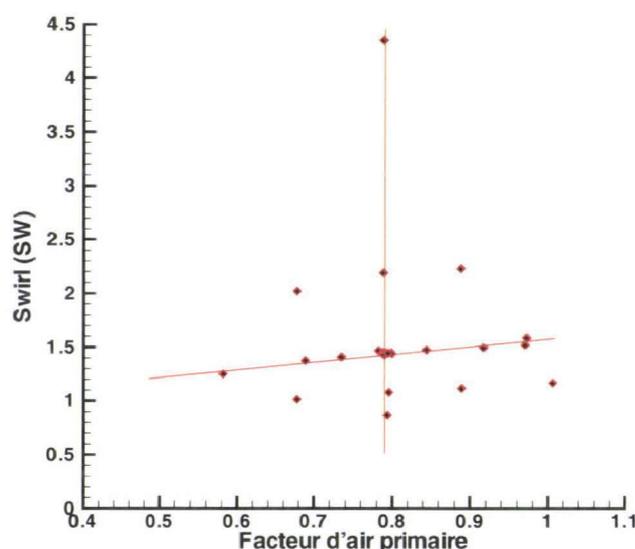


FIGURE 4.1 – Paramètres de swirl et de facteur d'air primaire utilisés pour le brûleur

Comme un nombre important de configurations du brûleur a été testé, le temps n'a pas été disponible pour faire des mesures dans la flamme, les mesures sont faites en cheminée pour les espèces et températures par thermocouple, les trois systèmes de mesure de l'université du Kent sont utilisés. Les systèmes de mesure sur les particules dans la veine d'alimentation ne donnent pas de résultats nouveaux vis-à-vis des résultats obtenus sur le charbon de Freyning, ils ne seront pas présentés dans ce travail, le système optique de mesure de la température de la flamme est systématiquement utilisé.

4.1.3 Modèles utilisés

Les modèles utilisés sont similaires au calcul fait pour la première campagne de mesure avec le charbon de Freyming vu en 3.3 page 53. Il s'agit d'un calcul RANS axisymétrique avec une chimie à l'équilibre calculée par une fonction de probabilité de présence. La trajectoire des particules a aussi été raccourcie. Cependant, les données disponibles pour le charbon de La Loma ne sont pas aussi nombreuses que celles sur le charbon de Freyming. On utilise donc les mesures par balance thermogravimétrique pour la quantité des matières volatiles. La quantité des matières volatiles du modèle est donc inférieure à la réalité. On utilise aussi la méthode dite empirique de Fluent pour calculer la composition des matières volatiles ; ce qui donne des matières volatiles et un résidu carboné qui possèdent tous les deux la même composition élémentaire que le charbon initial. CO a été exclu de la composition des matières volatiles afin de limiter un éventuel retour sur le chemin réactionnel. La richesse dans la flamme est donc faussée pour les modèles.

4.2 Erreurs sur les mesures

4.2.1 Calcul des incertitudes

L'incertitude des instruments est très faible comparativement à une mauvaise répétitivité des expériences. Par conséquent, les incertitudes ont été calculées par répétitivité à partir d'un même point de mesure (conditions de facteur d'air primaire et de swirl identiques) appelé point de référence. Un point de référence a été refait entre chaque changement des paramètres du brûleur. Les incertitudes donnent donc la variabilité des mesures sur des conditions voulues identiques.

4.2.2 Validation par gradient

La méthode utilisée d'incertitude par répétitivité donne des incertitudes de grande amplitude. Cependant lors d'un changement des paramètres, on voit, dans certains cas, un brusque changement dans les mesures obtenues. On peut donc, même sans avoir une bonne validité absolue, donner une validité relative précise entre deux mesures.

4.2.3 Température des cendriers et température des fumées

Il a été observé que la variation de température des fumées est fortement corrélée à la température des cendriers. On observe lors des démarrages de la flamme charbon une augmentation de la température des cendriers qui est corrélée à l'augmentation de la température des fumées. Par la suite les deux températures atteignent un palier plus ou moins stable en fonction des conditions de combustion. La première flamme, une flamme de référence, faite vers la fin de cette augmentation de la température, a été systématiquement éliminée. Il a aussi été observé que la température des fumées entre les points de référence d'une même journée différaient faiblement et qu'il y avait une différence d'une quinzaine de degrés entre deux journées. Il semble que les variations de température en cheminée soient plus représentatives de la combustion du résidu carboné dans les cendriers que de la flamme. La mesure directe de la température de la flamme par pyrométrie deux couleurs est plus facile à reproduire.

4.2.4 Bouchage des sondes par le résidu carboné

La sonde de mesure est restée pendant de longues périodes au niveau de la cheminée. Les sondes de mesure des espèces ont régulièrement été nettoyées par injection d'air comprimé à

contre-flux. Lors des nettoyages avec la sonde sortie du foyer, un panache de poussière noire a été systématiquement observé; il y a eu accumulation de résidu carboné dans la sonde juste avant la cheminée. De plus, on observe une dérive de la mesure de CO_2 et de O_2 avec le temps, cette dérive est remise à zéro juste après le nettoyage de la sonde. Les mesures de monoxyde de carbone et d'oxyde d'azote paraissent moins affectées par ce phénomène relativement aux variations induites par les changements de swirl et de facteur d'air primaire. On exploitera de préférence les résultats de CO et NO en cheminée.

4.2.5 Extinctions

Les premières mesures ont été faites avec la volonté d'avoir un temps de stabilisation suffisant afin de pouvoir utiliser les données de récupération de la puissance par les boucles de refroidissement. Cependant pour un cas de stœchiométrie élevée, la température du cendrier a fini par diminuer de $300^\circ C$ à $170^\circ C$, température à laquelle la flamme s'est éteinte. Par la suite, les mesures ont été faites sur des temps plus courts qui ne permettent pas l'exploitation des données de flux thermique des boucles. Cependant, les temps sont suffisamment longs pour la stabilisation de la flamme au niveau de l'ouvrage et le remplissage du cendrier. Cette observation fait aussi penser que la chaleur amenée par la combustion du résidu carboné contenu dans le cendrier contribue partiellement à la stabilisation de la flamme.

4.2.6 Pression

Lorsqu'une fenêtre est ouverte pour examiner la flamme, on observe des changements de pression rapides dans le foyer; ces variations ont été évitées pour le relevé des autres valeurs. Il a été noté une très bonne corrélation entre les variations de mesure de pression et les variations de mesure d'espèces. Les périodes avec la fenêtre ouverte ont été éliminées.

4.2.7 Durée de la mesure

Les valeurs présentées par la suite ont été faites pour la plupart sur 10 minutes, après 10 minutes de stabilisation. Pour quelques points, le temps de mesure est seulement de 5 minutes à cause de l'ouverture d'une fenêtre qui change la pression. Le changement des incertitudes pour ce temps de mesure plus court est faible devant l'incertitude de répétabilité.

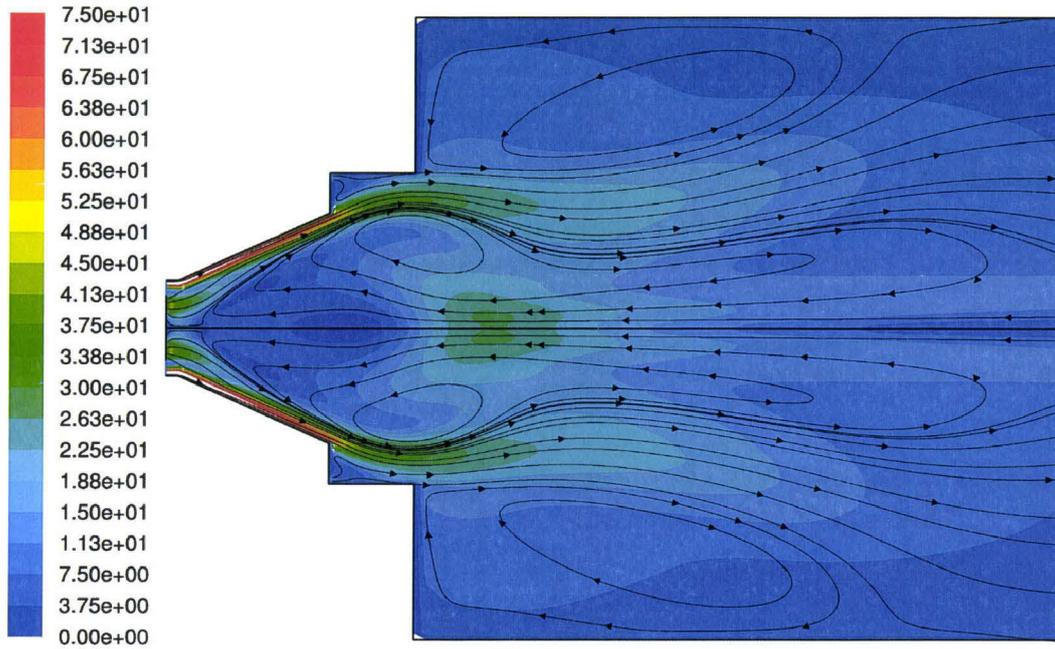
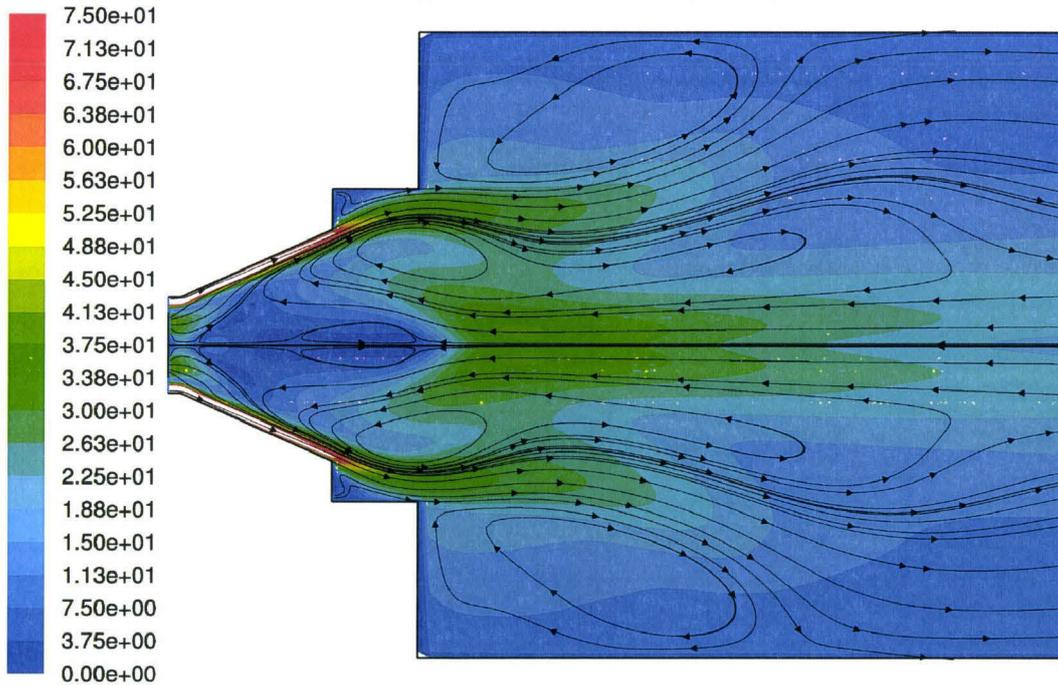
4.3 Variations de swirl

4.3.1 Validation par gradient

Les variations de swirl ont été faites sur deux jours. Les augmentations de swirl ont été faites à la suite, les diminutions à la suite. Par conséquent, les deux points de swirl fort ($SW=4,35$; $SW=2,19$) sont comparables entre eux et les deux points de swirl faible ($SW=0,87$; $SW=1,08$) sont comparables entre eux. Pour les autres points il faut considérer l'erreur de répétabilité afin de pouvoir les comparer.

4.3.2 Écoulement

Les deux figures suivantes présentent avec les couleurs l'amplitude de la modélisation de la vitesse des gaz dans le foyer. L'une avec un swirl faible ($SW=0,87$): figure 4.2, l'autre avec un swirl fort ($SW=4,35$): figure 4.3. Les lignes de courants sont affichées en surimpression.

FIGURE 4.2 – Modélisation de l'amplitude de la vitesse (m.s^{-1}) à swirl faible ($\text{SW}=0,87$)FIGURE 4.3 – Modélisation de l'amplitude de la vitesse (m.s^{-1}) à swirl élevé ($\text{SW}=4,35$)

On observe les composantes en deux dimensions des vecteurs vitesse, mais il manque la composante de rotation. À proximité de la paroi de l'ouvreau, la différence d'intensité de la vitesse est liée à l'intensité du swirl. La vitesse de l'écoulement de la zone de recirculation interne est seulement axiale. On constate que cette recirculation est plus rapide pour le swirl le plus élevé. Ce résultat est tout à fait attendu, cependant on remarque que la profondeur de la pénétration

du flux dans l'ouvrage est stoppée au même endroit. On observe juste une autre recirculation interne qui se crée avec l'augmentation du swirl. Le flux est aspiré latéralement par l'air de swirl. La recirculation externe est plus courte et laisse la flamme arriver plus tôt sur la paroi.

4.3.3 Espèces

Les figures 4.4 et 4.5 présentent les mesures en cheminée des polluants *CO* et *NO* en fonction du nombre de swirl varié par la position de la plaque ventelle.

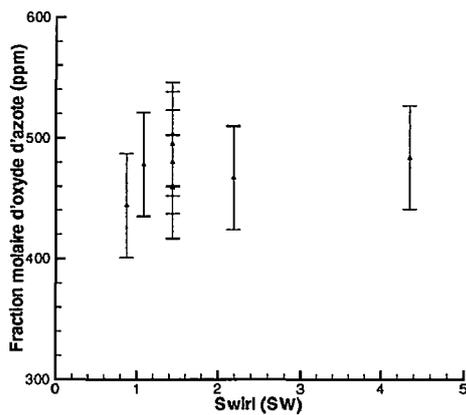


FIGURE 4.4 – *NO* en fonction de SW

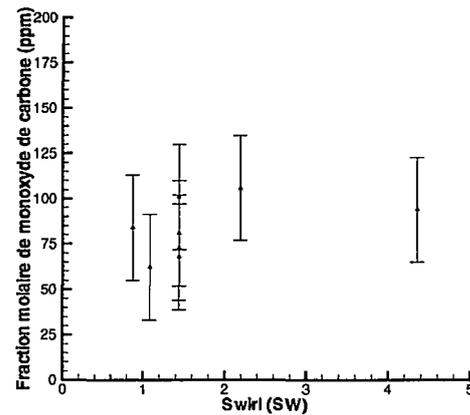


FIGURE 4.5 – *CO* en fonction de SW

Pour les mesures de *NO* et *CO* en cheminée, les variations sont largement incluses dans les barres d'erreur. Par contre, la méthode du gradient est valide et montre nettement une augmentation de *CO* pour le swirl le plus bas (0,87). On observe, moins clairement car plus bruitée, une diminution de *NO*, cette variation est corrélée avec la diminution de la pression contrairement à la variation de *CO*.

4.3.4 Température et variation d'intensité lumineuse

La figure 4.6 présente les images de température sur différents swirls testés avec un facteur d'air primaire constant. On observe un changement de position de la zone de flamme de température maximum. Le maximum de température paraît se trouver en position de plus en plus basse avec le swirl augmentant. La position des particules en combustion change logiquement avec l'augmentation du swirl.

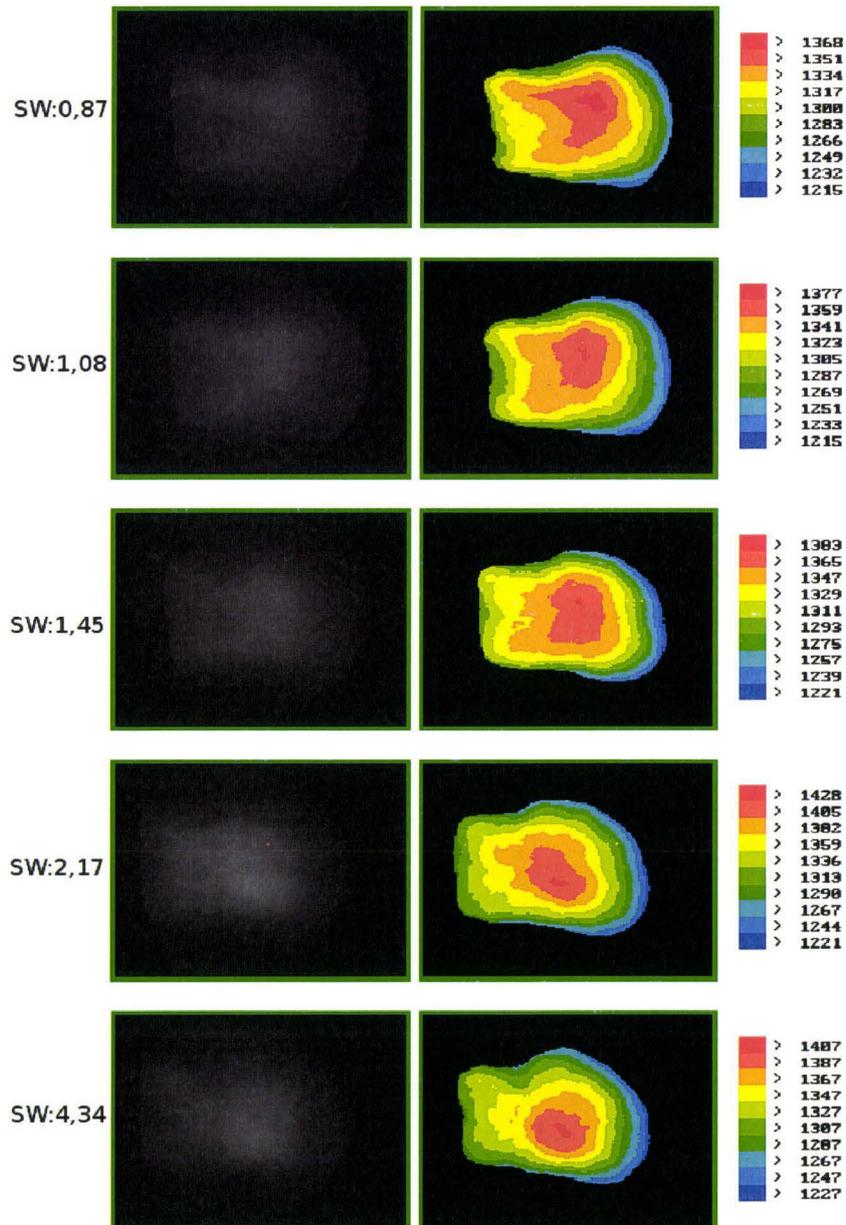


FIGURE 4.6 – Impact des variations de swirl sur la forme de la flamme (°C)

On observe en comparant les figures 4.7 et 4.8 une répartition plus homogène de la température dans le cas du swirl le plus élevé. La zone de recirculation externe ramène plus de chaleur au niveau de l'air tertiaire dans le cas du swirl le plus élevé.

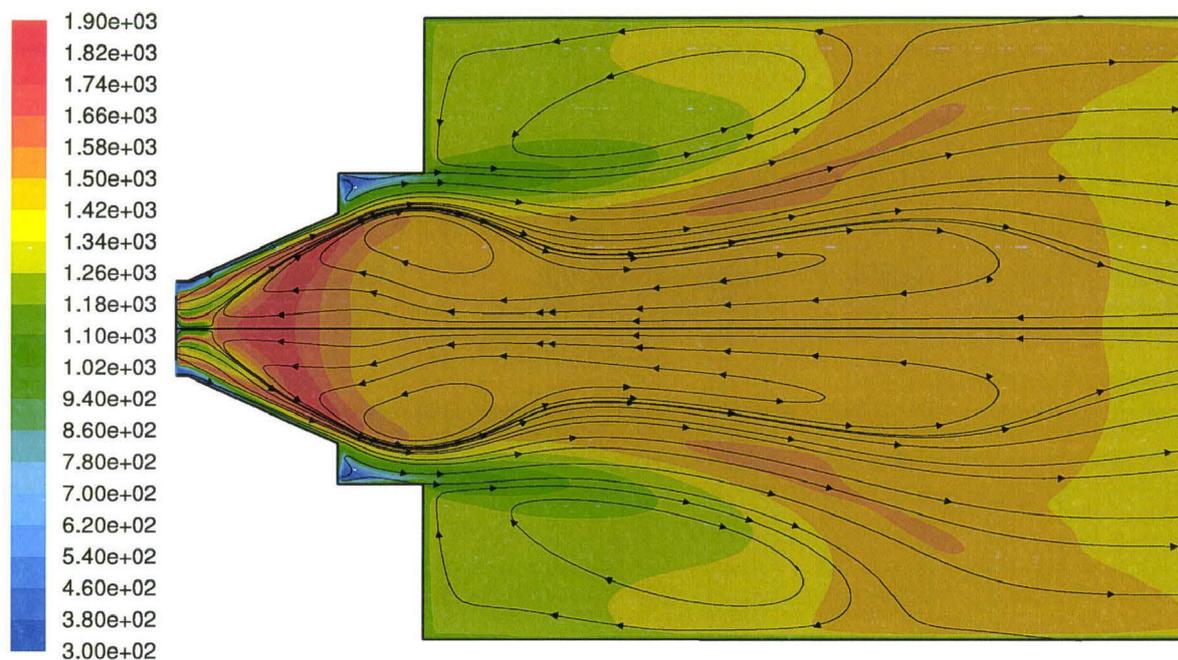


FIGURE 4.7 – Modélisation de la température (K) à swirl faible (SW=0,87)

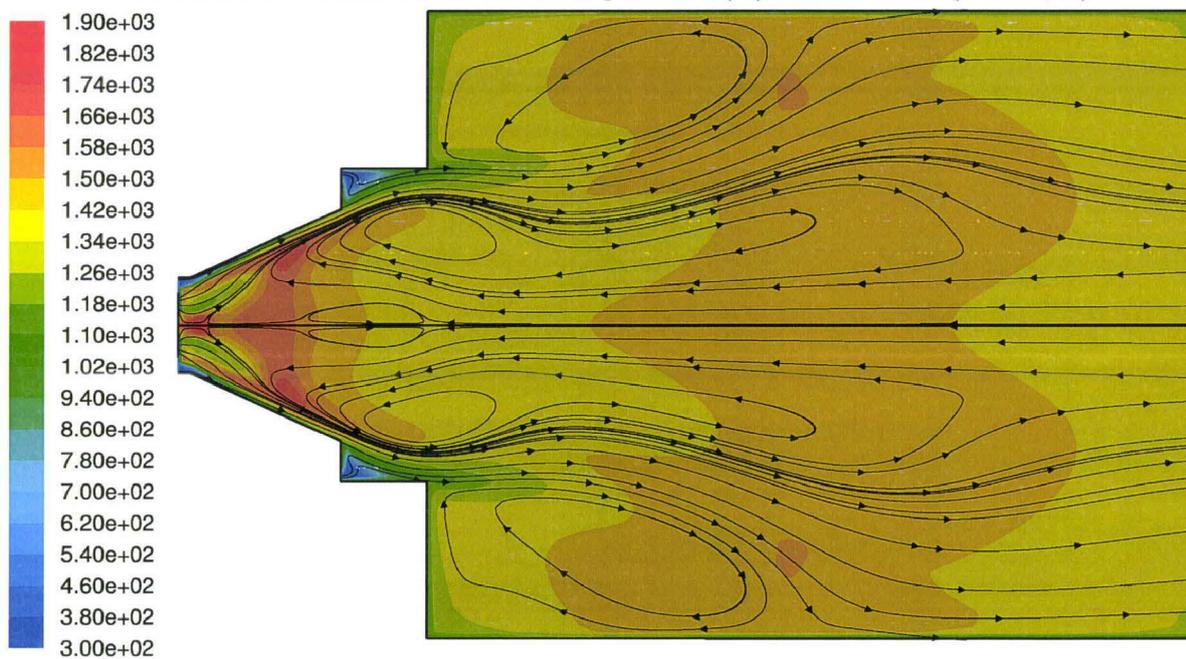


FIGURE 4.8 – Modélisation de la température (K) à swirl élevé (SW=4,35)

Avec le système de mesure de température de la flamme deux couleurs on observe sur la figure 4.9 que la température de la flamme augmente avec le swirl.

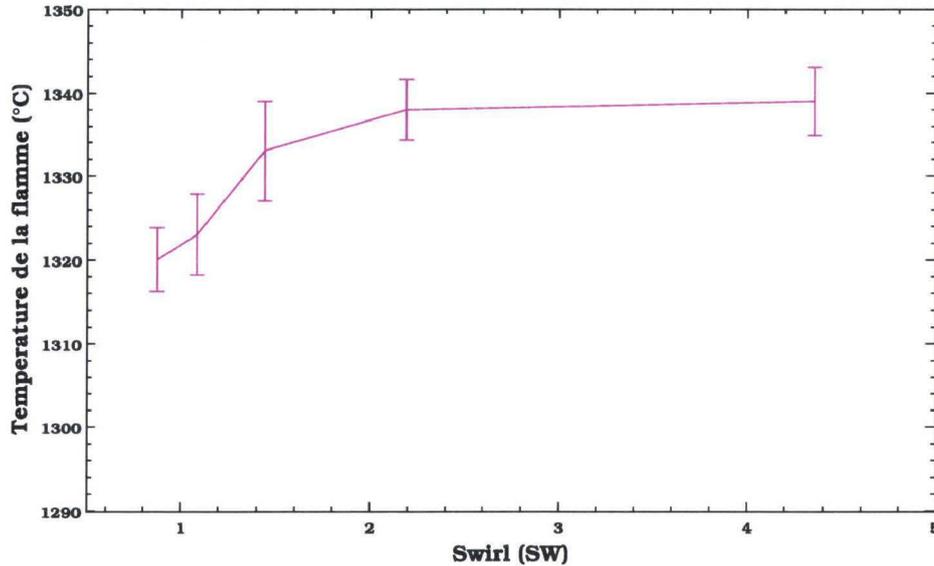


FIGURE 4.9 – Température de la flamme par imagerie en fonction du swirl (SW)

L'augmentation de température avec le swirl, pour un swirl entre 0,87 et 1,44 est significatif. A contrario, pour un swirl plus élevé, le gain de température avec l'augmentation de swirl devient de plus en plus faible.

Pour la variation lumineuse, on observe sur la figure 4.10 une diminution de la fréquence avec l'augmentation du swirl.

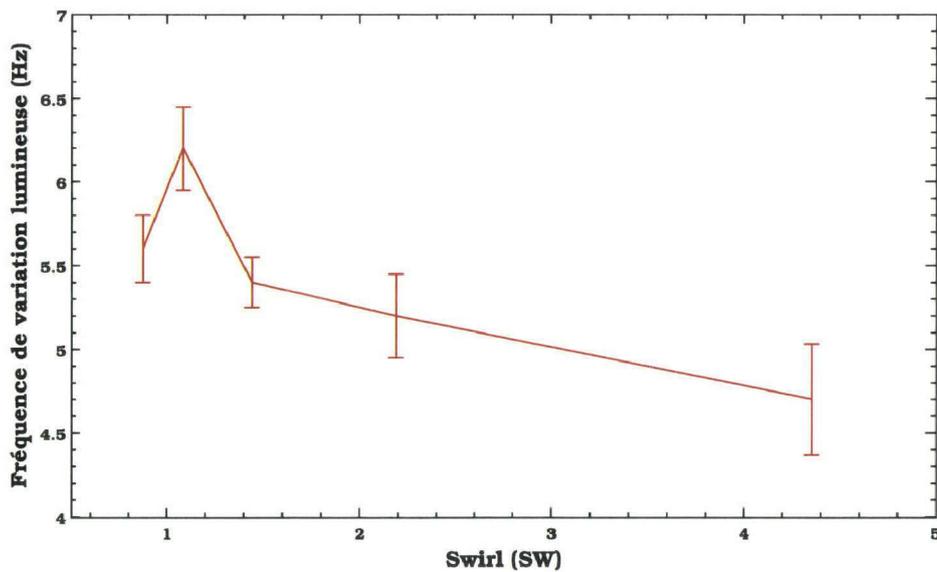


FIGURE 4.10 – Fréquence de variation de l'intensité lumineuse de la flamme en fonction du swirl (SW)

Avec le swirl qui augmente, on s'attend à avoir une flamme plus stable ; il était donc attendu une augmentation de sa fréquence avec le swirl. On observe un point de mesure qui sort de la courbe pour un swirl à 1,08. Ce point est difficile à interpréter, les autres données ne donnent pas d'indications particulière sur cette flamme. Par contre, on note une diminution de pression, une augmentation de la quantité de CO dans les fumées et une diminution de NO lors du passage de cette flamme de swirl 1,08 à la flamme de swirl 0,87.

4.4 Variations de facteur d'air primaire

4.4.1 Validation par gradient

Les deux points de facteur d'air $\lambda_1=0,58$ et $\lambda_1=0,69$ ont été faits à la suite, ainsi que les points à $\lambda_1=0,84$ et $\lambda_1=1,01$, les points $\lambda_1=0,92$ et $\lambda_1=0,98$ de même. Ces points sont comparables entre eux. Pour les autres points il faut considérer l'erreur de répétabilité afin de pouvoir les comparer.

4.4.2 Écoulement

Les variations de facteur d'air primaire entraînent un changement important de l'écoulement. Ce changement est observable sur les figures 4.11 et 4.12. La différence de nombre de swirl n'est que de 0,3 ; on observe pourtant que pour un facteur d'air primaire élevé, la recirculation interne est très importante, plus importante que dans le cas vu précédemment d'un swirl de 4,35. La dimension de la recirculation externe est aussi très affectée puisque les débits d'air tertiaire sont changés.

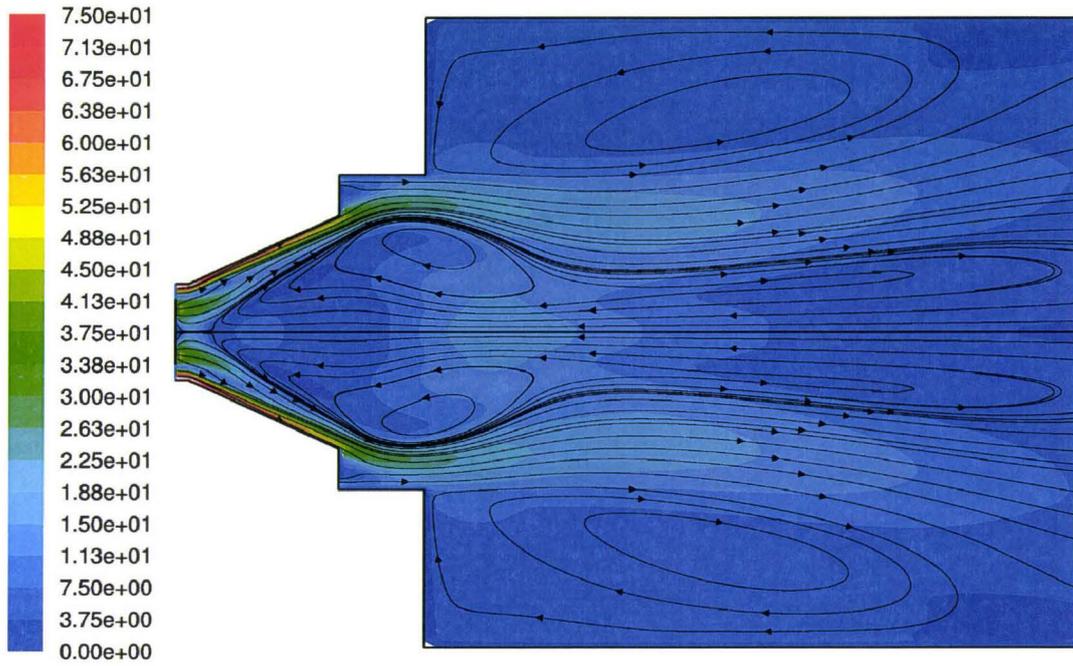


FIGURE 4.11 – Modélisation de la vitesse à facteur d'air primaire faible ($\lambda_1=0,58$)

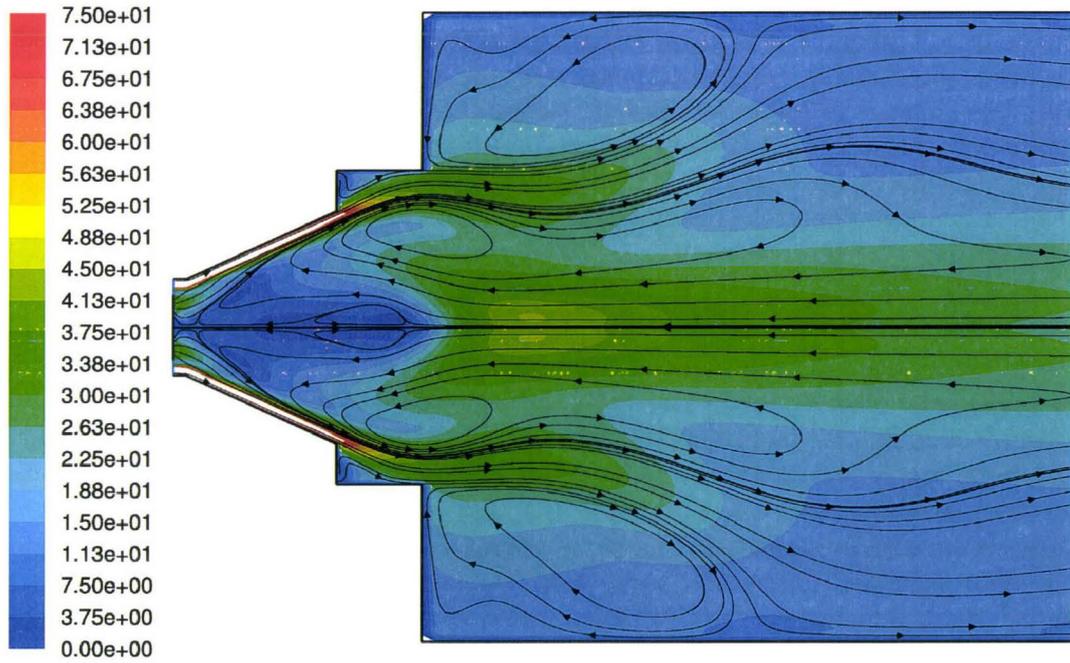


FIGURE 4.12 – Modélisation de la vitesse à facteur d'air primaire fort ($\lambda_1=1,01$)

4.4.3 Espèces

Les figures 4.13 et 4.14 présente les mesures en cheminée des polluants *CO* et *NO* en fonction du facteur d'air primaire.

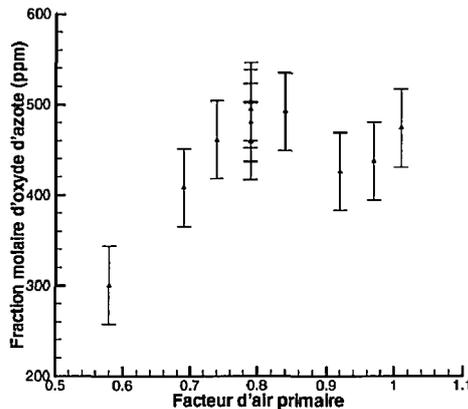


FIGURE 4.13 – *NO* en fonction de λ_1

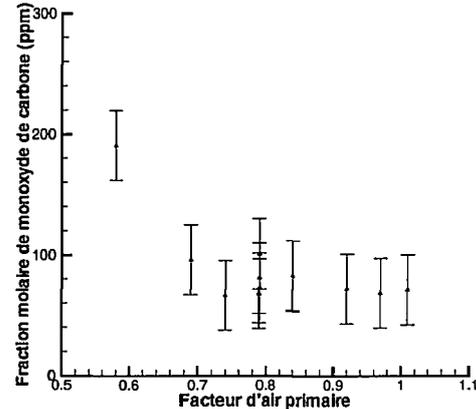


FIGURE 4.14 – *CO* en fonction de λ_1

Pour un facteur d'air primaire entre 0,74 et 1,01, on ne remarque pas de variation significative de *CO*, ni de *NO*. Par contre, lorsque le facteur d'air primaire baisse en dessous de 0,7, on constate par la méthode du gradient, que *CO* commence à augmenter et que *NO* commence à diminuer. Pour une stœchiométrie de 0,58, *CO* passe de 70 ppm à 200 ppm et *NO* de 150 ppm à 300 ppm. On constate donc que la réduction s'active en dessous d'un certain facteur d'air primaire. D'après ce qui a été vu à partir de la modélisation du charbon de Freyming, il s'agit probablement du moment où la quantité d'oxygène devient proche de zéro dans l'ouvrage.

4.4.4 Température et variation d'intensité lumineuse

La figure 4.18 présente les images de température sur différentes stœchiométries primaires avec une position de plaque ventelle constante. Les échelles sont différentes.

L'imagerie de la flamme montre un déplacement de la zone de température maximum. Cette zone correspond probablement à une zone de combustion importante des suies et à la localisation de groupes de particules.

On observe un déplacement de la zone de température maximum du haut vers le bas lorsque le facteur d'air primaire augmente comme avec l'augmentation du swirl. Le swirl augmente avec l'augmentation du facteur d'air primaire, puisque le débit d'air secondaire augmente. Le nombre de swirl calculé ne change que faiblement ($\Delta SW=0,3$) bien que la position du passage des particules paraisse affecté de la même manière que pour les changements de plaque ventelle ou le nombre de swirl change grandement ($\Delta SW=3,48$). On remarque aussi que la zone de température maximum qui est présente dès la sortie de l'ouvrage pour un facteur d'air primaire faible, se trouve de plus en plus distante; probablement en raison de l'augmentation du débit d'air II. On note encore que la surface de mesure de la température de la flamme diminue avec l'augmentation du facteur d'air primaire. On peut en conclure que l'on observe une augmentation de la quantité des suies formées avec la diminution de la quantité d'oxygène disponible dans l'ouvrage.

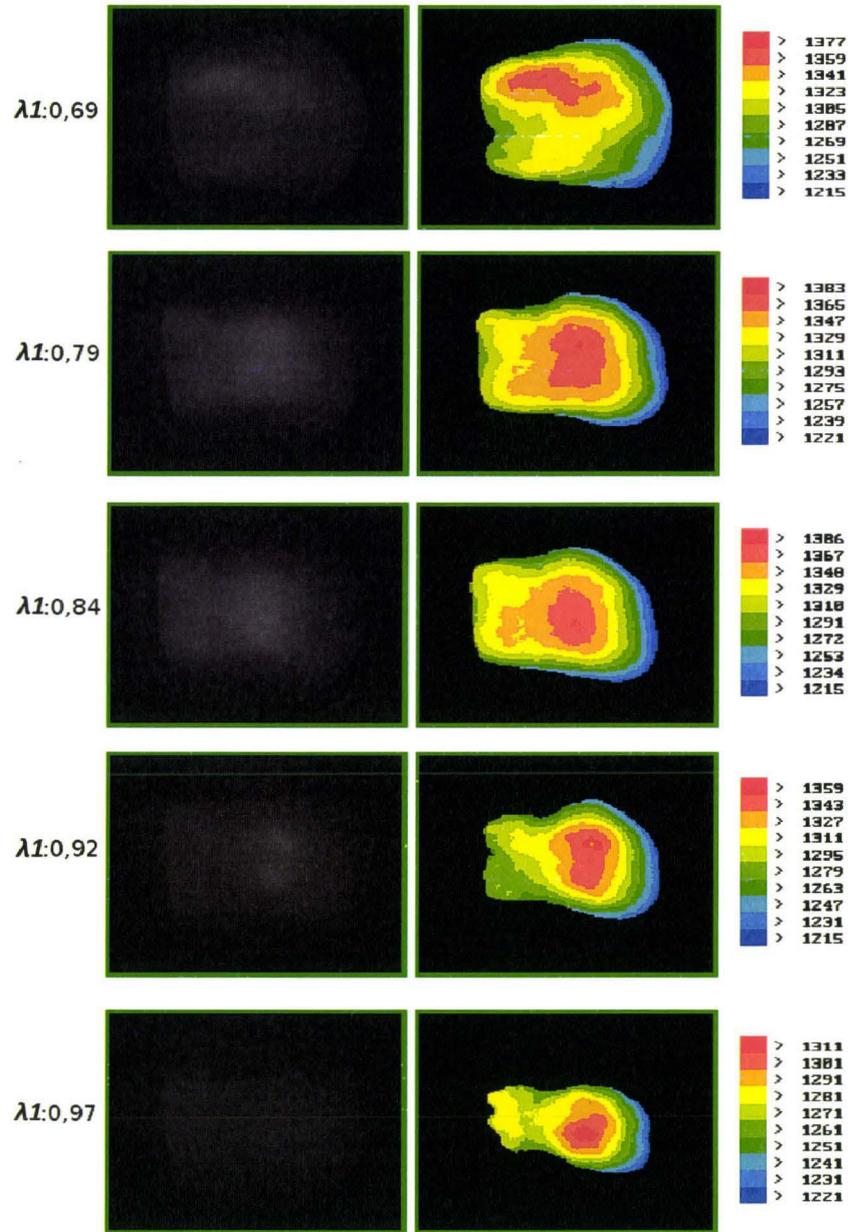


FIGURE 4.15 – Impact des variations de facteur d'air primaire sur la forme de la flamme (°C)

Les figures 4.16 et 4.17 présentent la modélisation de la température à deux swirl différents. On observe une flamme plus diffuse à facteur d'air primaire élevé due au manque d'air de stabilisation. Pour le facteur d'air primaire faible, on observe une flamme plus chaude. C'est un artefact lié à la combustion complète du combustible alors qu'en réalité, on est en présence de suies et probablement de monoxyde de carbone.

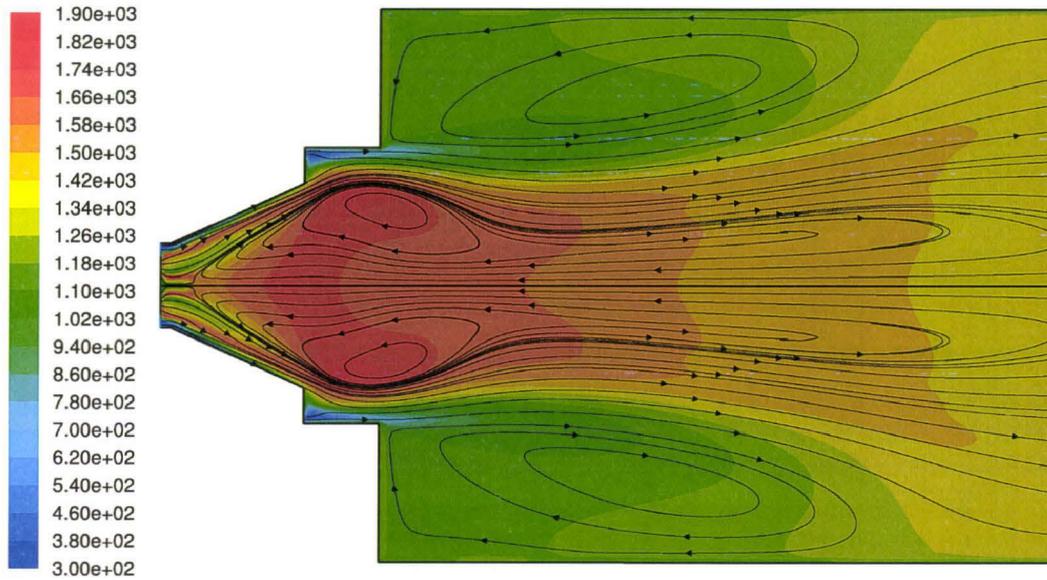


FIGURE 4.16 – Modélisation de la température (K) à facteur d'air primaire faible ($\lambda_1=0,58$)

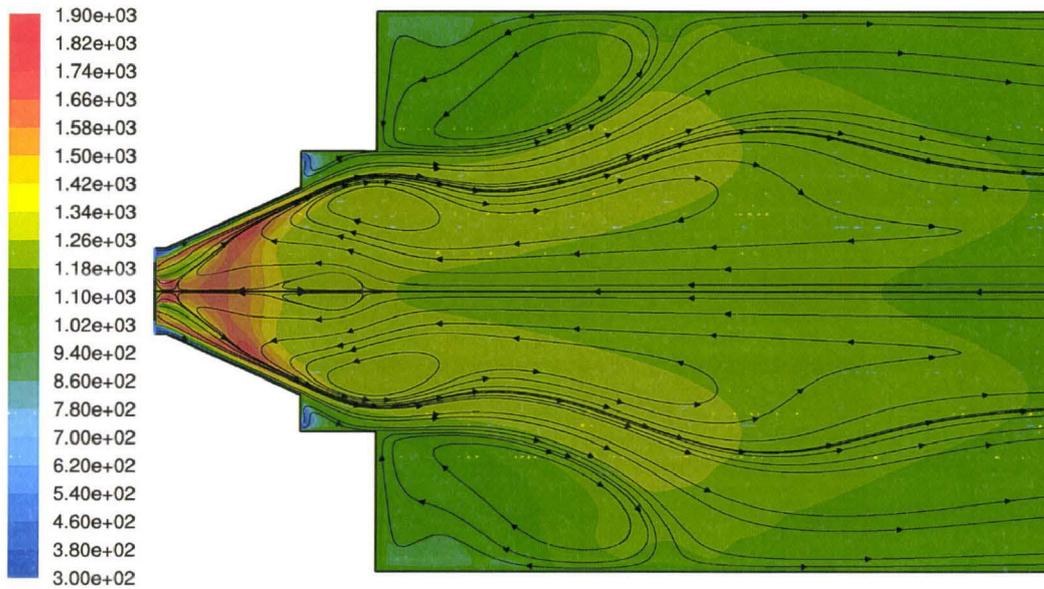


FIGURE 4.17 – Modélisation de la température (K) à facteur d'air primaire élevé ($\lambda_1=1,01$)

La figure 4.18 présente la température moyenne de la flamme mesurée par pyrométrie deux couleurs. On observe un maximum de température pour la flamme de référence ($\lambda_1=0,79$). Lorsque l'on augmente ou diminue le facteur d'air primaire, on observe une diminution de la température. Lorsque l'on diminue le facteur d'air primaire, on forme plus de CO et de suies ce qui diminue la température. Lorsque l'on augmente le facteur d'air primaire on diminue le temps de résidence dans l'ouvreau, ce qui laisse moins de temps pour les particules de se dévolatiliser et fournit moins de chaleur à l'ouvreau. Il a été observé une extinction pour le facteur d'air le plus élevé ($\lambda_1=1,01$).

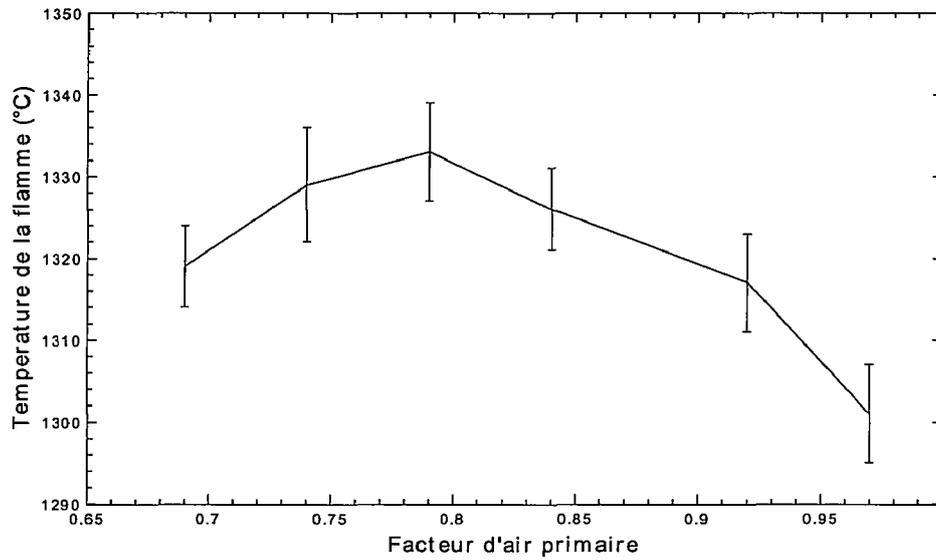


FIGURE 4.18 – Température de la flamme par imagerie en fonction du facteur d'air primaire

La figure 4.19 présente les fréquences de variation lumineuse faites pour caractériser la stabilité de la flamme.

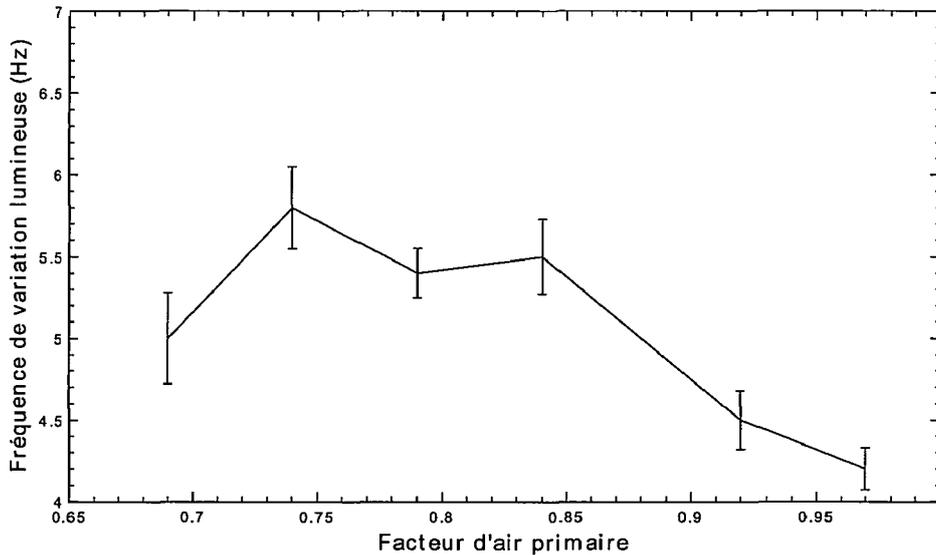


FIGURE 4.19 – Fréquence de variation de l'intensité lumineuse de la flamme en fonction du facteur d'air primaire

Les variations de fréquence d'intensité lumineuse correspondent aux variations de température de la flamme. Les flammes avec les facteurs d'air primaires les plus forts ou les plus faibles sont susceptibles d'extinction. On mesure bien une fréquence de variation lumineuse faible dans ces cas.

4.5 Variations combinées de swirl et de facteur d'air primaire

4.5.1 Validation par gradient

Pour le facteur d'air 0,68 la position de la plaque ventelle a été changée en gardant les débits identiques. Les points de facteur d'air 0,68 sont comparables entre les figures 4.20 et 4.22 ainsi que 4.21 et 4.23. De même pour le facteur d'air primaire à 0,87. Les points d'un même graphe sont comparables par l'intervalle de la répétitivité.

4.5.2 Espèces

Les figures 4.20, 4.21, 4.22 et 4.23 présentent les résultats en cheminée des mesures de fraction molaires de CO et NO en fonction des variations de facteur d'air primaire à deux positions de plaque ventelle différentes ($SW=0,87$; $SW=4,35$).

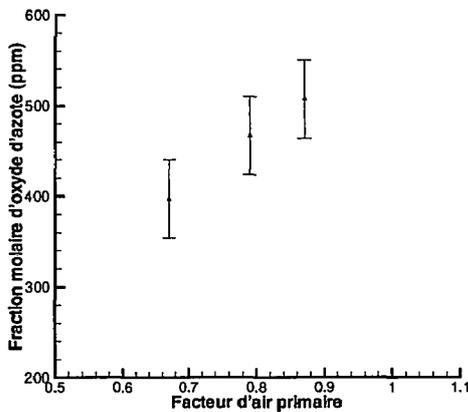


FIGURE 4.20 – Effet du facteur d'air primaire à swirl haut ($SW=4,35$) sur NO

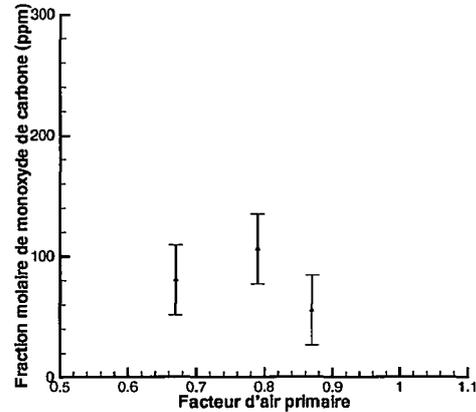


FIGURE 4.21 – Effet du facteur d'air primaire à swirl haut ($SW=4,35$) sur CO

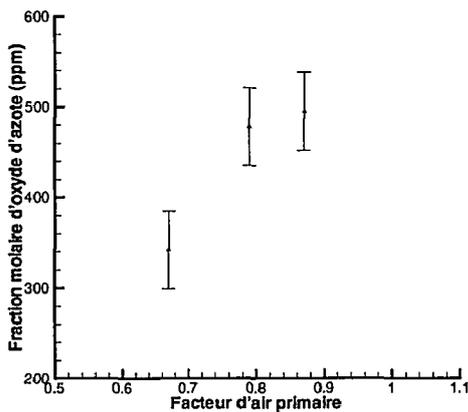


FIGURE 4.22 – Effet du facteur d'air primaire à swirl bas ($SW=0,87$) sur NO

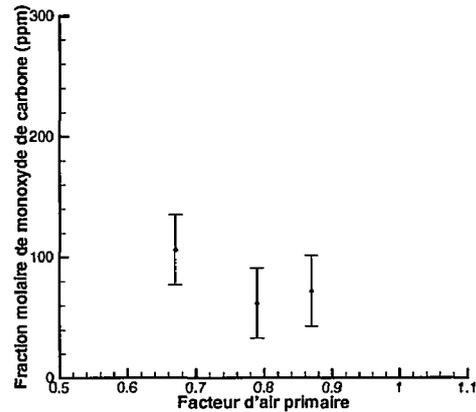


FIGURE 4.23 – Effet du facteur d'air primaire à swirl bas ($SW=0,87$) sur CO

Pour un swirl élevé on observe une diminution de NO qui paraît régulière avec la diminution

4.6. Comparaison de l'imagerie de la flamme pour le charbon de Freyming et celui de La Loma

de la stœchiométrie primaire. Lorsque le swirl est plus bas, l'effet de la diminution du facteur d'air primaire paraît beaucoup plus marqué sur la diminution des NO . On observe en parallèle plus de CO pour un facteur d'air faible avec un swirl bas que pour un facteur d'air primaire faible et un swirl élevé. C'est probablement dû au mélange plus faible qui laisse plus de poches réductrices locales. La mesure de NO à facteur d'air primaire bas et swirl bas (340 ppm) est du même ordre de grandeur que celle à facteur d'air primaire très bas (300 ppm pour $\lambda_1=0,58$). La flamme avec le facteur d'air primaire le plus bas produit 190 ppm de CO tandis que l'autre en produit 105 ppm. On ne dispose que de CO comme information sur la qualité de la combustion de ces deux flammes.

4.6 Comparaison de l'imagerie de la flamme pour le charbon de Freyming et celui de La Loma

On présente ici la combustion de deux charbons différents avec des mêmes réglages de brûleur. Les deux charbons sont ceux de Freyming et de La Loma.

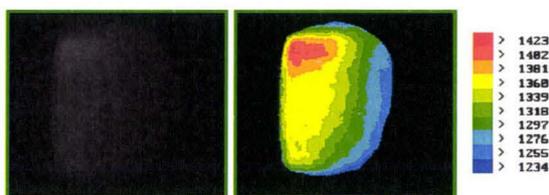


FIGURE 4.24 – Freyming

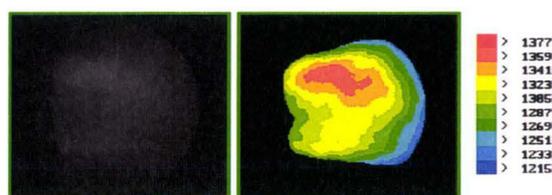


FIGURE 4.25 – La Loma

Imagerie de la température pour deux combustibles différents (Freyming/LaLoma) avec des mêmes réglages brûleurs ($^{\circ}C$)

Pour le charbon de Freyming (figure 4.24) les paramètres du brûleur sont ceux de la flamme de référence. Pour le charbon de (La Loma figure 4.25), les paramètres brûleur correspondent à un facteur d'air primaire faible. Il y a une différence d'angle d'orientation de la camera de 17° entre la mesure sur le charbon de La Loma et le charbon de Freyming, de façon à pouvoir capter une partie plus grande de la flamme du charbon de La Loma. La partie visible par la camera de la flamme du charbon de La Loma est plus longue ; observation confirmée visuellement : la flamme est plus longue et diffuse, alors que la flamme de Freyming présente des contours nets et est plus courte. La flamme du charbon de La Loma est aussi légèrement plus froide ($1312^{\circ}C$) que celle du charbon de Freyming ($1334^{\circ}C$). Le charbon de La Loma possède plus de matières volatiles, il permet probablement de former plus de suies et la plus faible température réduit leur vitesse de combustion, résultants en une flamme plus longue. La zone de température maximum arrive au même endroit puisque les paramètres du brûleur sont les mêmes. La différence de température peut s'expliquer par le fait que la flamme du charbon de La Loma est dans une configuration de facteur d'air primaire faible par rapport à sa référence et peut-être par le PCI des matières volatiles du charbon de Freyming plus élevé.

4.7 Synthèse de l'impact du swirl et du facteur d'air primaire

La variation du nombre de swirl associée à une variation de débit d'air est sous-estimée. Le swirl et le facteur d'air primaire sont deux éléments principaux du contrôle de la position de la flamme. La nature du combustible change la longueur de la flamme, mais elle ne change pas

la zone d'arrivée des particules dans l'ouvrage. Le chemin d'arrivée du combustible est contrôlé par les réglages du brûleur. Cette observation est validée dans un cas où la granulométrie du combustible change peu.

La température de la flamme est moins influencée par des paramètres extérieurs que la température des fumées. La température de la flamme augmente avec l'augmentation du swirl, mais le gain en température de la flamme est de moins en moins important. Il existe un swirl suffisant pour le bon fonctionnement du brûleur, les augmentations ultérieures du swirl n'apportent qu'un gain très faible pour la stabilité de la flamme. Il existe un facteur d'air primaire optimum pour la température de flamme enregistrée par imagerie. On a observé une diminution de la quantité des suies avec l'augmentation du facteur d'air primaire.

Il a été observé, de façon prévisible, une diminution des NO_x avec la diminution du facteur d'air primaire, de 480 ppm pour la flamme de référence à 300 ppm pour un facteur d'air primaire $\lambda_1=0,58$ et un swirl $SW=1,14$; c'est le facteur d'air primaire le plus bas. Associée à cette diminution on observe une dégradation de la qualité de combustion de la flamme avec une mesure de 191 ppm de CO, forte comparativement aux autres mesures d'environ 80 ppm. Avec une diminution moindre du facteur d'air primaire, et en réduisant aussi le swirl ($\lambda_1=0,67$; $SW=1,01$) on obtient aussi une réduction efficace des NO_x avec une concentration de 340 ppm en cheminée avec une dégradation moindre de la combustion avec 105 ppm de CO en cheminée. On peut supposer qu'avec un swirl plus bas on va observer plus de poches localement réductrices ce qui expliquerait l'effet de la diminution du swirl sur la réduction des NO_x .

La validité de la mesure de fréquence en tant que caractéristique de la stabilité de la flamme n'est pas établie. Elle paraît valide pour les changements de facteur d'air primaire, mais elle laisse dubitatif lors des changements de position de plaque ventelle.

Troisième campagne : cocombustion charbon/biomasse et charbon de bois

Contents

5.1	Présentation de la campagne d'essais	88
5.1.1	Objectifs	88
5.1.2	Combustibles	88
5.1.3	Analyses immédiates et élémentaires	89
5.1.4	Débits d'air et puissance entrante	90
5.1.5	Température de l'air secondaire et tertiaire	90
5.1.6	Erreur sur la température de la flamme	91
5.2	Résultats dans la veine d'alimentation	91
5.2.1	Granulométrie	91
5.2.2	ATG des combustibles en fonction de la granulométrie	92
5.2.3	Vitesse des particules par senseur électrostatique	93
5.3	Températures	94
5.3.1	Imagerie de la flamme	94
5.3.2	Températures dans la flamme	96
5.3.3	Comparaison des températures par thermocouples et par imagerie	97
5.4	Espèces	99
5.4.1	Dioxygène	99
5.4.2	Monoxyde de carbone	100
5.4.3	Oxyde d'azote	100
5.4.4	Mesures en cheminée	101
5.5	Analyses des dépôts et des cendres	102
5.5.1	Dépôts sur les sondes de température	102
5.5.2	Analyse des cendres volantes	103
5.5.3	Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	104
5.5.4	Analyse thermogravimétrique des cendres	105
5.5.5	Fluorescence X	105
5.5.6	Charbon de bois	106
5.6	Conclusion sur l'utilisation de la biomasse	107

5.1 Présentation de la campagne d'essais

5.1.1 Objectifs

Ce chapitre présente les tests de cocombustion charbon/biomasse et un test avec du charbon de bois pur. La cocombustion est un élément supplémentaire pour la réduction des émissions de CO_2 atmosphérique. Il est donc pertinent de valider les instruments du Kent pour ce type de combustible. Le brûleur utilisé est adapté pour des charbons avec une quantité minimum de matières volatiles. Certains charbons ou certains combustibles présentent des difficultés de combustion. Il a été choisi de tester si la teneur importante en matières volatiles de la biomasse pouvait aider la combustion d'un charbon à faible taux de matières volatiles et fort taux de cendres. Les problèmes classiques d'encrassement et de corrosion avec ce genre de combustible sont surveillés. L'utilisation de la biomasse pose des problèmes de transport. Le volume nécessaire pour produire une même quantité d'énergie peut être très nettement supérieur à celui des autres combustibles. La pyrolyse est une solution qui peut être utilisée : on utilise les gaz de pyrolyse localement et on transporte le résidu carboné. Le résidu carboné possède un PCI plus élevé. Il peut donc plus facilement être transporté. Un test de combustion sur du charbon de bois (ie : le résidu carboné de la biomasse de type bois) a été fait comme simple test de faisabilité. La modélisation numérique n'a pas été faite pour une question de temps, de données d'entrée, de modèle chimique et de schéma cinétique. Pour plus d'information sur la modélisation de la cocombustion charbon-biomasse sous forme pulvérisée, il est possible de se référer à [45] et [14].

5.1.2 Combustibles

La biomasse choisie pour la cocombustion est de la sciure de bois séchée compactée en pellets. Ce combustible possède comme avantages, de comporter peu d'humidité, et donc d'avoir un PCI élevé relativement aux autres types de biomasses et d'être déjà sous forme de particules relativement fines ce qui réduit l'énergie nécessaire au broyage. Ces éléments permettent d'assurer un broyage du combustible simultanément avec le charbon et d'augmenter la quantité de matières volatiles du mélange. Le charbon (Middleburg) choisi est un combustible difficile, il possède un taux de matière volatiles faible et un taux de cendre élevé. Le dernier combustible utilisé est du charbon de bois.

Conditionnement

Le charbon était conservé dans des big bags à l'extérieur. La semaine précédent les essais de cocombustion, il a abondamment plu. Certains sacs n'étaient pas étanches et la plupart des big bags se sont retrouvés humides, certains particulièrement. Après le mélange, la biomasse a absorbé l'humidité.

Mélange

Afin de procéder au mélange, une bétonnière a été utilisée. L'agitation créée dans la bétonnière a entraîné deux choses : la rupture de certains morceaux de charbon et de certains pellets en morceaux plus petits et en poudre. Associé à ce phénomène de morcelage, on obtient aussi un phénomène de classification granulométrique. Les morceaux de granulométrie moyenne sont sortis en premier, puis ceux de forte granulométrie et la poudre est sortie à la fin. La fraction des plus gros morceaux avait visiblement subi un appauvrissement en biomasse. La figure 5.1 présente le dessus d'un big bag avec une taille de morceaux de charbon moyen et quelques pellets intacts

rajoutés. On voit la poudre humide de charbon et de pellets qui colle sur les blocs de charbon dans la partie de gauche.



FIGURE 5.1 – Exemple de mélange
La largeur de l'image est approximativement de 10 cm

5.1.3 Analyses immédiates et élémentaires

Les analyses immédiates et élémentaires en masse des deux combustibles sont présentés dans le tableau 5.1. Une analyse supplémentaire a été faite pour le charbon de Middelbourg mouillé.

TABLE 5.1 – Analyse en masse des combustibles utilisés pour la campagne de co-combustion

* sur brut, ** sur sec

	Biomasse	Charbon Middelburg	Charbon Mouillé
Humidité (%) [*]	3,40	2,80	11,00
Matière volatile (%) ^{**}	89,20	25,10	23,30
Cendres (%) ^{**}	4,50	14,60	15,00
C (%) ^{**}	48,60	72,10	70,70
H (%) ^{**}	4,65	3,60	3,30
O (%) ^{**}	42,00	8,01	8,90
N (%) ^{**}	0,09	1,36	1,60
S (%) ^{**}	0,09	0,35	0,50
Cl (%) ^{**}	0,024	-	-
PCI (MJ/kg) [*]	16,60	27,00	26,30
PCS (MJ/kg) [*]	17,50	27,80	27,00

Il a été testé 5 types de mélange contenant respectivement 0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 % massiques de biomasse. On obtient par calcul, à partir des analyses de la biomasse et du charbon mouillé, l'analyse immédiate des mélanges, présenté dans le tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Analyse immédiate des mélanges charbon pellet

Mélange	PCI (kJ/kg)	Cendres (%)	Humidité (%)	Matières Volatiles (%)
0	26,3	15,0	11,0	23,3
5	25,9	14,3	10,8	26,1
10	25,4	13,6	10,6	29,0
15	25,0	12,8	10,5	31,8
20	24,5	12,1	10,3	34,6

On observe que avec l'augmentation de la fraction de biomasse dans le mélange il y a de plus en plus de matières volatiles et de moins en moins de cendres ainsi que dans une certaine mesure, de moins en moins d'humidité. Ces facteurs sont favorables à la combustion. Par contre, le PCI des mélanges diminue avec l'augmentation de la fraction de biomasse.

5.1.4 Débits d'air et puissance entrante

Il avait été souhaité, dans un premier temps, garder une puissance entrante constante. Mais pour des raisons techniques, il a été choisi de garder la vis d'alimentation sur une vitesse constante. L'alimentation, pour un même réglage de vis, donne des débits massiques différents. Pour la biomasse, la densité paraît être un facteur important influençant le débit massique. De plus, le PCI diminue avec la proportion croissante de biomasse. Au final, la quantité d'énergie entrante décroît de 3,37 MW pour le charbon pur à 2,61 MW pour 20 % de biomasse. La quantité d'air totale a été gardée constante, la capacité comburivore du combustible change avec la proportion de biomasse, donc le facteur d'air total aussi. Le facteur d'air primaire varie de 1,05 pour le charbon pur à 1,25 pour 20 % de biomasse. Le rapport des débits entre air II et air III est changé en accord avec les courbes de Kreisinger. Ces changements surimposent leurs effets aux effets provoqués par l'ajout de biomasse. Le temps de résidence dans le foyer reste constant. Le temps de résidence dans l'ouvrage diminue avec l'augmentation de la quantité de biomasse.

5.1.5 Température de l'air secondaire et tertiaire

TABLE 5.3 – Température de l'air secondaire et tertiaire

Fraction de biomasse	Température de début (°C)	Température de fin (°C)
0%	400	480
5%	420	480
10%	450	380
15%	410	420
20%	430	460

Le charbon sud-africain est un combustible difficile. Pour brûler ce charbon pur, il a été

nécessaire d'utiliser de l'air secondaire et tertiaire chauffés. Afin de comparer les essais entre eux, l'air chaud a été conservé pour les autres essais. Cependant à cause d'effets d'inertie thermique du système de chauffage de l'air la température n'a pas pu être maintenue constante ; elle a varié entre 380 °C et 480 °C sur l'ensemble des mesures. Les maximums et minimums de la température de l'air sont donnés dans le tableau 5.3.

5.1.6 Erreur sur la température de la flamme

Lors d'une mesure de température de la flamme par imagerie, une moyenne est définie à partir de 60 mesures sur 10 minutes. On y associe une erreur basée sur la variance autour de la moyenne, on obtient des erreurs entre 15 et 20 °C pour les valeurs moyennes. Pour chaque mélange, il a été fait trois mesures de température. La moyenne de ces trois flammes permet de calculer une autre incertitude, on obtient des erreurs entre 1,5 et 24 °C. Cette dernière erreur est d'autant plus faible que la température de l'air secondaire est stable entre les différentes mesures. L'erreur gardée est celle calculée à partir de la moyenne des 60 valeurs.

5.2 Résultats dans la veine d'alimentation

5.2.1 Granulométrie

La granulométrie a été suivie au cours des essais de cocombustion avec le granulomètre par réflexion. Pendant toute la durée d'un essai, il n'a pas été noté de variations importantes. Les résultats sont présentés sur la figure 5.2.

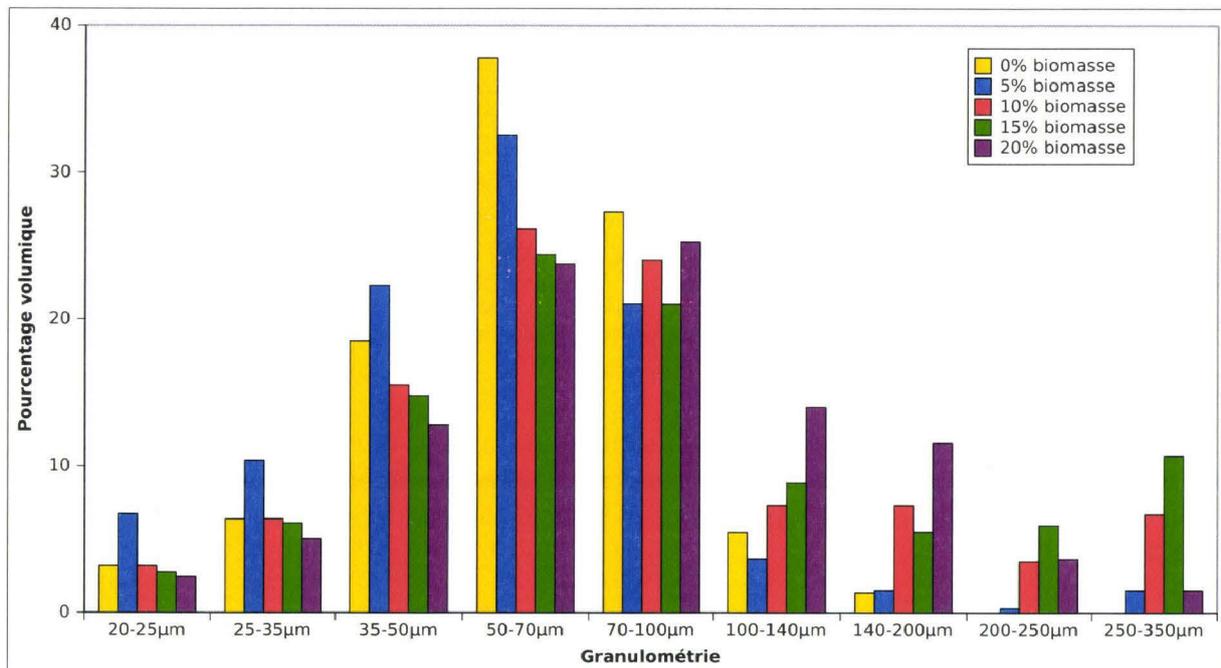


FIGURE 5.2 – Granulométrie en entrée du brûleur mesurée par réflexion laser

La méthode par réflexion est limitée dans la gamme de mesure : les particules trop grosses ou qui touchent simplement le bord de l'image sont éliminées. Les particules trop petites sont considérées comme du bruit.

On observe d’une manière générale que l’ajout de biomasse tend à augmenter la taille des particules du mélange, les particules de biomasse sont plus difficiles à broyer que les particules de charbon. Le charbon pur ne suit pas la tendance, les particules les plus fines sont moins nombreuses que pour 5 % de biomasse. Le charbon pur n’a pas subi de mélange, il est possible que le passage à la toupie des mélanges ait amélioré le broyage ultérieur. À l’opposé, le mélange le plus riche en biomasse (20%) présente moins de particules au dessus de 250 μm que les mélanges à 10% et 15%.

En complément, un échantillonnage, suivi d’un tamisage, dont les résultats sont présentés sur la figure 5.3, permet de s’informer sur les plus grosses particules.

Les particules les plus petites subissent plus fortement les effets électrostatiques que les effets de gravité ce qui fausse les résultats pour les diamètres les plus petits. La mesure du tamisage est faite en masse, le tableau montre des pourcentages massiques en ordonnées et des mm en abscisse.

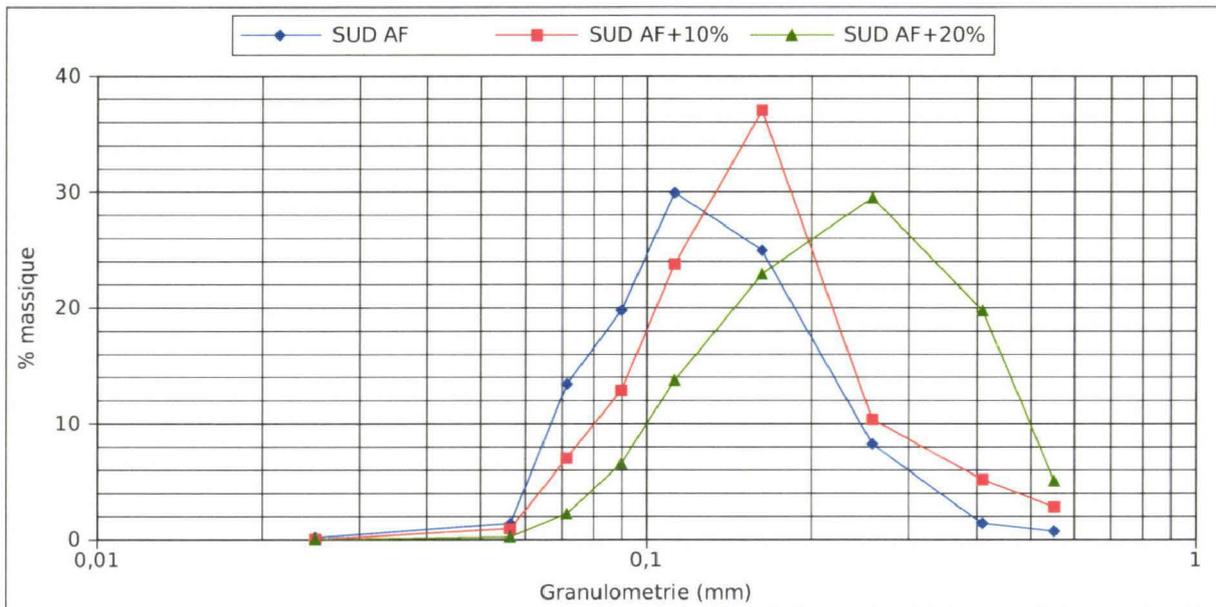


FIGURE 5.3 – Granulométrie par tamisage pour trois fractions de biomasse dans le combustible, charbon pur, 10% de biomasse et 20% de biomasse

Le tamisage des particules montre l’augmentation de la taille des particules avec l’ajout de biomasse. On observe dans le tamis de 250 μm , une masse plus importante de particules pour le mélange à 10% que pour le mélange à 20% : c’est cohérent avec les résultats de granulométrie par réflexion.

5.2.2 ATG des combustibles en fonction de la granulométrie

Il a été procédé par la suite à une analyse ATG en fonction de la granulométrie sur les échantillons prélevés. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.4. En plus des résultats normaux de l’analyse, il a été ajouté un pourcentage massique de biomasse du mélange calculé à partir des quantités de matières volatiles mesurés dans cette analyse et initialement pour la biomasse pure.

On observe logiquement une quantité de matières volatiles qui augmente avec le mélange

TABLE 5.4 – Analyse Thermo Gravimétrique après tamisage des mélanges de combustible prélevés dans la veine d'alimentation

	Humidité	MV	Cendres	Biomasse
Mélange à 0% de biomasse				
Total	6,04	29,13	11,91	0,00
0-50 μm	5,39	27,61	14,81	0,00
50-125 μm	5,96	28,62	12,08	0,00
>125 μm	5,64	30,01	11,48	0,00
Mélange à 10% de biomasse				
Total	7,40	32,05	11,22	4,90
0-50 μm	5,22	27,30	14,90	-0,50
50-125 μm	6,09	28,72	12,06	0,20
>125 μm	7,14	32,59	10,71	4,40
Mélange à 20% de biomasse				
Total	9,45	42,80	9,23	22,80
0-50 μm	6,00	28,37	15,02	1,20
50-125 μm	6,68	31,75	12,33	5,20
>125 μm	9,30	41,76	9,40	19,90

(Le pourcentage

massique de biomasse calculé est basé sur l'analyse ATG)

de biomasse. On trouve bien les particules de biomasse dans la fraction du combustible de plus grosse taille. Par contre le mélange à 10% théorique de biomasse apparaît par ce calcul à 5% de biomasse seulement. On observe même une valeur négative pour les petites particules. Un calcul basé sur un charbon à 23% de matières volatiles comme pour la première analyse au lieu de la valeur de 29% utilisée ici donne un pourcentage massique de biomasse de 10,8%. Le charbon pur à 29% de matières volatiles est une valeur nettement au dessus des analyses faites initialement.

5.2.3 Vitesse des particules par senseur électrostatique

Le tableau 5.5 présente la vitesse des particules dans la veine d'alimentation et la déviation standard de la corrélation des deux signaux qui représente l'homogénéité du déplacement de groupe. La précision sur la vitesse est inférieure à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$.

TABLE 5.5 – Vitesse des particules (m.s^{-1}) et déviation standard de la corrélation (ms) en fonction de la fraction massique de biomasse

Biomasse	Vitesse	Déviaton
0%	27,11	1,97
5%	28,16	2,56
10%	27,82	3,03
15%	28,23	3,13
20%	28,08	3,01

L'ensemble des vitesses moyennes des mélanges contenant de la biomasse ne présente pas

de variation significative. La vitesse des particules de charbon pur est un peu plus faible. La dispersion des vitesses augmente avec l'ajout de biomasse.

5.3 Températures

Après avoir étudié le combustible et son arrivée dans le foyer, on passe à l'étude de la flamme : sa température dans un premier temps, ses espèces dans un second temps.

5.3.1 Imagerie de la flamme

On observe sur la figure 5.4 trois mesures de température d'une même flamme (15% de biomasse). Les heures de mesure sont 15h15, 15h36, 16h12. Les températures moyennes obtenues sont 1359°C, 1356°C et 1355°C. Sur ce cas la température de l'air chaud change très peu.

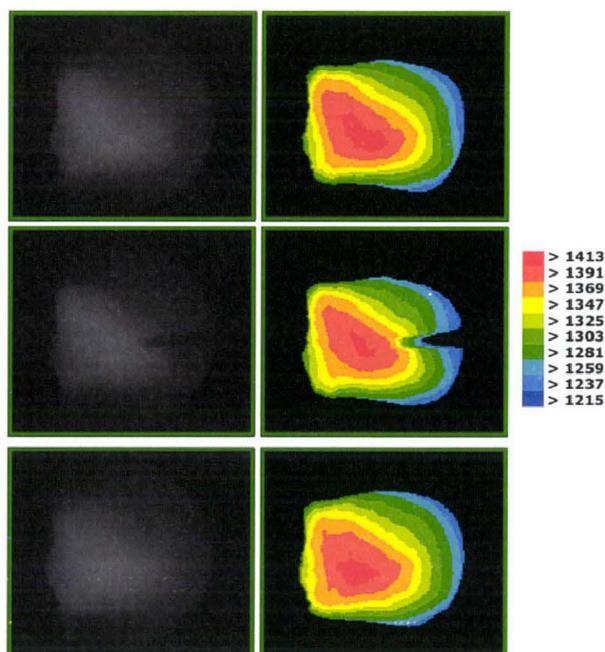


FIGURE 5.4 – Imagerie de température de la flamme pour le mélange à 15% de biomasse à 3 moments différents.

On peut voir la sonde de mesure sur l'illustration centrale (5.4) ; elle paraît affecter très peu la mesure de température obtenue par le système optique. La forme générale de la flamme paraît peu changer, même si on observe l'ombre faite par la sonde refroidie. Ces trois images, ainsi que d'autres démontrent la stationnarité de la flamme moyennée sur un intervalle d'une heure ; ce qui par ailleurs confirme l'applicabilité des modèles RANS pour la modélisation dans ces cas et que la sonde en elle-même, semble ici peu perturber la mesure.

La série d'images suivantes sur la figure 5.5 présente une température moyennée pour chacun des mélanges allant de 0% à 20% de biomasse. Par besoin de comparaison, l'échelle de température est la même pour chaque mesure.

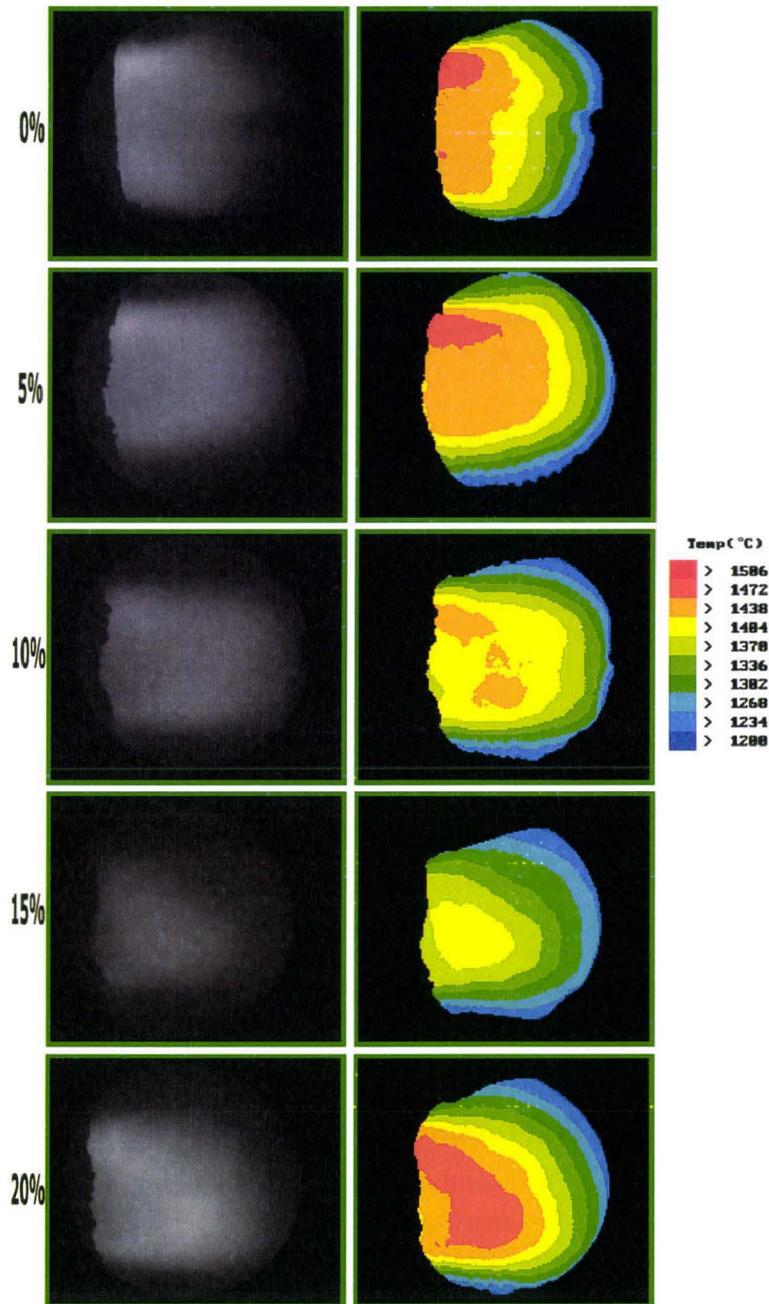


FIGURE 5.5 – Imagerie de température de la flamme pour différentes concentrations de biomasse

On observe, avec l'ajout de biomasse que la forme de la flamme change. La position de la zone de flamme change horizontalement, c'est l'effet de la variation de swirl comme constaté dans le chapitre précédent pour les variations de facteur d'air primaire du charbon de La Loma. La flamme s'allonge de plus en plus avec l'ajout de biomasse. On peut faire un parallèle avec la comparaison entre les charbons de Freyming et de La Loma. L'allongement de la flamme est probablement dû à l'augmentation de la quantité des matières volatiles et peut être à leur changement de nature.

La figure 5.6 montre la température de la flamme mesurée par pyrométrie deux couleurs pour les différents mélanges testés. Les incertitudes présentées sont celles propres à chaque mesure faite avec 60 mesures sur 10 minutes.

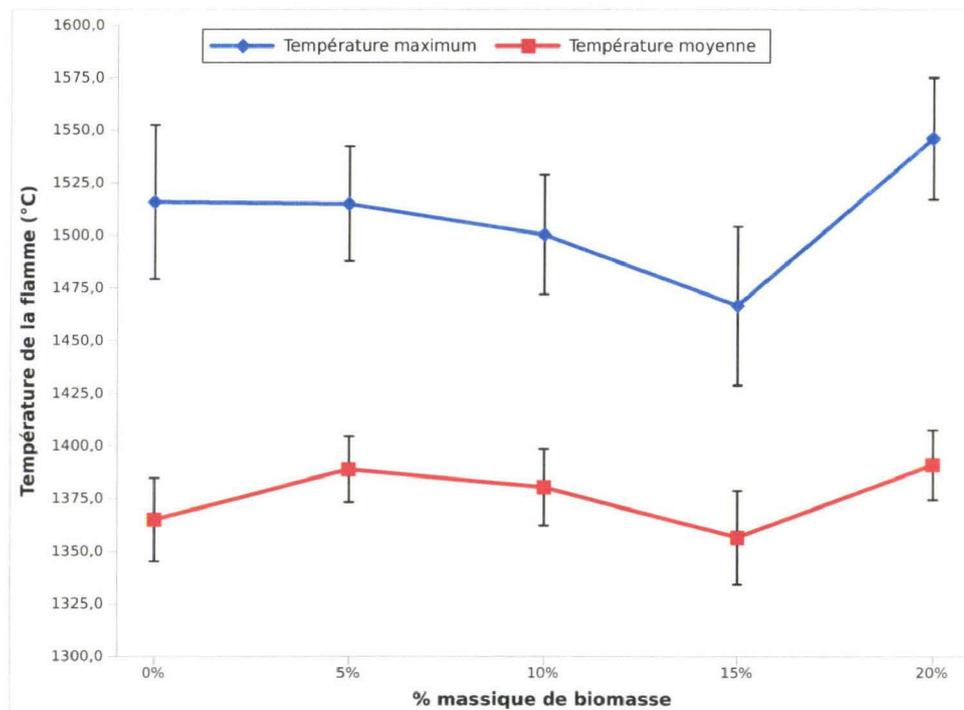


FIGURE 5.6 – Variations de la température de flamme par imagerie en fonction de la quantité de biomasse du combustible

Les écarts-types des mesures des températures sont forts relativement à la mesure. Les flammes à 0% et 15% de biomasse paraissent avoir une température plus faible que les autres. Pour la mesure à 15% il s'agit peut être de l'effet de la température d'air chaud plus faible.

5.3.2 Températures dans la flamme

La figure 5.7 présente la mesure des température dans les différentes flammes de cocombustion au niveau de la première ligne (L1). Les mesures sont faites avec un angle de 15 degrés par rapport au rayon du foyer. Les résultats sont projetés sur ce rayon, la valeur 750 mm représente le centre du foyer, la valeur 1500 mm la paroi opposée aux ouvertures des fenêtres.

On observe des mesures très similaires de température pour les différentes flammes contenant de la biomasse. La flamme de charbon pur possède une zone significativement plus froide en son milieu. La flamme à 10 % paraît présenter un peu ce comportement. Cet ensemble de résultats montre un comportement qui change si on ajoute de la biomasse : la température augmente si on ajoute de la biomasse, même si la quantité apportée est faible. La quantité de biomasse paraît avoir peu d'influence sur la température. On n'observe pas ici que la flamme à 15 % soit de température plus faible.

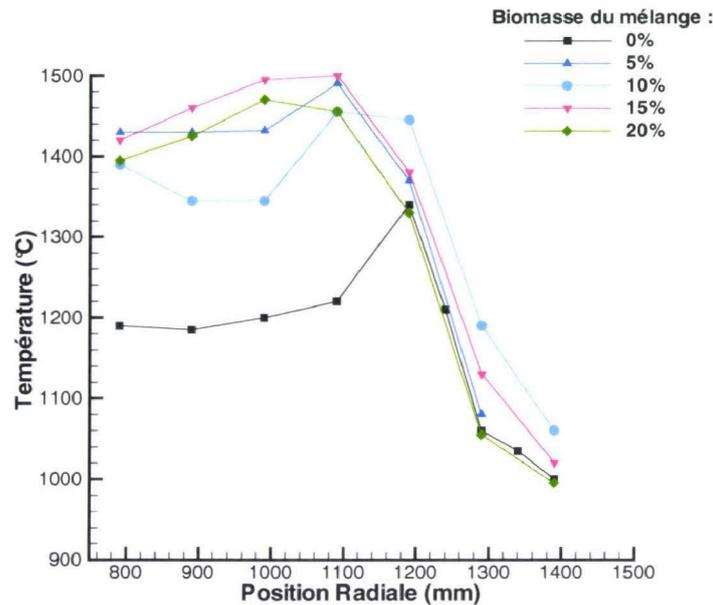


FIGURE 5.7 – Température dans la flamme par thermocouple pour différents pourcentages de biomasse

Ligne L1 projetée sur le rayon

5.3.3 Comparaison des températures par thermocouples et par imagerie

La page de résultats suivante présente avec les figures 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, la comparaison des mesures de température par thermocouple et par le système d'imagerie. La procédure suivie est la même qu'au chapitre 3 partie 3.4.5 page 60. Il faut comparer le champ de vision de la caméra avec le plan des mesures par thermocouple, cependant la localisation de la profondeur de la température mesurée avec le système d'imagerie est problématique. Les valeurs présentées ici pour les températures par thermocouple, sont prises soit au maximum de température : pour 0 %, 5 % et 20 % de biomasse, soit, pour 0 %, 10 % et 15 % de biomasse, au plus proche de l'injection de l'air III. On constate qu'en cherchant une profondeur pour la température, on peut trouver une zone où les températures seront en accord pour tous les cas qui contiennent de la biomasse. Pour le charbon pur, la température augmente toujours avec l'éloignement du brûleur. Il n'y a aucune position qui puisse convenir. Il est donc possible que dans le cas du charbon pur de Middleburg le système de mesure de température par imagerie deux couleurs enregistre la température des particules. On peut noter que la température mesurée par thermocouple pour le charbon de Middleburg en absence de biomasse est la seule croissante avec l'éloignement de l'ouveau. Lors des modélisations du charbon de Freyming, avant l'ajout de particules pour augmenter la combustion dans l'ouveau, tous les modèles donnaient les températures des gaz croissantes avec l'éloignement de l'ouveau comme il a déjà été précisé dans la partie 3.5.2 page 67.

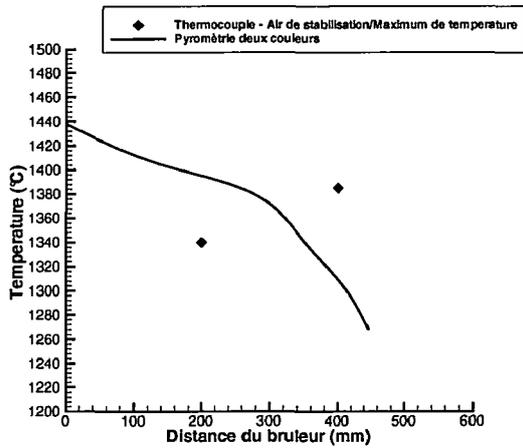


FIGURE 5.8 – Températures dans l’axe du brûleur à 0% de biomasse

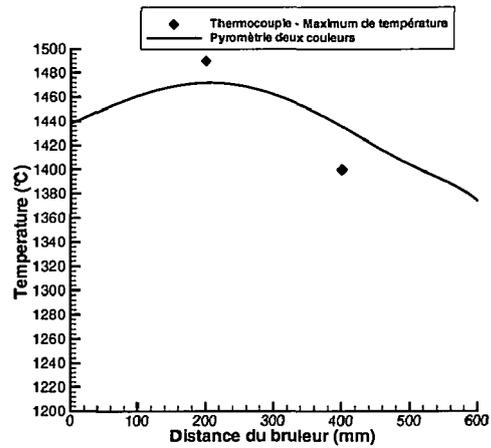


FIGURE 5.9 – Températures dans l’axe du brûleur à 5% de biomasse

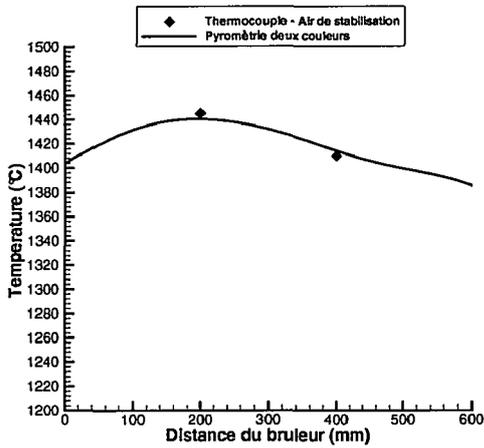


FIGURE 5.10 – Températures dans l’axe du brûleur à 10% de biomasse

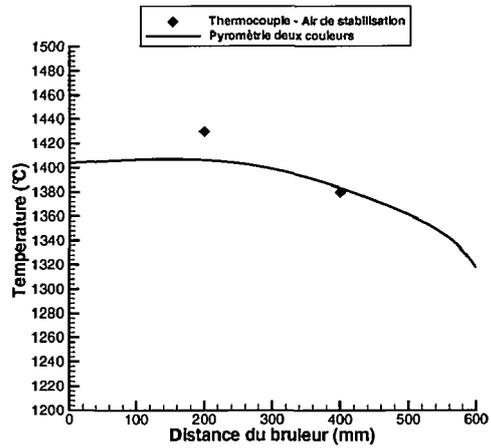


FIGURE 5.11 – Températures dans l’axe du brûleur à 15% de biomasse

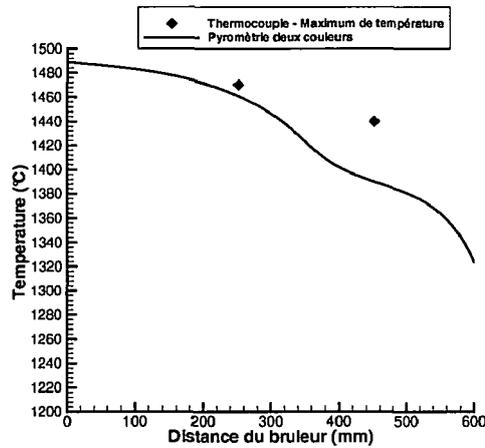


FIGURE 5.12 – Températures dans l’axe du brûleur à 20% de biomasse

5.4 Espèces

5.4.1 Dioxygène

La figure 5.13 présente la mesure de l'oxygène dans les différentes flammes de cocombustion au niveau de la première ligne (L1). Les mesures sont faites avec un angle de 15 degrés par rapport au rayon du foyer. Les résultats sont projetés sur ce rayon, la valeur 750 mm représente le centre du foyer, la valeur 1500 mm la paroi opposée aux ouvertures des fenêtres.

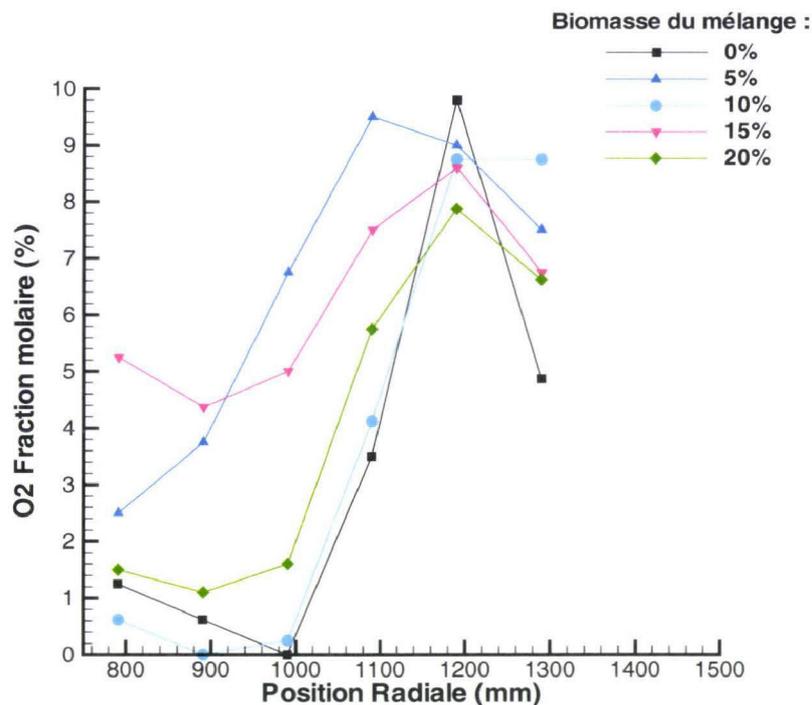


FIGURE 5.13 – Fraction molaire de O_2 pour différents pourcentages de biomasse
Ligne L1 projetée sur le rayon

Dans la zone d'injection de l'air tertiaire on observe une décroissance de la quantité d'oxygène en fonction de la quantité théorique de biomasse injectée. C'est tout à fait logique puisque l'on change le rapport air II/air III.

Dans la zone centrale, on observe une zone réductrice pour 0 % et 10 % de biomasse théorique injecté, une zone quasi réductrice pour 20 % de biomasse et des zones clairement oxydantes pour 5 % et 15 % de biomasse. L'analyse de ces variations ne paraît pas corrélée aux variations de biomasse théorique.

On pourrait essayer d'expliquer la température plus basse mesurée lors de la combustion du charbon pur par son facteur d'air primaire plus bas, puisque l'on sait que c'est un facteur contrôlant la température. Cependant, le mélange à 10% de biomasse possède lui aussi une richesse réductrice. De plus, la puissance injectée plus basse à 10% ne peut pas expliquer une température plus élevée.

5.4.2 Monoxyde de carbone

La figure 5.14 présente la mesure de monoxyde de carbone dans les différentes flammes de cocombustion au niveau de la première ligne (L1). Les mesures sont faites avec un angle de 15 degrés par rapport au rayon du foyer. Les résultats sont projetés sur ce rayon, la valeur 750 mm représente le centre du foyer, la valeur 1500 mm la paroi opposée aux ouvertures des fenêtres.

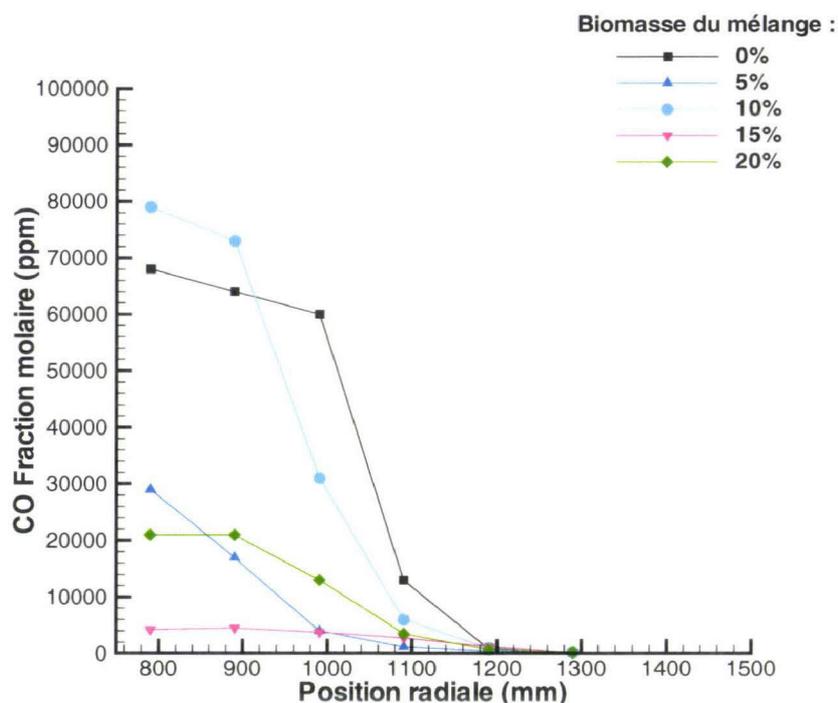


FIGURE 5.14 – Fraction molaire de CO pour différents pourcentages de biomasse
Ligne L1 projetée sur le rayon

Les quantités de CO observées sont tout à fait cohérentes avec les quantités d'oxygène ; moins on mesure de dioxygène dans la zone centrale, plus on y observe de CO .

5.4.3 Oxyde d'azote

La figure 5.15 présente la mesure de monoxyde de carbone dans les différentes flammes de cocombustion au niveau de la première ligne (L1). Les mesures sont faites avec un angle de 15 degrés par rapport au rayon du foyer. Les résultats sont projetés sur ce rayon, la valeur 750 mm représente le centre du foyer, la valeur 1500 mm la paroi opposée aux ouvertures des fenêtres.

On observe clairement la réduction de NO dans les zones sans oxygène. En absence de réduction, il y a une tendance globale dans laquelle, plus la quantité de biomasse est importante, plus la production de NO est importante. La quantité d'azote dans la biomasse est nettement plus faible que dans le charbon. Il est possible que l'azote de la biomasse soit plus facile à libérer, ou alors, si la combustion du charbon est meilleure, une plus grande quantité d'azote peut être libérée du résidu carboné. On peut supposer une influence des différences de température, mais il n'apparaît pas de corrélation.

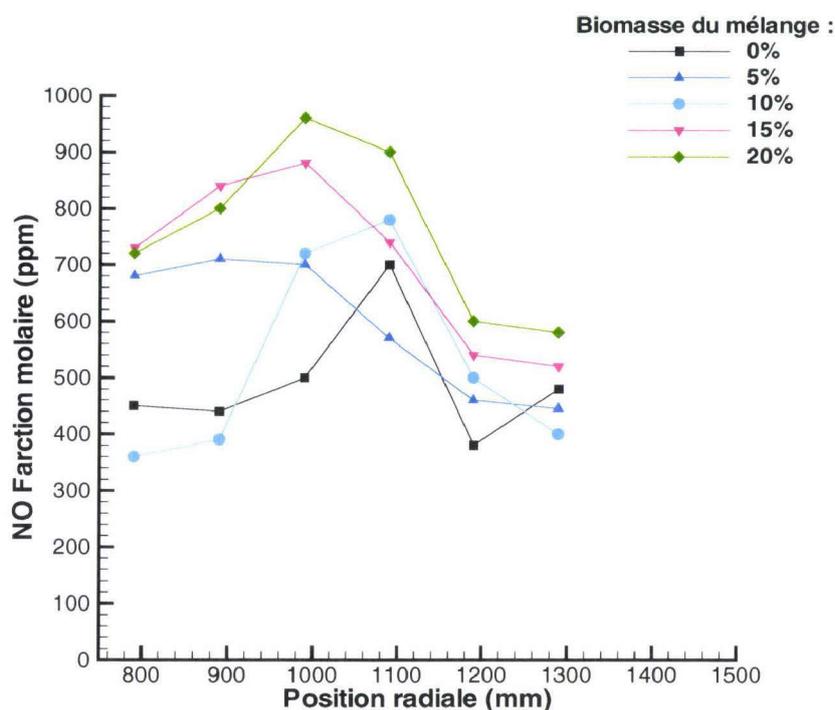


FIGURE 5.15 – Fraction molaire de NO pour différents pourcentages de biomasse
Ligne L1 projetée sur le rayon

5.4.4 Mesures en cheminée

Le tableau 5.6 présente, en fonction de la quantité de biomasse dans la combustible, les résultats en cheminée de O_2 , CO et NO . De plus, le facteur d'air p total est donné pour pouvoir commenter les résultats de dioxygène.

TABLE 5.6 – Mesures en cheminée

Biomasse (%)	O_2 (%) (fenêtres fermées)	λ total	CO (mg/Nm ³ @6% O_2)	NO (mg/Nm ³ @6% O_2)
0	4,49	1,05	292	615
5	3,42	1,12	170	945
10	3,23	1,15	136	672
15	3,74	1,19	82	989
20	3,52	1,25	79	783

En ce qui concerne la quantité d'oxygène en sortie, on note très clairement un palier de 1% entre la combustion sans biomasse et la combustion avec biomasse. Le facteur d'air total plus faible lors de la combustion sans biomasse est un argument pour une moins bonne combustion. Cependant, cette variation n'est pas observée entre les différents taux de biomasse dans le combustible. Le facteur d'air total augmentant avec le taux de biomasse, on devrait obtenir de plus en plus d'oxygène dans les fumées. Ce n'est pas le cas, on peut en conclure une meilleure combus-

tion avec l'ajout croissant de biomasse. Cette meilleure combustion se vérifie avec la quantité de *CO* en cheminée qui diminue avec l'augmentation de biomasse dans le mélange. Cette meilleure combustion peut être le fait de la quantité de biomasse ajoutée ou de la variation du facteur d'air. Cependant le cas à 0% de biomasse paraît singulièrement différent. Les mesures de *NO* confirment l'effet des zones réductrices déjà vu auparavant ; les zones centrales les plus pauvres en oxygène diminuent le plus les quantités de *NO* en sortie.

5.5 Analyses des dépôts et des cendres

Après avoir étudié le combustible puis analysé la flamme, on observe les cendres issues de la combustion. Les cendres ont été prélevées à deux endroits :

- dans la flamme, par dépôt sur les thermocouples ;
- juste avant la cheminée, par aspiration, pour les cendres volantes.

5.5.1 Dépôts sur les sondes de température

Les sondes à aspiration, utilisées pour mesurer la température dans la flamme, sont protégées par des baguettes en céramique, elles mêmes recouvertes de manchons extérieurs en céramique.

Ces manchons ont été changés systématiquement dès l'apparition d'un encrassement. Il est apparu que l'aspect des cendres collées aux manchons varie. Le temps de séjour et le parcours dans la flamme variant, on a observé des différences sur les cendres d'un même combustible, puisque prélevées à des endroits différents de la flamme. Sur la figure 5.16, le fond blanc est une feuille de papier. La couleur de fond est la même pour chaque photo, mais l'optimisation automatique du contraste de l'appareil photo change les couleurs. Les deux photos à 20 % de biomasse montrent le même manchon. À l'œil, on observe des cendres de plus en plus blanches avec l'ajout de biomasse. Le diamètre d'un manchon est 2,5 cm.

Les bâtonnets blancs fins sur les photos de 10 % et 20 % correspondent à des baguettes de protection du thermocouple qui se trouve à l'intérieur du manchon. On observe dessus une substance vitrifiée brun-vert. Le dépôt de verre sur le bâtonnet à 10% paraît avoir été plus fluide que sur celui à 20 %. On peut supposer une différence de composition chimique du verre expliquée par la nature du combustible, la position de l'échantillonnage ou un temps de résidence différent. Il n'y a pas eu d'analyse chimique des deux verres.

Sur les manchons, on voit que celui à 10 % possède une partie vitrifiée sur l'extérieur alors que celui à 20 % a un dépôt plus granulaire. Le dépôt sur le manchon à 10 % n'est pas du tout friable contrairement aux autres. On voit aussi, sur les manchons, sauf ceux à 0 % et 10 %, des zones poreuses du côté de l'arrivée du charbon, par exemple en bas sur la dernière illustration 20 %, ces zones poreuses sont les zones les plus friables. On le voit sur l'échantillon à 5 % de biomasse, sur le morceau cassé en bas à droite. Ces zones correspondent probablement au collage de métaplastes du charbon en cours de libération de matières volatiles.

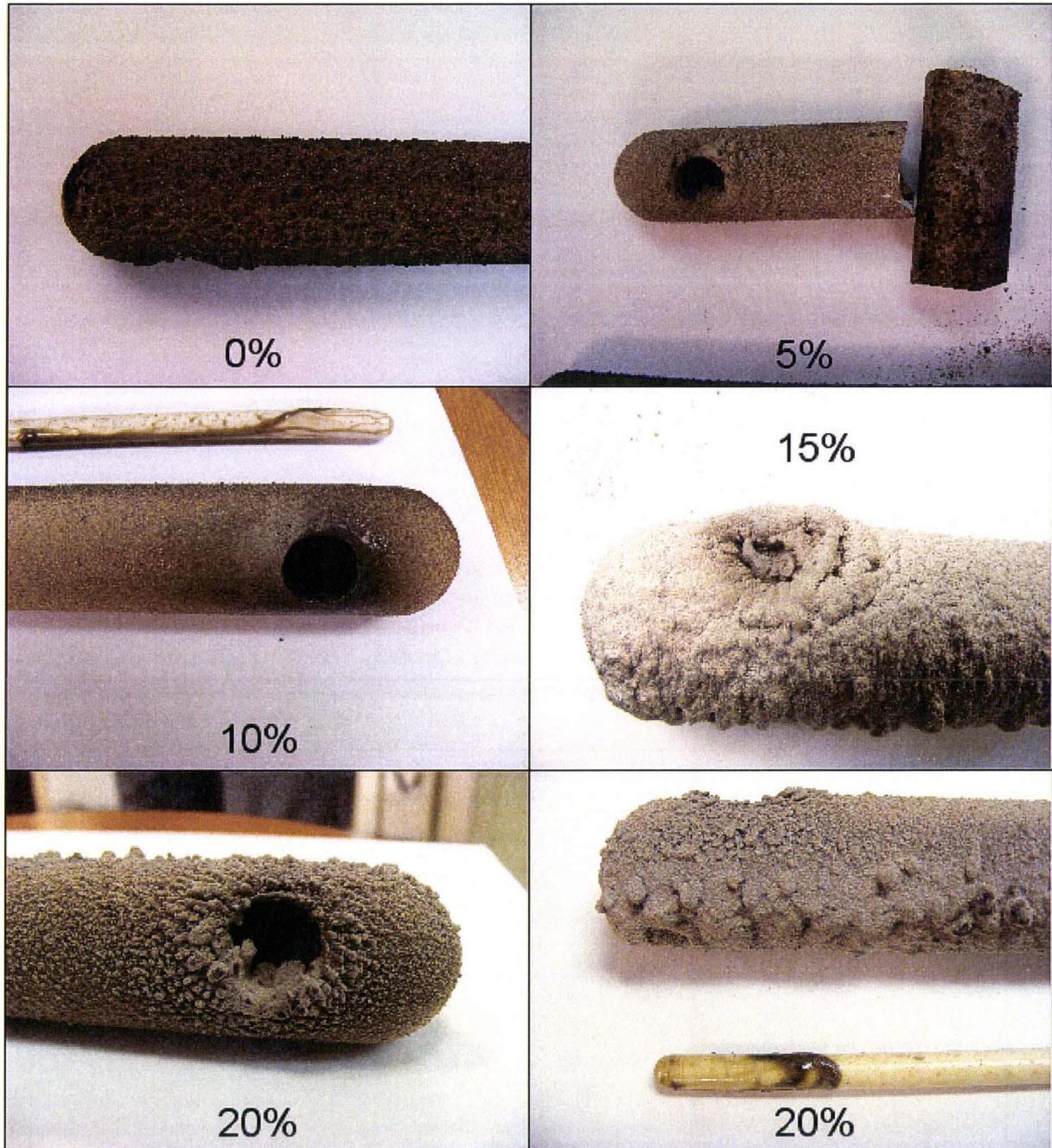


FIGURE 5.16 – Dépôts sur les manchons des thermocouples pour différents mélanges charbon-pellet

5.5.2 Analyse des cendres volantes

L'observation à l'œil nu sur la figure 5.17 des cendres volantes montre qu'elles passent de gris/noir à une teinte de plus en plus blanche. La couleur habituelle des cendres est jaune rouge à cause du soufre et du fer présent. On associe à priori le noir avec le carbone des imbrûlés et le blanc avec le calcium.



FIGURE 5.17 – Photos des cendres volantes prélevées
De la gauche vers la droite : deux échantillons de charbon pur : A puis B, puis 5%, 10%, 15% et 20% de biomasse

5.5.3 Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

Les cendres volantes prélevées sont analysées en premier par DRX ; c'est une analyse minéralogique semi-quantitative qui caractérise les dimensions du réseau cristallin. On observe sur la figure 5.18 du quartz (SiO_2), de la mullite ($Al_2O_3SiO_2$) issue de la fusion des argiles, de l'hématite (Fe_2O_3), de la chaux vive (CaO) et des traces d'anhydrite ($CaSO_4$). Ce sont des cendres habituelles de la combustion du charbon pulvérisé.

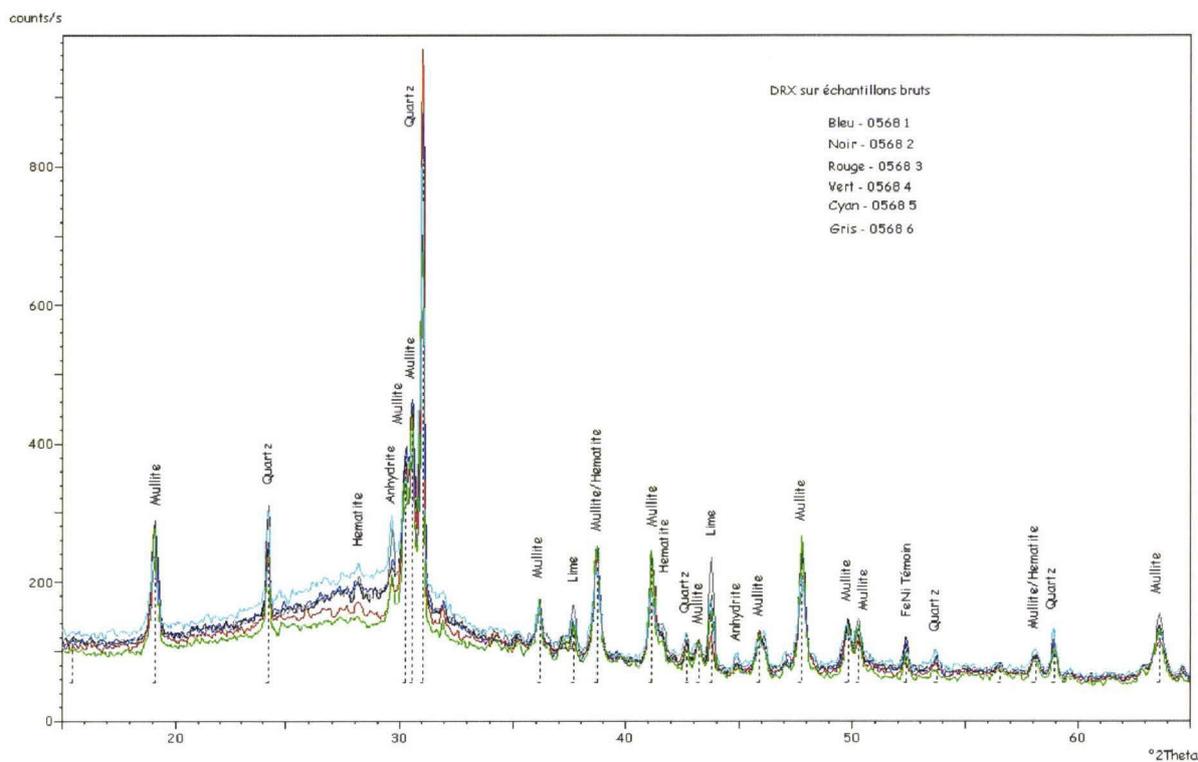


FIGURE 5.18 – Analyse DRX des cendres volantes sans traitement
5,6 : Charbon pur ; 1 : 5 % biomasse ; 2 : 10 % biomasse ; 3 : 15 % biomasse ; 4 : 20 % biomasse

5.5.4 Analyse thermogravimétrique des cendres

Les échantillons de cendre ont aussi été analysés par analyse thermogravimétrique avec une température maximum de 815 °C. On obtient ainsi une quantité d'eau, de matières volatiles résiduelles, de cendres et les imbrûlés par différence. Il faut faire attention au fait que certains minéraux, par exemple le carbonate de magnésium, se décomposent sous cette température et sont comptés dans les matières volatiles.

TABLE 5.7 – Analyse thermogravimétrique des cendres volantes

% de Biomasse	H ₂ O Analyse	Cendre % sec	MV % sec
0%	2,62	65,7	5,07
5%	1,48	70,8	3,57
10%	1,74	71,6	3,86
15%	1,15	83,2	3,85
20%	0,85	87,2	3,96

On a une diminution importante de la quantité des imbrûlés avec l'ajout de biomasse comme en témoigne l'augmentation du taux de cendres.

5.5.5 Fluorescence X

Après être passés par l'analyse thermogravimétrique, les échantillons de cendres volantes, calcinées à 815 °C, ont été analysés par fluorescence X qui donne une analyse élémentaire en masse sous forme d'équivalent oxyde. Les éléments plus légers que le fluor ne peuvent pas être détectés. Afin de faire l'analyse élémentaire, il a été nécessaire de passer par un perlage des échantillons. Le perlage consiste en la fusion des cendres dans un verre à une température un peu supérieure à 1000 °C, afin d'isoler les éléments et de s'extraire des effets de matrice. La mesure est élémentaire. Les résultats donnés dans le tableau 5.8 sont sous forme de pourcentage massique d'oxydes mais les éléments ne sont pas forcément sous la forme des oxydes présentés ici. On peut perdre des éléments, par exemple comme *Na* et *F* pendant ce processus. La masse perdue est appelée perte au feu. Le total massique présenté devrait boucler sur 100 ; la valeur du total permet de juger de la qualité de la mesure.

On observe que les pertes au feu paraissent plus faible pour les combustibles riches en biomasse avec une perte au feu nulle pour 20 %.

On observe aussi des différences notables entre les deux échantillons de cendres de charbon brut, notamment au niveau de *Si*, *Ca* et *Fe*. Le seul changement notable dans la combustion de ces deux échantillons de cendre de charbon brut est le temps de fonctionnement préalable de la chaudière. On observe un taux d'imbrûlés supérieur de 5 % pour l'échantillon A comparativement à l'échantillon B.

On observe entre les échantillons sans biomasse et ceux issus de la cocombustion que les quantités de soufre et de fer sont plus élevées pour les deux échantillons de cendre de charbon pur. À l'opposé les quantités d'aluminium et de potassium sont plus faibles dans les cas sans biomasse.

Les cendres volantes présentent une variation de couleur de gris foncé à gris clair. On a donc supposé les plus foncées comme les plus riches en carbone imbrûlé. Une ATG des cendres l'a confirmé. Il était aussi attendu de trouver plus de calcium dans les cendres les plus blanches. De

TABLE 5.8 – Composition élémentaire des cendres volantes en masse équivalent oxyde par fluorescence X après perlage

% biomasse	0% - A	0% - B	5%	10%	15%	20%
SiO_2 (%)	42,5	38,4	44,9	41,9	44,9	42,6
Al_2O_3 (%)	29,4	29,0	31,5	30,9	31,1	31,4
CaO (%)	8,09	11,20	7,51	8,76	6,60	9,23
Fe_2O_3 (%)	5,72	6,17	4,76	4,95	4,74	4,07
SO_3 (%)	2,54	2,46	1,47	1,66	1,16	1,6
MgO (%)	1,64	2,36	1,39	1,64	1,11	1,84
TiO_2 (%)	1,40	1,67	1,68	1,57	1,58	1,68
P_2O_5 (%)	1,35	1,78	1,59	1,68	1,49	1,53
K_2O (%)	0,64	0,72	0,66	0,78	0,87	0,86
Na_2O (%)	0,10	0,23	0,10	0,13	0,07	0,11
Autres	1,54	1,66	1,47	1,56	1,43	1,28
Pertes au feu	6,05	5,26	2,07	5,15	1,92	0
Total	100,98	100,94	99,1	100,68	96,97	96,2

la chaux vive (CaO) et de l'anhydrite ($CaSO_4$) ont été détectées par DRX. L'analyse par fluorescence X qui a suivi n'a pas montré d'augmentation de la quantité de Ca avec l'augmentation de biomasse. La couleur noire du carbone est dominante sur le blanc du calcium. Il peut donc y avoir diminution de la quantité de Ca dans les cendres avec l'augmentation croissante du taux de biomasse dans le combustible.

5.5.6 Charbon de bois

Un charbon de bois a été brûlé dans le foyer. Un charbon bitumineux est 3,5 fois plus dense que le charbon de bois utilisé ; la vis d'alimentation au maximum n'a pu fournir qu'un débit de combustible de 120 kg/h correspondant à 0,9 MW.

Dans des conditions normales, le combustible et l'air primaire sont envoyés directement dans le foyer, de l'air secondaire en rotation est envoyé juste à côté de l'air primaire, le combustible passe près de l'ouvrage (ciment réfractaire) se chauffe et perd ses matières volatiles qui s'enflamment. L'air III est alors ajouté, et termine la combustion des matières volatiles ce qui permet la combustion du résidu carboné. La chaleur de l'ouvrage est cruciale pour amorcer la réaction. Cette chaleur est maintenue par la combustion des matières volatiles.

Le charbon de bois possède peu ou pas de matières volatiles, et le débit de combustible apporte une quantité d'énergie trois fois moindre par rapport au fonctionnement nominal.

La quantité d'air primaire et secondaire dépend de la vitesse de flamme. La vitesse de flamme du charbon de bois a été comparée à celle d'un anthracite, à cause de la similitude des matières volatiles et du taux de cendre. Cette vitesse de flamme est très probablement erronée, cependant cela a permis de régler le brûleur. Étant donné que la quantité d'air primaire n'est pas modifiable, l'air secondaire a été coupé. De plus, même sans air secondaire, la quantité d'air primaire injectée était encore 50% trop grande. L'injection de charbon de bois s'est donc faite directement sans aucun swirl.

Le combustible a été testé en fin de journée, afin de profiter de la chaleur résiduelle accumulée pendant la journée. Le charbon de bois a été injecté avec du gaz naturel dans un premier temps

afin d'assurer la combustion. La quantité de gaz naturel a été graduellement réduite jusqu'à 0. L'air tertiaire était préchauffé aux environs de 300°C. La flamme obtenue avec le charbon de bois seul était particulièrement lumineuse. La température mesurée par l'instrumentation du Kent est de 1386°C.

La flamme est ensuite devenue de plus en plus sombre jusqu'à l'orange, puis elle s'est éteinte ; il y a probablement eu refroidissement de l'ouvrage. Les tentatives suivantes de démarrage n'ont pas réussi. Le fait d'avoir réussi à faire tenir une flamme de charbon de bois pur pendant une dizaine de minutes sur un foyer inadapté montre déjà la possibilité d'utiliser le charbon de bois pur en combustible pulvérisé avec un foyer et un brûleur dédiés.

5.6 Conclusion sur l'utilisation de la biomasse

Il existe une quantité de paramètres mal maîtrisés sur cette série d'expérience qui sont susceptibles de fausser l'interprétation des mesures. Cependant, on observe indubitablement une amélioration significative de la combustion avec l'ajout de biomasse. Plus on ajoute de biomasse, mieux le résidu carboné prélevé en cheminée est brûlé et moins il y a de *CO* en cheminée. Il pourrait s'agir d'une amélioration liée à un changement de facteur d'air. On observe un comportement différent entre la présence ou l'absence de biomasse, pour la température, on observe une température plus faible en absence de biomasse, tandis que les différentes concentrations de biomasse présentent de faibles variations. Lorsque l'on compare les données de température par thermocouple et par imagerie, on observe que la flamme sans ajout de biomasse ne se comporte pas comme les autres. Les deux mesures sont les plus différentes. Cette augmentation de la combustion est contrebalancée par un fort encrassement. Il n'y a pas de données quantifiables pour l'encrassement. Le charbon utilisé est riche en cendres et présente déjà seul, un phénomène de collage des cendres. Mais l'ajout de biomasse paraît être un facteur aggravant, de plus dans certaines zones de la flamme on a observé un phénomène de vitrification qui montre une augmentation de la fusibilité des cendres.

La combustion du charbon de bois en combustible pulvérisé a été testée. La combustion a été possible malgré le fait que l'équipement ne soit pas prévu pour. Cette combustion n'a été possible que grâce à la quantité de chaleur emmagasinée dans l'ouvrage pendant les tests précédents. Le résidu carboné de bois paraît donc un combustible utilisable sous forme pulvérisée.

Conclusion et perspectives

Les différents appareils de mesure expérimentaux ont pu être testés dans différentes conditions avec différents degrés de succès. L'aspect de la pollution par les oxydes d'azote a été étudié. Les tests de cocombustion ont bien montré une amélioration de la combustion et un test sur le charbon de bois en tant que combustible pulvérisé a eu lieu.

Validation des systèmes de mesure Pour le système de mesure de vitesse, les deux types d'électrodes ont donné des résultats cohérents. Ces mesures ont permis de mettre en évidence le comportement de « *roping* » des particules dans la canalisation de l'arrivée de charbon.

Le système de mesure de la granulométrie a donné des résultats similaires au Malvern, à deux différences significatives ; les particules les plus petites ne sont pas dans la gamme de détection de la caméra, les particules les plus grosses n'ont pas été détectées non plus. La zone de mesure est probablement non représentative de tout l'échantillon.

La caméra deux couleurs a donné des résultats très similaires aux mesures par thermocouple. Elle a mesuré principalement la température des suies formées sauf dans le cas du charbon de Middelburg seul. L'hypothèse la plus probable est que l'on mesure la température des particules si la quantité de matières volatiles n'est pas suffisante. La température mesurée a été légèrement influencée par la température de l'air chaud lors de la campagne de cocombustion. La température de la flamme dans ces conditions reste bien plus significative que la température des fumées qui est influencée par la combustion du résidu carboné dans les cendriers dans ce cas et par les fuites d'air dans le foyer dans un cas plus général. La surface de la zone de mesure est variable en fonction de la quantité de suies formées. Moins il y a de suies plus on peut s'attendre à mesurer la température des particules qui ne sont pas à l'équilibre. Les mesures sur la stabilité de la flamme ne correspondent pas aux attentes prévues pour les variations de swirl. Pour les variations de facteur d'air primaire, les résultats semblent cohérents.

Paramètres de la flamme Un swirl minimum est nécessaire pour une bonne combustion sur ce type de brûleur, on peut le voir à partir de la mesure de la température de la flamme en fonction du swirl. La position de la flamme est contrôlée par la trajectoire des particules de combustible, elle-même contrôlée par le débit et le swirl. Le swirl est caractérisé par un nombre de swirl, le nombre de swirl utilisé ici sous-évalue l'importance des variations de débit. La quantité des matières volatiles augmente la longueur de la flamme et va jouer aussi sur la richesse de la flamme. La nature des matières volatiles va jouer aussi sur la température.

Il existe un facteur d'air optimum pour la température de flamme enregistrée par imagerie. L'augmentation du débit d'air secondaire (augmentation du facteur d'air primaire) détache la flamme de l'ouvrage. La flamme devient instable. Le détachement est visible par le système de caméra deux couleurs. La diminution du débit d'air secondaire (diminution du facteur d'air primaire) augmente la quantité de suies formées, ce qui augmente la zone visible par la caméra deux couleurs.

Oxydes d'azotes et modélisation La réduction de NO et l'augmentation de CO avec la diminution du facteur d'air primaire sont mises en évidence. Cette réduction est active en dessous d'une certaine valeur du facteur d'air primaire correspondant à une concentration en oxygène proche de zéro dans la zone de recirculation interne de la flamme. Pour un du facteur d'air primaire bas, il apparaît qu'une diminution du swirl permet la diminution des NO_x de façon efficace. Cette diminution des NO_x est presque aussi efficace qu'une plus forte réduction du facteur d'air primaire.

Du point de vue de la modélisation, il a été possible de représenter la réduction de NO , malgré une chimie à l'équilibre. La réduction de NO s'est faite en post-traitement. La réduction est complètement absente sans une zone de recirculation centrale totalement réductrice. Par contre elle devient totale à 0% de dioxygène dans la zone de recirculation centrale. Pour obtenir une zone de recirculation centrale réductrice il a fallu faire un ajout de particules qui consomme 20% massique des particules sous forme de carbone dans l'ouvrage en plus des matières volatiles. Ceci a permis une bonne représentation de la combustion au niveau de la sortie de l'ouvrage, zone qui est perçue par le système de mesure de la température. Les mesures de température et la modélisation de la température sont en bon accord à ce niveau.

Biomasse On observe une amélioration significative de la combustion avec l'ajout de biomasse. Avec la proportion croissante de biomasse, on obtient un résidu carboné qui contient de moins en moins d'imbrûlés en cheminée. Ajouter de la biomasse à un combustible faible en matières volatiles permet d'améliorer sa combustion dans un brûleur bas- NO_x . On observe que la flamme sans ajout de biomasse ne se comporte pas comme les autres. Une faible quantité paraît suffisante. Le charbon choisi était riche en cendres, on a observé sur les manchons de protection des sondes un collage plus important en présence de biomasse. Ces travaux ont fait l'objet d'un article^[54].

Perspectives Le système de mesure de la vitesse des particules par des électrodes circulaires doit être adapté pour des largeurs de canalisations industrielles. De plus, les électrodes seront divisées en quatre segments de façon à pouvoir localiser l'écoulement.

Le système de granulométrie par imagerie doit encore être amélioré. Il doit pouvoir effectuer les mesures sur une zone plus étendue et plus en profondeur.

Le système de mesure des températures par pyrométrie deux couleurs peut être appliqué sur des flammes industrielles. Ce système possède l'avantage de ne pas être intrusif et permet une surveillance continue.

Les travaux de modélisation présentés peuvent être affinés : un modèle complet en 3D prédira mieux le passage des particules. Un modèle chimique avec une variable de progression permettrait un meilleur calcul pour la zone de recirculation et l'ouvrage^[33].

Afin de modéliser la cocombustion biomasse-charbon il faut :

- connaître la taille et la forme des particules car la trajectoire des particules de biomasse fortement longiligne est significativement différentes de celles des particules charbon qui sont sphériques^[12],
- utiliser un système chimique capable de gérer les deux combustibles simultanément et qui ne soit pas trop lourd du point de vue du temps de calcul,
- connaître la cinétique de dévolatilisation et la composition des matières volatiles pour les deux combustibles.

Un brûleur à flamme plate est en cours de mise en place afin de caractériser les combustibles pulvérisés et de valider les modèles. La validation sur des flammes de petite taille permet un gain de temps de calcul important.

Bibliographie

- [1] Directive 2001/80/CE relative à la limitation des émissions de certains polluants dans l'atmosphère en provenance des grandes installations de combustion (directive GIC dite "LCP" pour Large Combustion Plant) JOCEn L309 du 27 novembre 2001.
- [2] Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil, modifié par la directive 2009/29/CE.
- [3] E. Biagini, M. Cioni, L. Tognotti. Development of a lab-scale entrained flow reactor for testing biomass fuels. *Fuel*, 84 :1524–1534, 2005.
- [4] A. Chinnayya, A. Chtab, J.Q. Shao, R.M. Carter, Y. Yan, S. Caillat. Characterization of pneumatic transportation of pulverized coal in a horizontal pipeline through measurement and computational modelling. *Fuel*, 88 :2348–2356, 2009.
- [5] A. Deloye. Combustibles solides. Charbon Echantillonnage et essais, caractérisation-BE8532. Rapport technique, Techniques de l'ingénieur, 2007.
- [6] A. Mora, A. Garcia. Cenozoic tectono-stratigraphic relationships between the cesar sub-basin and the southeastern lower magdalena valley basin of northern colombia. In *Search and Discovery*. 30046, 2006.
- [7] A. Sarkar, Ruma Rano, G. Udaybhanu, A.K. Basu. A comprehensive characterisation of fly ash from a thermal power plant in eastern india. *Fuel Processing Technology*, 87 :259–277, 2006.
- [8] A. Williams, R. Backreedy, R. Habib, J.M. Jones, M. Pourkashanian. Modelling the coal combustion : the current position. *Fuel*, 81 :605–608, 2002.
- [9] A.M. Wood, W. Hwang, J.K. Eaton. Preferential concentration of particles in homogeneous and isotropic turbulence. *International Journal of Multiphase Flow*, 31 :1220–1230, 2005.
- [10] A.S. Jamaluddin, J.S. Truelove, T.F. Wall. Devolatilization of bituminous coals at medium to high heating rate. *Combustion and Flamme*, 63 :329–337, 1986.
- [11] B. Alpern, M.J. Lemos De Sousa. Documented international enquiry on solid sedimentary fossil fuels ; coal : definitions, classifications, reserve-resources, and energy potential. *Coal Geology*, 50 :3–41, 2002.
- [12] C. Yin, L. Rosendhal, S.K. Kaer, T.J. Condra. Use of numerical modeling in design for co-firing biomass in wall-fired burners. *Chemical Engineering Science*, 59 :3281–3292, 2004.
- [13] C. Yin, L.A. Rosendhal, S.K. Kaer. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 :725–754, 2008.
- [14] C. Yin, S.K. Kaer, L. Rosendhal, S.L. Hvid. Co-firing straw with coal in a swirl stabilized dual-feed burner : modelling and experimental validation. *Bioresource Technology*, 101 :4169–4178, 2010.

- [15] C.E López, Pasquali. C. A. Wottitz. R.G. Martinez and H. A. Herrera. Carbonization of "algarrobo negro" (*Prosopis nigra*,) : a study of its microstructure and main volatile components. *Latin American Applied Research*, 32 :321–325, 2002.
- [16] D. Graber, J. Batten. Nano Enhanced Wholesale Technologie. <http://www.nano-enhanced-wholesale-technologies.com/faq/carbon-forms.htm>.
- [17] D. Veynante, L. Vervisch. Turbulent combustion modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 28 :193–266, 2002.
- [18] D.G. Levine, R.H. Schlosberg, B.G. Silbernagel. Understanding the chemistry and physics of coal structure (a review). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79 :3365–3370, 1982.
- [19] D.G. Richards. The BCURA coal sample bank a user handbook. Rapport technique, The British Coal Utilisation Research Association, 2002.
- [20] D.W. Van Krevelen. *COAL Typology-Chemistry-Physics-Constitution*. Elsevier, 1981.
- [21] E. Lester, M. Cloke, M. Allen. Char characterization using image analysis techniques. *Energy and Fuels*, 10 :696–703, 1996.
- [22] E. Therssen. *Etude de la dévolatilisation de charbon pulvérisés dans une flamme plate de propane*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille Flandres Artois (USTL), 1993.
- [23] E. Therssen, L. Delfosse. Pulverized solid injection system. application to laboratory burners and pyrometric temperature measurements. *Review of Scientific Instruments*, 66 :4041–4044, 1995.
- [24] E. Therssen, L. Gourichon, L. Delfosse. Etude expérimentale de la dévolatilisation rapide de charbons pulvérisés. *Revue Générale de Thermique*, 35 :394–401, 1996.
- [25] F. Cadavid. *Simulation numérique de la réduction des émissions de NOx dans un four pilote de 4 MW et une chaudière tangentielle de 609 MW à charbon pulvérisé*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2004.
- [26] F. Goodarzi. Morphology and chemistry of fines particules emitted from a canadian power-plant. *Fuel*, 85 :273–280, 2006.
- [27] G. G. De Soete. Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen. In *15th Symp. (Int'l.) on Combustion*, 1975.
- [28] G. Lu, Y. Yan. Temperature profiling of pulverized coal flames using multicolor pyrometric and digital imaging techniques. *Instrumentation and Measurement*, 55 :1303–1308, 2005.
- [29] G.G. De Soete. Mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion. *Revue Générale de Thermique*, 330-331 :353–373, 1989.
- [30] G.G. De Soete. Kinetics of nitrogen oxides formation and destruction, related to the combustion of pulverized solid fuels. In *International Symposium on Strategic Approach for implementation of primary DeNOx Measures in Large EU Pulverized Coal and Lignite Fired Units 2008-2015 and after 2015, Athens*, 2005.
- [31] H. Bockhorn. *Soot Formation in Combustion*. Springer, 1994.
- [32] H. Kobayashi, J.B. Howard, A.F. Sarofim. Coal devolatilization at high temperatures. In *16th Symp. (Int'l.) on Comb.*, 1976.
- [33] H. Pitsch, M. Ihme. An unsteady/flamelet progress variable method for large scale nonpremixed turbulent combustion. In *43rd Aerospace sciences meeting and exhibit*, 2005.

-
- [34] I. Durbak, D. W. Green, J.L. Howard, D.B. MCKeever, R.B. Miller, R.C. Pettersen, R.M. Rowell, W.T. Simpson, K.E. Skog, R.H. White, J.E. Winandy, J.I. Zerbe, USDA Forest Service. Wood. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition*, 25 :627–663, 1998.
- [35] I. Sykorova, W. Pickel, K. Christanis, M. Wolf, G.H. Taylor, D. Flores. Classification of huminite - ICCP system 1994. *International Journal of Coal Geology*, 62 :85–106, 2005.
- [36] International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new vitrinite classification (ICCP system 1994). *Fuel*, 77 :349–358, 1998.
- [37] International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new inertinite classification (ICCP system 1994). *Fuel*, 80 :459–471, 2001.
- [38] J. Cances. *Formation et réduction de NOx par un charbon, un lignite, un anthracite et un coke de pétrole dans les conditions d'un précalcinateur de cimenterie*. PhD thesis, École des Mines d'Albi-Carmaux, 2006.
- [39] J. Shao, Y. Yan, J. Krabicka. Comparative studies of electrostatic sensors with circular and rod electrodes for the velocity measurement of pulverized coal and biomass fuels. In *I2MTC*, 2009.
- [40] J. Yu, J. Lucas, T. Wall, G. Liu, C. Sheng. Modeling the development of char structure during the rapid heating of pulverised char. *Combustion and Flame*, 136 :519–532, 2004.
- [41] J. Yu, V. Strezov, J. Lucas, T. Wall. Swelling behaviour of individual coal particles in the single particle reactor. *Fuel*, 82 :1977–1987, 2003.
- [42] J.G. Bailey, A. Tate, C.F. Diesel, T.F. Wall. A char morphology system with application to coal combustion. *Fuel*, 69 :225–39, 1985.
- [43] J.L. Daudon. Thermogravimétrie - P1260. Rapport technique, Techniques de l'ingénieur, 2010.
- [44] J.M. Levy, L.K. Chana, A.F. Sarofima and J.M. Beé. NO/Char reactions at pulverized coal flame conditions. In *18th Symp. (Int'l.) on Combustion*, 1981.
- [45] L. Ma, M. Gharebaghi, R. porter, M. pourkashanian, J.M. Jones, A. Williams. Modelling methods for co-fired pulverised fuel furnaces. *Fuel*, 2009 :2448–2454, 88.
- [46] M. Cloke, T. Wu, R. Barranco, E. Lester. Char characterisation and its application in a coal burnout model. *Fuel*, 82 :1989–2000, 2003.
- [47] M.J. Wornat, R.H. Hurt, N.Y.C. Yang, T.J. Headley. Structural and compositional transformations of biomass chars during combustion. *Combustion and Flame*, 100 :131–143, 1995.
- [48] M.J.G. Alonso, A.G. Borrego, D. Alvarez, R. Menendez. Pyrolysis behaviour of pulverised coals at different temperatures. *Fuel*, 78 :329–337, 1999.
- [49] M.M. Baum, P.J. Street. Predicting the combustion behaviour of coal particles. *Combustion Science and Technology*, 3 :231–243, 1971.
- [50] M.Sami, K. Annamalai, M.Wooldridge. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27 :171–214, 2001.
- [51] N. Syred, J.M. Beér. Combustion in swirling flows : a review. *Combustion and Flame*, 23(2) :143–201, 1974.
- [52] P. Glaborg, A.D. Jensen, J.E. Johnsson. Fuel nitrogen chemistry in solid fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29 :89–113, 2003.

- [53] P. Gouillart, D. Vogt, J. Pis, D. Dugwell. Improvement in availability and reduction in operating costs of coal combustion. Rapport technique, ECSC Coal RTD Programme, 2000.
- [54] P. Molcan, G. Lu, T. Le Bris, Y. Yan, B. Taupin, S. Caillat. Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3 mwth combustion test facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques. *Fuel*, 88 (12) :2328–2334, 2009.
- [55] P.R. Solomon, T.H. Fletcher. Impact of coal pyrolysis on combustion. In *25th Symposium (Int'l) on Combustion*, 1994.
- [56] R. Borghi, M. Champion. *Modélisation et théorie des flammes*. Editions Technip, 2000.
- [57] R.I. Backreedy, J.M. Jones, M. Pourkashanian, A. Williams. Burn-out of pulverised coal and biomass chars. *Fuel*, 82 :2097–2105, 2003.
- [58] R.I. Backreedy, L.M. Fletcher, J.M. Jones, L. Ma, M. Pourkashanian, A. Williams. Co-firing pulverised coal and biomass : a modeling approach. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30 :2955–2964, 2005.
- [59] R.K. Hanson, S. Salimian. Survey of rate constants in H/N/O systems. *Combustion Chemistry*, Eds. Gardiner :361, 1984.
- [60] R.M. Carter, Y. Yan. On line particle sizing of pulverized and granular fuels using digital imaging techniques. *Measurement Science and Technology*, 14 :1099, 2003.
- [61] R.P. Van Der Lans, P. Glaborg and K. Dam-Johansen. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverised coal burners. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23 :349–377, 1997.
- [62] S. Badzioch, P.G.W. Hawksley. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 4 :1970, 521-528.
- [63] S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60 (2) :309–319, 1938.
- [64] S. Niksa. Coal combustion modeling perspectives. IEA PER/31, IEA coal research, 1999.
- [65] S. Pfadler, A. Leipertz, F. Dinkelacker. Systematic experiments on turbulent premixed busen flames including turbulent flux measurements. *Combustion and Flame*, 152 :616–631, 2008.
- [66] S.Niksa. Predicting the devolatilization behavior of any coal from its ultimate analysis. *Combustion and Flame*, 3 :384–394, 1995.
- [67] T. Fletcher, A. R. Kerstein, R. J. Pugmire, D.M. Grant. Chemical percolation model for devolatilization temperature and heating rate effects on product yields. *Energy and Fuels*, 4 :54–60, 1990.
- [68] T. Le Bris, F. Cadavid, S. Caillat, S. Pietrzyk, J. Blondin, B. Baudoin. Coal combustion modelling of large power plant, for NOx abatement. *Fuel*, 86 :2213–2220, 2007.
- [69] T. Sakamoto, K. Shibata, K. Takanashi, M. Owari, Y.Nihe. Analysis of surface composition and internal structure of fly ash particles using an ion and electron multibeam microanalyzer. *Applied Surface Science*, 203-204 :762–766, 2003.
- [70] T. Wu, E. Lester. A burnout prediction model based around char morphology. *Energy and Fuels*, 4 :54–60, 1990.
- [71] T.H. Fletcher, J. Ma, J. R. Rigby, A. L. Brown, B. W. Webb. Soot in coal combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23 :283–301, 1997.

-
- [72] Western Oregon University. Coal.
<http://www.wou.edu/las/physci/GS361/Fossil%20fuels/Coal.htm>.
- [73] W.P. Jones, J.H. Whitelaw. Calculation methods for reacting turbulent flows : A review.
Combustion and Flame, 48 :1-26, 1982.

Résumé

Ce travail concerne la combustion du charbon pulvérisé et la cocombustion charbon/biomasse (pellets de bois) en vue d'une utilisation dans des foyers de grande puissance. L'étude présente des résultats expérimentaux d'instruments nouvellement développés et traditionnels ainsi que de la modélisation numérique sur une chaudière équipée d'un brûleur bas-NOx à swirl de 3 MW_{th}. Ce travail prend place dans le cadre d'un projet Européen Interreg IIIA Franco-Britannique nommé COSAMM (Combustion Optimisation System through Advanced Modelisation and Measurements). Trois nouveaux instruments de mesure pour l'industrie sont développés par le Kent, un instrument sert à la mesure des particules dans la veine d'alimentation avant le brûleur. Juste en aval, une mesure optique expérimentale de la granulométrie est faite, le dernier instrument sert à la mesure de la température de flamme et à contrôler sa stabilité. Dans la flamme, des mesures de température par thermocouple et des mesures d'espèces sont faites en complément. Cet ensemble de mesures couplé à de la modélisation permet la validation des nouveaux instruments de mesure. De plus, l'aspect semi-industriel de la chaudière permet d'anticiper les problèmes pour le passage à l'étape industrielle. La thèse présente la nature des combustibles utilisés, leur combustion et la base de la théorie de la modélisation de leur combustion. Par la suite, le système expérimental est décrit. Les conditions d'entrée pour les modèles et la méthodologie d'obtention sont présentés. La première campagne d'essais permet la validation des instruments avec l'appui des mesures et de la modélisation. La seconde campagne d'essais se fait sur les paramétrages du brûleur, la connaissance de l'impact des paramètres du brûleur permet l'analyse des essais de la troisième campagne en co-combustion où les réglages du brûleur doivent être changés en fonction de la fraction de biomasse du combustible. On observe clairement l'impact d'un ajout de biomasse sur la flamme. La modification de la flamme est significative lors du passage de la combustion du charbon pur au mélange de charbon et de 5% massique de biomasse. Lors de la combustion des mélanges avec une autre proportion de biomasse les différences dans la flamme sont souvent trop faibles devant les erreurs liées aux paramétrages du brûleur. Cependant on observe une forte diminution des imbrûlés avec l'augmentation de la quantité de biomasse. Cette amélioration de la qualité de la combustion avec l'ajout de biomasse est contrebalancée par un fort encrassement du foyer.

Mots-clés: Combustion, Charbon, Biomasse, Modélisation Numérique, NOx.

Abstract

This work concerns pulverised coal combustion and coal/biomass co-firing (wood pellets) for use in large power plants. The study presents the results from classical instrumentation, new experimental devices and CFD computational fluid dynamics modeling on a 3 MW_{th} boiler equipped with a swirl low-NO_x burner. This work takes place in the framework of a Franco-British European project Interreg IIIA named COSAMM (Combustion Optimization System-through Advanced Modelling and Measurements). Three new tools for industry are developed at the university of Kent, an instrument is measuring particles speed in the feeding pipe before the burner. Just downstream on the feeding pipe, an optical particle size measurement by imaging is made, the last instrument used is measuring flame temperature and stability. In the flame, thermocouple and species measurements are made in complement. This measurement package coupled with modelling allows the validation of new the measurement instruments. The test on the semi-industrial boiler are used for anticipating problems for upgrading to the industrial stage. The thesis presents the used fuels nature, how they are burning and the theoretical bases for the combustion modelling. Moreover, the experimental setup is described. The input conditions for the models and the methodology are showed. The first test campaign allows validating the experimental instruments by the measures and the modelling. The second test campaign is done on burner parameters. Knowing the burner parameters impact on combustion allows the analysis of trials of the third campaign on cocombustion. Depending on the biomass massic fraction in input, the burner parameters must be changed. We clearly observed the impact of adding biomass to the flame. The modification of the flame is significant during the transition from burning pure coal to burning a mixture of coal and 5 % by mass of biomass. In the combustion of mixtures with a different biomass proportion, the differences in the flame are often too small comparing to errors. However there is a clearly a decrease in unburned carbon with the increasing biomass quantity. This combustion improvement with the biomass addition is offset by a strong slagging.

Keywords: Combustion, Coal, Biomass, Numerical Modelling, NO_x.

Étude de la combustion du charbon pulvérisé et de la biomasse sur un brûleur à swirl bas NOx

Thomas LE BRIS

Résumé

Ce travail présente la combustion du charbon pulvérisé et la cocombustion charbon/biomasse (pellets de bois) en vue d'une utilisation dans des foyers de grande puissance dans le cadre d'un projet Européen Interreg IIIA Franco-Britannique nommé COSAMM. L'étude présente des résultats d'instruments expérimentaux et traditionnels ainsi que de la modélisation numérique sur une chaudière équipée d'un brûleur bas-NOx à swirl de 3 MWth. Trois instruments sont à valider. Le premier sert à la mesure des particules dans la veine d'alimentation avant le brûleur. Juste en aval, une mesure optique expérimentale de la granulométrie est faite. Le dernier instrument sert à la mesure de la température de flamme et à contrôler sa stabilité. Dans la flamme, des mesures de température par thermocouple et des mesures d'espèces sont faites en complément. La thèse présente la nature des combustibles utilisés, leur combustion et les bases de la théorie de la modélisation de leur combustion. Le système expérimental et les conditions d'entrée pour les modèles sont présentés. La première campagne d'essais permet la validation des instruments avec l'appui des mesures et de la modélisation. La seconde campagne d'essais se fait sur les paramétrages du brûleur. La troisième campagne se fait sur la cocombustion, différents mélanges de charbon/biomasse sont brûlés. La modification de la flamme est significative lors du passage de la combustion du charbon pur au mélange de charbon et de 5% massique de biomasse. On observe une diminution des imbrûlés avec l'augmentation de la quantité de biomasse. Cette amélioration de la combustion avec l'ajout de biomasse est contrebalancée par l'encrassement du foyer.

Mots-clés : Combustion, Charbon, Biomasse, Modélisation Numérique, NOx.

Pulverised coal and biomass combustion study on a low-NOx burner

Thomas LE BRIS

Abstract

This work concerns pulverised coal combustion and coal/biomass co-firing (wood pellets) for use in large power plants in the framework of a Franco-British European project Interreg IIIA named COSAMM. The study presents the results from classical instrumentation, new experimental devices and CFD computational fluid dynamics modelling on a 3 MWth boiler equipped with a low-NOx swirl burner. Three new measurement devices for industry are to be validated. An instrument is measuring particles speed in the feeding pipe before the burner. Just downstream on the feeding pipe, an optical particle size measurement by imaging is made. The last instrument used is measuring flame temperature and stability. In the flame, thermocouple and species measurements are made in complement. The thesis presents the used fuels nature, how they are burning and the theoretical bases for the combustion modelling. Moreover, the experimental setup is described. The input conditions for the models and the methodology are showed. The first test campaign allows validating the experimental instruments by measures and modelling. The second test campaign is done on burner parametering. The third campaign is made on cocombustion, different mixes of coal and biomass are burnt. The impact of adding biomass to the flame is clearly observed from the raw coal fuel to the 5% biomass fuel. The modification of the flame is significant during the transition from burning pure coal to burning a mixture of coal and 5 % by mass of biomass. There is clearly a decrease in unburned carbon with the increasing biomass quantity. This combustion improvement with the biomass addition is offset by a strong slagging.

Keywords: Combustion, Coal, Biomass

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00900712