



Caractérisation et optimisation de la combustion de bois fragmenté en chaufferies automatiques

Claude Bernard

► To cite this version:

Claude Bernard. Caractérisation et optimisation de la combustion de bois fragmenté en chaufferies automatiques. Sciences de la Terre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2005. Français. NNT : 2005NAN10206 . tel-01747449

HAL Id: tel-01747449

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747449>

Submitted on 29 Mar 2018

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



THESE

Pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ,
NANCY I**

Spécialité : Sciences du Bois

Présenté par

Claude BERNARD

**Caractérisation et Optimisation de la Combustion de Bois Fragmenté
en Chaufferies Automatiques**

Directeur de thèse : Pr. André ZOULALIAN

Date prévue pour la soutenance : Vendredi 28 Octobre 2005

JURY

Rapporteurs :

G. ANTONINI
J-B. SAULNIER

Professeur, Université de Compiègne
Professeur, Université de Poitiers

Examineurs :

Ch. BAREL
Ch. HUON
Y. ROGAUME
A. ZOULALIAN

Chargé d'Etude, ADEME
Gérant, ENERGICO S.A.R.L.
Maître de Conférence, Université de Nancy, Co-Responsable
Professeur, Université de Nancy, Directeur de Thèse

Invité :

B. CHIEZE

Ingénieur, COMPTE S.A.

« Courage ! Vous avez déjà tourné une page. »

L'auteur

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier le Professeur Xavier DEGLISE et le Professeur Patrick PERRE, directeurs du LERMAB où j'ai mené l'essentiel de mon travail.

Mes remerciements s'adressent au Professeur Gérard ANTONINI et au Professeur Jean-Bernard SAULNIER pour l'intérêt et le temps qu'ils ont consacrés à ce travail.

Tous ma gratitude à la société ENERGICO et plus particulièrement la personne de Christophe HUON pour avoir financé cette étude de doctorat.

Mon plus profond respect est adressé au Professeur André ZOULALIAN dont la sagesse m'a évité maintes fois de me fourvoyer dans ce dédale scientifique.

Ma reconnaissance et mon amitié sont adressées à Yann ROGAUME qui m'a suivi, conseillé et soutenu chaque jour de ces longues années passées sur cette œuvre.

Merci à tout le personnel et aux étudiants de l'ENSTIB pour ce cadre et cet accueil chaleureux propre aux Vosges.

Merci à tout ceux qui m'ont épaulé, parents et amis, durant ces années de labeurs.

Sommaire

1. INTRODUCTION	1-2
2. DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	2-1
2.1. LE BOIS	2-2
2.1.1. Propriétés du matériau	2-2
2.1.2. Propriétés du combustible	2-6
2.1.3. Conclusions	2-10
2.2. COMBUSTION DU BOIS	2-11
2.2.1. Etape préalable de séchage	2-11
2.2.2. Etape de dégradation thermique et de combustion vive	2-12
2.2.3. Etape de combustion hétérogène	2-27
2.2.4. Conclusions	2-31
2.3. COMBUSTION EN CHAUDIERES AUTOMATIQUES	2-32
2.3.1. Technologies des chaudières automatiques	2-32
2.3.2. Etudes de combustion	2-38
2.3.3. Conventions	2-42
2.3.4. Conclusions	2-44
3. MATERIEL ET TRAITEMENTS	3-1
3.1. MATERIEL UTILISE	3-2
3.1.1. Banc de caractérisation du bois fragmenté	3-2
3.1.2. Chaudière COMPTE	3-6
3.1.3. Automate de gestion	3-12
3.2. GRANDEURS MESUREES	3-18
3.2.1. Matériel de mesure	3-18
3.2.2. Outils logiciels	3-22
3.3. GRANDEURS CALCULEES	3-26
3.3.1. Définitions des grandeurs courantes	3-26
3.3.2. Relations théoriques entre les grandeurs	3-30
3.3.3. Expression des grandeurs	3-38

Sommaire

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX	4-1
4.1. ESSAIS REALISES	4-2
4.1.1. Choix des paramètres	4-2
4.1.2. Analyse des mesures	4-3
4.2. RESULTATS.....	4-8
4.2.1. Caractérisation des combustibles étudiés	4-8
4.2.2. Essais de combustion	4-14
4.2.3. Synthèse des essais	4-31
4.3. CONCLUSION	4-43
5. OPTIMISATION DE LA REGULATION	5-1
5.1. INTRODUCTION.....	5-3
5.2. EMISSIONS DE MONOXYDE DE CARBONE.....	5-4
5.2.1. Analyse des résultats	5-4
5.2.2. Elaboration du modèle	5-8
5.2.3. Conclusion	5-14
5.3. OPTIMISATION DE LA REGULATION DE FONCTIONNEMENT	5-15
5.3.1. Conversion du facteur d'air	5-15
5.3.2. Emissions liées à une régulation classique	5-16
5.3.3. Régulation optimisée	5-17
5.4. SIMULATION	5-19
5.4.1. Expression des calculs	5-20
5.4.2. Emissions dues à une régulation classique	5-21
5.4.3. Emissions dues à une régulation optimisé	5-22
5.5. CONCLUSIONS	5-26
6. CONCLUSION	6-2

7. ANNEXES	7-1
7.1. RESULTATS D'EXPERIENCES	7-2
7.1.1. Coproduits de première transformation	7-2
7.1.2. Coproduits d'exploitation forestière	7-4
7.2. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	7-15

Nomenclature

Expressions générales

C_p	.....	expression générale d'une capacité calorifique	.....	en kJ/(kg.K)
m	.....	expression générale d'une masse	.....	en kg
$\dot{m}$	.....	expression générale d'un débit massique	.....	en kg/s
q	.....	expression générale d'une quantité de matière	.....	en mol
$\dot{q}$	.....	expression générale d'un débit de matière	.....	en mol/s
Q	.....	expression générale d'un volume de gaz	.....	en m ³
$\dot{Q}$	.....	expression générale d'un débit volumique de gaz	.....	en m ³ /h
$\bar{Q}$	.....	expression générale d'un volume normalisé de gaz	.....	en Nm ³
$\frac{\dot{Q}}{Q}$	.....	expression générale d'un débit volumique normalisé de gaz	.....	en Nm ³ /h
T	.....	expression générale d'une température	.....	en °C

Classement alphabétique de symboles grecs

α	.....	rapport cyclique de fonctionnement de la vis d'alimentation du foyer	.....	en %
Δp	.....	pression différentielle entre le foyer et l'ambient mesurée	.....	en Pa
ζ	.....	coefficient de remplissage de la vis d'alimentation du foyer	.....	
η_{global}	.....	rendement thermique global	.....	en %
$\rho_{bois.humide}$	.....	masse volumique apparente du bois humide	.....	en kg/MAP
$\rho_{bois.anhydre}$	.....	masse volumique apparente du bois anhydre	.....	en kg/MAP
ω_{H_b}	.....	coefficient liant la quantité d'eau générée par une quantité de bois	.....	
Ω	.....	vitesse de rotation de la vis d'alimentation du foyer	.....	en rad/s
Ω_{max}	.....	vitesse de rotation maximale de la vis d'alimentation du foyer	.....	en rad/s

Nomenclature

Classement alphabétique de symboles latins

$C_{bombe.calorimétrique}$	..capacité calorifique globale de la bombe calorimétrique	en kJ/K
$Cp_{bois.anhydre}$	capacité calorifique massique du bois anhydre	en kJ/(kg.K)
Cp_{eau}	capacité calorifique massique de l'eau	en kJ/(kg.K)
$Cp_{fumées.humides}$	capacité calorifique des fumées humides	en kJ/(Nm ³ .K)
f	facteur d'air	
f_{AP}	facteur d'air primaire	
f_{AS}	facteur d'air secondaire	
H_b	humidité sur brut	en %
H_s	humidité sur sec	en %
H_{tot}	humidité totale intégrant l'eau produite par l'oxydation de l'hydrogène du combustible	en %
L	chaleur latente de vaporisation de l'eau	en kJ/kg
m_{eau}	masse d'eau	en kg
$m_{bois.humide}$	masse de bois humide	en kg
$m_{bois.anhydre}$	masse de bois anhydre	en kg
$m_{cendres}$	masse de cendres dans le bois anhydre	en kg
$m_{pastille}$	masse de l'échantillon utilisé dans la bombe calorimétrique	en kg
M_{comb}	masse molaire du bois anhydre	en g/mol
P_{fourni}	puissance thermique fournie au réseau de chauffage	en kW
P	puissance combustible	en kW
PCS	pouvoir calorifique supérieur	en kJ/kg
$PCI_{anhydre}$	pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre	en kJ/kg
PCI	pouvoir calorifique inférieur du bois humide	en kJ/kg
q_{air}	quantité d'air	en mol
q_{bois}	quantité de bois anhydre	en mol
q_C	quantité de carbone atomique	en mol

Nomenclature

q_{CO}	 quantité de monoxyde de carbone	en mol
q_{CO_2}	 quantité de dioxyde de carbone.....	en mol
$q_{fumées.humides}$	 quantité de fumées humides	en mol
$q_{fumées.sèches}$	 quantité de fumées sèches	en mol
q_H	 quantité d'hydrogène atomique	en mol
q_{H_2O}	 quantité d'eau	en mol
$q_{H_2O}^c$	 quantité d'eau issue de la combustion de l'hydrogène du combustible	en mol
$q_{H_2O}^h$	 quantité d'eau issue de l'humidité du combustible	en mol
q_{N_2}	 quantité d'azote moléculaire	en mol
q_O	 quantité d'oxygène atomique.....	en mol
q_{O_2}	 quantité d'oxygène moléculaire.....	en mol
$q_{O_2}^c$	 quantité d'oxygène consommé par la combustion.....	en mol
$q_{O_2,C}^c$	 quantité d'oxygène consommé par la combustion du carbone atomique	en mol
$q_{O_2,CO}^c$	 quantité d'oxygène consommé par la combustion formant du monoxyde de carbone	en mol
q_{O_2,CO_2}^c	 quantité d'oxygène consommé par la combustion formant du dioxyde de carbone	en mol
$q_{O_2,H}^c$	 quantité d'oxygène consommé par la combustion de l'hydrogène atomique	en mol
$q_{O_2,O}^c$	 quantité d'oxygène consommé par la combustion de l'oxygène atomique du combustible	en mol
$q_{O_2}^i$	 quantité d'oxygène issu de l'air comburant	en mol
$q_{O_2}^o$	 quantité d'oxygène résiduel dans les fumées	en mol
Q_{fuites}	 volume d'air officieux passant par un orifice sous le foyer	en m ³
Q_{AP_1}	 volume d'air primaire n°1	en m ³
Q_{AP_2}	 volume d'air primaire n°2	en m ³
Q_{AP}	 volume d'air primaire incluant le volume de fuites.....	en m ³

Nomenclature

Q_{AS_1}	volume d'air secondaire n°1	en m ³
Q_{AS_2}	volume d'air secondaire n°2	en m ³
Q_{AS_3}	volume d'air secondaire n°3	en m ³
Q_{AS}	volume d'air secondaire	en m ³
$Q_{fumées.humides}$	volume de fumées humides.....	en m ³
t_M	temps de fonctionnement de la vis d'alimentation du foyer	en s
t_P	temps de pause de la vis d'alimentation du foyer.....	en s
T_{eau}	température de l'eau du réseau de chauffage mesurée sur le tuyau de sortie.....	en °C
$T_{éch}$	température des fumées mesurée à l'entrée de l'échangeur	en °C
T_f	température des fumées mesurée après l'extracteur.....	en °C
T_{foy}	température des fumées mesurée en sortie du foyer	en °C
T_0	température de référence	en K
T_{max}	température maximale théorique.....	en K
T_{ps}	temps de séjour théorique des fumées humides dans le foyer	en s
$S_{che min ée}$	surface de la section droite intérieure de la cheminée	en m ²
U_{O_2}	différence de potentiel mesurée sur la sonde Lambda	en V
$U_{T_{eau}}$	différence de potentiel mesurée sur la sonde de température de l'eau du réseau de chauffage mesurant sur le tuyau de sortie.....	en V
$U_{T_{éch}}$	différence de potentiel mesurée sur la sonde de température des fumées mesurant à l'entrée de l'échangeur.....	en V
U_{T_f}	différence de potentiel mesurée sur la sonde de température des fumées mesurant après l'extracteur	en V
$U_{T_{foy}}$	différence de potentiel mesurée sur la sonde de température des fumées mesurée en sortie du foyer.....	en V
$U_{\Delta p}$	différence de potentiel mesurée sur la sonde mesurant la pression différentielle entre le foyer et l'ambiant.....	en V
$v_{mesurée}$	vitesse des gaz mesurée par un moulinet ou le tube de Pitot	en m/s
V_a	pouvoir comburivore, soit le volume nécessaire à une combustion neutre.....	en Nm ³
V_f	pouvoir fumigène humide, soit le volume de fumées humides générées par une combustion neutre.....	en Nm ³

Nomenclature

V'_f	pouvoir fumigène sec, soit le volume de fumées sèches générées par une combustion neutre	en Nm ³
V_{foyer}	volume du foyer	en m ³
$V_{\text{récipient}}$	volume du récipient servant à mesurer la masse volumique apparente	en m ³
x_C	fraction massique de carbone dans le bois anhydre	
x_{cendres}	fraction massique de cendres dans le bois anhydre	
$x_{\text{holocellulose}}$	fraction massique d'holocellulose dans le bois anhydre	
x_H	fraction massique d'hydrogène dans le bois anhydre	
x_i	fraction massique de la classe de taille passant au travers de la grille i et refusée par la grille (i-1)	
x_O	fraction massique d'oxygène dans le bois anhydre	
x_S	fraction massique de soufre dans le bois anhydre	
X	charge de la chaudière	en %
X_{CO}	teneur en monoxyde de carbone mesurée dans les fumées sèches	
X_{O_2}	teneur en oxygène mesurée dans les fumées sèches	

1. Introduction

Le développement rapide et certain de la production d'énergie à partir du bois prend sa source dans de nombreux mécanismes. La ratification du protocole de Kyoto qui réclame une baisse de la production de gaz à effet de serre, la fin programmée des gisements de pétrole qui provoque la flambée du cours du baril, la prise d'autonomie nationale en terme de ressources en énergies primaires, l'exploitation raisonnée du patrimoine sylvicole s'ajoutent naturellement au potentiel d'emplois diffus sur le territoire inhérents à la filière d'approvisionnement en combustible bois.

C'est dans ce contexte politico-économique que le simplement nommé bois énergie croît chaque année avec davantage d'entreprises de production et de distribution du combustible répondant à davantage de chaudières installées chez le particulier, pour du chauffage collectif ou afin de produire l'énergie utile à des process industriels.

Forte de plusieurs décennies de savoir faire, l'industrie de fabrication des chaudières à bois a intégré de l'informatique aux machines d'hier afin de gagner en souplesse d'utilisation.

Autrefois lourdes de manutentions pénibles, les chaudières actuelles s'alimentent mécaniquement dans leur silo, modifient automatiquement leur production d'énergie en fonction des besoins de leur utilisateur, et certaines s'allument et s'éteignent à la demande.

Le bois énergie du troisième millénaire devait se doter de données scientifiques afin de rivaliser avec ses concurrents directs fondés sur des énergies fossiles épuisables. En effet, parent pauvre de la grande famille des ressources énergétiques, le bois rentre dans une période fastueuse où l'investissement dans la recherche devient à la fois rentable et nécessaire. Ce travail de thèse est un exemple d'investissement d'un bureau d'étude privé en partenariat avec l'Etat.

L'objectif de ce travail est d'optimiser le fonctionnement des chaudières automatiques au bois déchiqueté. Pour ce faire, la première étape consiste à se familiariser avec le fonctionnement de ces systèmes. En réalisant une multitude d'essais sur des appareils de puissance et de technologies différentes, nous avons appris à mieux analyser les points à améliorer et les paramètres à choisir pour y parvenir.

Parallèlement à ce travail de terrain, une recherche bibliographique a permis de faire le point sur l'état de l'art et de choisir définitivement les points importants à étudier. Bien que la recherche sur la valorisation énergétique du bois fut relativement abondante dans les années 70 et 80, assez peu d'études traitent de la combustion même du bois et encore moins des chaudières automatiques.

Aujourd'hui, les principales voies d'amélioration des appareils indépendants concernent leur souplesse d'emploi et les réglementations à venir sur les limitations des émissions polluantes.

En effet, les chaudières sont dimensionnées pour répondre aux besoins maximums en chauffage, et la majeure partie du temps, la puissance nécessaire est inférieure à cette puissance maximale. Même si une chaudière possède d'excellentes performances à plein régime, il semble alors plus important de garantir des performances élevées pour toute une gamme de puissance pouvant varier de 35% à 100% de la puissance nominale.

Une autre variable importante du chauffage au bois est la qualité même du bois, celle-ci peut varier d'une livraison à une autre. La saisonnalité, la concurrence et le gisement sont les réelles sources de variabilité du bois utilisé comme combustible. En cela, la littérature scientifique a permis de réduire les nombreuses caractéristiques du bois déchiqueté aux deux seules dont les variations ont de l'influence sur la combustion : la granulométrie et l'humidité.

L'essentiel de l'étude expérimentale s'est déroulé sur une installation type dont la technologie et la puissance sont représentatives des installations usuelles du bois énergie : il s'agit d'un foyer à grilles mobiles d'une puissance de 180 kW. Cette chaudière industrielle a tout d'abord été instrumentée avec une multitude de capteurs permettant de suivre en continu les températures au sein du foyer (environ 50 points de mesures), les débits entrants et sortants (débits d'air, de bois et de fumées) et la composition gazeuse des fumées.

La reprogrammation de l'automate de régulation a permis de faire varier les principaux paramètres de débits d'air et de bois. Le choix de combustibles de qualités différentes a naturellement complété l'éventail d'expériences permettant de déterminer les conditions optimales de combustion. Le Chapitre 4 présente les résultats issus de ces expérimentations et les synthétise afin de déterminer les paramètres les plus influents. Les informations cumulées permettent ensuite de caractériser les niveaux d'influence de ces différents paramètres et de déterminer le ou les données les plus viables pour mettre en place une régulation optimale du fonctionnement de la chaudière testée.

A partir de ces données, un certain nombre de lois mathématiques ont pu être déduites et sont présentées dans le Chapitre 5. Les résultats de ces lois permettent alors de proposer des modifications des logiques de régulations actuelles afin d'optimiser le fonctionnement des chaudières pour différentes conditions d'entrée.

La dernière partie de ce mémoire présente les conclusions issues de ce travail et recense un certain nombre de perspectives d'études et de recherche à venir pour continuer d'améliorer les performances des appareils de chauffage au bois automatiques.

2. Données bibliographiques

2.1. Le bois

Les propriétés physiques du bois varient selon l'essence ou les parties de l'arbre que l'on considère. Quid d'un feuillu ou d'un résineux, de la culée aux brindilles, l'humidité ou le taux de matières volatiles sont différents. Notre sujet réside dans l'utilisation comme combustible d'un bois fragmenté. Ce bois fragmenté peut être issu de nombreuses essences d'arbre différentes. Des hêtres, chênes ou frênes utilisés dans l'ameublement aux résineux utilisés dans le bâtiment ou la trituration, l'exploitation forestière ajoute à sa composition l'écorce, les brindilles ainsi que de la terre ou quelques cailloux. Notons que le combustible provient majoritairement du broyage des résidus d'exploitation forestière. L'obtention de plusieurs tonnes de plaquettes de quelques grammes chacune donne au combustible ainsi formé un caractère global. Les propriétés de ce combustible sont donc soit variables, soit considérées comme constantes. Ce premier paragraphe a simplement pour but de passer en revue l'ensemble des propriétés à prendre en compte pour notre étude.

Ce paragraphe se décompose naturellement selon les deux aspects du bois vu comme matériau puis comme combustible. Les propriétés du matériau que nous aborderons sont sa composition élémentaire, son hygroscopie, sa capacité calorifique et sa masse volumique. Les propriétés du combustible sont ses pouvoirs d'émettre des gaz et de la chaleur, et de produire des cendres.

L'humidité est fortement variable au cours du temps si bien qu'il convient de distinguer le bois anhydre du bois humide. Les autres propriétés sont par défaut exprimées sur la partie anhydre du bois. La valeur de l'humidité est le premier facteur d'incertitude, ce qui permet de négliger le plus souvent les variations des propriétés difficilement mesurables. D'autres propriétés sont globalement constantes comme la composition élémentaire. Celle-ci peut se résumer à une formule unique commune à toutes les essences de bois.

2.1.1. Propriétés du matériau

2.1.1.1. Humidité

2.1.1.1.1. Caractérisation

Le bois anhydre est par convention (Norme NF B 51-004, 1985 [30]) celui qui est obtenu après un séjour en étuve ventilée à 103-105°C jusqu'à stabilisation de la masse. Par conséquent, le terme « d'eau contenue » exclut l'eau de constitution qui ne peut être extraite que par dégradation du produit (Perre, 1994 [40]). Malgré cette notion restreinte « d'eau contenue dans le bois », celle-ci peut représenter plus de la moitié de la masse du bois. Cette eau contenue dans le bois peut apparaître sous trois formes : l'eau libre, l'eau liée et l'eau vapeur.

2.1.1.1.2. L'eau liée et l'eau vapeur

Pour des humidités du bois inférieures au point de saturation des fibres (valeur moyenne de l'ordre de 30% d'humidité sur sec, soit 23% d'humidité sur brut), l'eau dans le bois se trouve sous forme d'eau vapeur et d'eau liée ou adsorbée sur les fibres du bois et plus particulièrement sur les fonctions hydroxyles de la cellulose et des hémicelluloses. A une température donnée, il existe un équilibre entre l'eau vapeur et l'eau liée, la courbe d'équilibre ainsi obtenue (isotherme d'adsorption) dépend peu de la nature de l'essence. Dans ce domaine d'humidité, appelé domaine hygroscopique du bois, on observe une variation dimensionnelle du bois en fonction de son humidité et donc de celle du milieu extérieur.

2.1.1.1.3. L'eau libre

Au delà du domaine hygroscopique, il apparaît dans les cavités du bois de l'eau dite libre ou capillaire : en effet, l'eau libre est soumise aux forces capillaires. Dans un capillaire, l'énergie surfacique de l'interface liquide-gaz (la tension superficielle) induit une pression de vapeur d'eau inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau à la température du milieu. C'est cette différence de pression qui permet à l'eau capillaire de circuler de bas en haut dans l'arbre vivant.

2.1.1.1.3.1 Définitions

La quantité d'eau contenue dans le bois se mesure relativement à la masse de bois anhydre et humide. Ainsi, l'humidité peut être évaluée comme le rapport de la masse d'eau sur la masse de bois humide. Il s'agit alors de l'humidité dite sur brut, notée H_b :

$$H_b = \frac{m_{\text{bois,humide}} - m_{\text{bois,anhydre}}}{m_{\text{bois,humide}}} \quad (\text{Eq. 2-1})$$

Où : $m_{\text{bois,humide}}$ est la masse de bois humide en kg ;

$m_{\text{bois,anhydre}}$ est la masse de bois anhydre en kg ;

H_b est l'humidité sur brut.

L'humidité sur brut représente la fraction massique d'eau contenue dans le bois, elle n'a, par conséquent, pas de dimension. Néanmoins, la valeur de l'humidité est toujours donnée en pourcentage, car pour $H_b = 1$ ou 100% la masse de bois anhydre est nulle. Autrement dit, l'humidité sur brut ne peut pas dépasser la valeur limite de 1.

Une autre définition de l'humidité est possible : lorsque le rapport exprimé concerne la masse d'eau sur la masse de bois anhydre, l'humidité définie est l'humidité dite sur sec, notée H_s . Les professionnels du bois d'œuvre ou de l'ameublement utilisent plutôt l'humidité sur bois sec. L'humidité sur brut est plus généralement utilisée en combustion. Les deux humidités sont liées par la relation :

$$H_b = \frac{H_s}{1 + H_s} \quad (\text{Eq. 2-2})$$

Où : H_b est l'humidité sur brut ;

H_s est l'humidité sur sec.

Dans la suite de ce travail, l'humidité sera toujours exprimée sur brut et notée H_b .

2.1.1.1.3.2 Données

L'humidité du bois varie spontanément au cours du temps en fonction des conditions atmosphériques de son stockage :

- lorsque du bois est fraîchement coupé, son humidité sur brut peut dépasser 50% ;
- après plusieurs mois de stockage sous couvert et ventilé (opération de ressuyage), l'humidité sur brut se stabilise entre 20 et 30% ;
- après un séchage forcé puis un stockage à l'intérieur de locaux comme ceux d'une entreprise, l'humidité sur brut du bois se stabilise entre 10 et 15%.

Néanmoins, l'évaluation de l'humidité du bois s'obtient rapidement grâce à du matériel léger. A l'aide d'un récipient, d'une balance adaptée et d'une étuve ventilée réglable à 103°C (un four de cuisine peut remplir cette fonction), l'humidité de plaquettes de bois de quelques centimètres de dimensions caractéristiques s'obtient en 24 heures. Ce temps de séchage augmente avec les dimensions des morceaux de bois.

2.1.1.2. Composition élémentaire

Afin d'établir un lien entre la combustion d'une masse de bois et la quantité de gaz produits, il est nécessaire de connaître la composition élémentaire du bois. Rappelons que le mot « bois » signifie désormais « bois anhydre ». Le Tableau 2-1 permet de comparer la composition élémentaire de trois essences d'arbre différentes (deux feuillus et un résineux) à d'autres biomasses pouvant être utilisées combustibles.

	Rapports massiques						Rapports atomiques		
	C	H	O	N	S	Cendres	H/C	O/C	N/C
Chêne noir	49,0%	6,0%	43,5%	0,2%	0,02%	0,34%	147%	67%	0,3%
Pin Douglas	50,6%	6,2%	43,0%	0,1%	0,02%	0,10%	147%	64%	0,2%
Aulne rouge	49,6%	6,1%	43,8%	0,1%	0,07%	0,41%	148%	66%	0,2%
Noyau de Pêche	49,1%	6,3%	43,5%	0,5%	0,02%	0,05%	154%	66%	0,9%
Déchets de coton	42,8%	5,1%	35,4%	1,5%	0,55%	14,70%	143%	62%	3,0%
Son de riz	38,3%	4,4%	35,5%	0,8%	0,06%	21,00%	138%	70%	1,8%
Mout de raisin	54,9%	5,8%	32,1%	2,1%	0,21%	4,85%	127%	44%	3,3%

Tableau 2-1 : Analyses élémentaires de trois essences d'arbre et de quatre biomasses combustibles d'après Rossi, 1984 [46].

Le Tableau 2-1 indique les rapports atomiques de l'hydrogène (H/C), de l'oxygène (O/C) et de l'azote (N/C) en fonction du carbone. Le bois obtient une moyenne des rapports H/C, O/C et N/C respectivement d'environ 147%, 66% et 0,2%. L'azote contenu dans le bois peut être négligé devant le carbone, l'hydrogène et l'oxygène. Les analyses présentées dans le Tableau 2-1 montrent que le soufre est environ 10 fois plus rare que l'azote. Le soufre peut donc être négligé dans la composition du bois. Ces premiers résultats justifient une formulation simplifiée du bois dans laquelle ne figureraient que les trois composants que sont le carbone, l'hydrogène et l'oxygène.

Les déchets de coton et les noyaux de pêches ont des rapports H/C et O/C très proches de ceux du bois, même si ces autres biomasses contiennent davantage d'azote. Le son de riz, les déchets de coton et le mout de raisin contiennent beaucoup plus de minéraux que le bois. Les déchets de coton et le mout de raisin contiennent plus d'azote et plus de soufre que le bois.

Strehler [53] donne une formulation globale du bois faisant figurer l'azote :



Cette formulation fait apparaître un taux d'hydrogène plus faible et un taux d'oxygène légèrement plus faible que ceux du Tableau 2-1. De 147% d'hydrogène par rapport au carbone pour les travaux de Rossi [46], la formulation de Strehler [53] n'en fait apparaître que 139,5%. De même, l'oxygène passe de 66% à 64,5%. L'azote se révèle toujours aussi négligeable devant les trois autres composants.

Nous retiendrons alors dans notre étude la formulation de Deglise [12] qui fait disparaître l'azote :



Cette formulation globale du bois, en plus d'être en accord avec les précédentes, a l'avantage de faciliter les calculs. Le bois ainsi décrit a une masse molaire de 24g/mol et correspond à la composition massique simple donnée dans le Tableau 2-2 :

C	H	O
50%	6%	44%

Tableau 2-2 : Analyse élémentaire moyenne de bois anhydres selon Deglise, 1982 [12].

Dans la suite de notre étude, c'est cette formulation qui sera prise en compte pour les différents calculs.

2.1.1.3. Capacité calorifique

La capacité calorifique massique est la quantité de chaleur utile à l'élévation d'un degré d'une unité de masse. La relation proposée par Wenzl en 1970 [61] exprime la capacité calorifique du bois anhydre en fonction de la température :

$$Cp_{\text{bois.anhydre}} = 1,114 + 0,00486.T \quad (\text{Eq. 2-5})$$

Où : $Cp_{\text{bois.anhydre}}$ est la chaleur spécifique du bois anhydre en kJ/(kg.K) ;

T est la température en °C.

2.1.1.4. Masse volumique

La masse volumique du bois anhydre peut être très différente selon l'échelle à laquelle la mesure est effectuée. On distingue :

- la masse volumique des parois des cellules constitutives du bois, à l'échelle du nanolitre : de 1460 à 1540 kg/m³ (Tillman, 1987 [56]) ;
- la masse volumique du bois massif, à l'échelle du litre : de 200 à 1350 kg/m³ pour l'ensemble des essences qui se réduit de 400 à 600 kg/m³ pour les essences majoritaires en Europe (Tillman, 1987 [56]) ;
- la masse volumique d'un tas de bois déchiqueté, à l'échelle du mètre-cube : de 100 à 300 kg/m³ (Strehler, 2000 [53]).

La différence entre les masses volumiques des échelles du nanolitre et du litre met en évidence le vide existant dans le bois à l'échelle cellulaire. Ce vide peut-être occupé par l'eau libre, ou par de l'air si le bois est anhydre.

La différence entre les masses volumiques des échelles du litre et du mètre-cube met en évidence le vide dû à l'arrangement des particules de bois fragmenté. Contrairement au précédent, ce vide n'est pas structuré en cavités et en capillaires et il ne contient que de l'air. Il dépend de la forme et des dimensions des éléments en bois massif constituant le tas ou la pile. Le rapport de la masse volumique d'un tas de bois sur la masse volumique du bois massif qui constitue le tas s'appelle le *foisonnement*.

La masse volumique anhydre est liée au solide considéré. La masse volumique humide est dépendante de l'humidité du bois. Les dimensions et les formes des particules qui engendrent le foisonnement d'un tas ne dépendent que très peu de l'humidité. Un tas de bois fragmenté humide est donc, comme dans le cas du sable humide, augmenté de la masse d'eau qu'il contient. La masse volumique humide se déduit donc de la masse volumique anhydre par la formule suivante :

$$\rho_{\text{bois.humide}} = \frac{1}{1 - H_b} \cdot \rho_{\text{bois.anhydre}} \quad (\text{Eq. 2-6})$$

Où : $\rho_{\text{bois.humide}}$ est la masse volumique humide en kg/MAP ;

$\rho_{\text{bois.anhydre}}$ est la masse volumique anhydre en kg/MAP ;

H_b est l'humidité sur brut moyenne du tas.

Nota : le MAP est une unité du bois-énergie signifiant Mètre-cube Apparent de Plaquettes. Scientifiquement parlant, retenons que 1 MAP = 1 m³ de bois fragmenté.

2.1.2. Propriétés du combustible

2.1.2.1. Pouvoir calorifique

2.1.2.1.1. Pouvoir Calorifique Supérieur

Le pouvoir calorifique supérieur ou PCS est la quantité d'énergie maximale que peut délivrer la combustion neutre d'une unité de masse d'un combustible alors que l'eau produite par cette combustion est recondensée à l'état liquide. Le PCS est évalué dans les conditions normales de pression et de température : i.e. 0,1 MPa et 0 °C.

De nombreuses études ont cherché à corréler le PCS à différents paramètres. Les modèles les plus courants consistent à corréler le PCS à la composition chimique élémentaire, on obtient les modèles suivants :

$$PCS = 47500.x_C - 2380 \quad \text{Tillman, 1987 [56] ; (Eq. 2-7)}$$

$$PCS = 35530.x_C + 112860.x_H + 10870.(x_S - x_O) \quad \text{Vandralek [45] ; (Eq. 2-8)}$$

Où : PCS est exprimé en kJ/kg ;

x_C est la fraction massique en carbone dans le bois anhydre ;

x_H est la fraction massique en hydrogène dans le bois anhydre ;

x_S est la fraction massique en soufre dans le bois anhydre ;

x_O est la fraction massique en oxygène dans le bois anhydre.

Pour une fraction massique de carbone égale à 50%, le premier modèle donne un PCS de 21370 kJ/kg, valeur élevée devant les mesures, l'ordre de grandeur étant correct. Le second modèle, appelé formule de Vandralek, donne, pour une composition du bois conforme au Tableau 2-2, un PCS de 19754 kJ/kg.

Cet article présente également un modèle de PCS exprimé en fonction à la fraction d'holocellulose. L'holocellulose est le terme générique de la cellulose et des hémicelluloses, deux des trois principaux constituants du bois, le troisième étant la lignine.

$$PCS = 26750 - 9210.x_{holocellulose} \quad \text{Tillman, 1987 [56] ; (Eq. 2-9)}$$

Où : PCS est exprimé en kJ/kg ;

$x_{holocellulose}$ est la fraction massique d'holocellulose dans le bois anhydre.

Le PCS du bois varie selon l'essence mais peut être regroupé en 2 catégories : le bois de feuillus et de résineux. Seulement, lors de l'utilisation du bois comme combustible, le mélange d'essences est courant, d'où la nécessité d'utiliser des valeurs moyennes pour les grandeurs caractéristiques telles que le PCS. D'après Deglise (1982 [12]), la valeur moyenne du PCS du bois anhydre est de 19850 kJ/kg. En considérant les résultats de Rossi en 1984 tirées de l'article de Tillman, 1987 [56] (Tableau 2-3), les espèces feuillues ont un PCS moyen de 19000 kJ/kg tandis que les espèces résineuses ont un PCS moyen de 20000 kJ/kg. Les espèces résineuses ont un PCS légèrement supérieur aux espèces feuillues (écart d'environ 5%).

Nos propres mesures donnent des valeurs de PCS de bois fragmenté en moyenne égales à 20500 kJ/kg. Nos mesures ont été effectuées selon la norme NF M03-005 [34] comme indiqué dans le Paragraphe 3.1.1.5 sur le bois fragmenté dont nous disposons.

Nous retiendrons cette valeur moyenne du PCS de 20500 kJ/kg dans la suite de l'étude.

2.1.2.1.2. Pouvoir calorifique inférieur

Le pouvoir calorifique inférieur ou PCI est la quantité de chaleur maximale fournie par la combustion neutre d'une unité de masse de combustible lorsque l'eau formée par la combustion demeure à l'état de vapeur. Autrement dit, le PCI se déduit du PCS par soustraction de l'énergie utile à la vaporisation de la masse d'eau produite au cours de la combustion. Cette eau produite est issue de 2 processus différents :

- l'eau contenue dans le bois directement sous forme d'eau adsorbée : $H_2O^{\text{liquide}} \xrightarrow{0^\circ C} H_2O^{\text{gaz}}$;
- l'eau formée par réaction de l'hydrogène du bois avec de l'oxygène : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$.

2.1.2.1.2.1 Le PCI anhydre

On exprime le PCI anhydre en ne considérant que l'eau formée par l'hydrogène contenue dans le combustible. Il s'exprime par la formule suivante :

$$PCI_{\text{anhydre}} = PCS - 9.L.x_H \quad (\text{Eq. 2-10})$$

Où : PCS est le pouvoir calorifique supérieur du bois anhydre en kJ/kg ;

PCI_{anhydre} est le pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre en kJ/kg ;

9 est le rapport de masse d'eau produite par masse d'hydrogène investi ;

L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, soit 2500 kJ/kg ;

x_H est la fraction massique d'hydrogène dans le bois anhydre.

Le PCI anhydre est intrinsèque à la composition du combustible bois. C'est pourquoi, Strehler [53] préfère avancer ce paramètre comme constant plutôt que le PCS. Cet article donne une valeur du PCI anhydre de 18560 kJ/kg. Le Tableau 2-3 contient aussi des mesures de PCS publiées par Rossi [46] et réalisées sur le bois et sur l'écorce de deux feuillus et deux résineux. Ce Tableau 2-3 contient également des mesures de PCS réalisées sur d'autres biomasses. On peut noter que l'écorce des résineux a un PCS d'environ 5% supérieur au PCS du bois des mêmes essences. Pour les feuillus, le PCS de l'écorce est égal voire inférieur à celui du bois. Le PCS des bois résineux est globalement 5% supérieur au PCS des bois feuillus.

Tout comme le PCS, de nombreuses études ont cherché à corréler le PCI anhydre à la composition élémentaire. Le modèle suivant prend en compte les 3 éléments C, H et O :

$$PCI_{\text{anhydre}} = 34030.x_C + 121640.x_H - 12540.x_O \quad \text{Amy, 1961 [1] ; (Eq. 2-11)}$$

Où : PCI_{anhydre} est le pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre en kJ/kg ;

x_C est la fraction massique de carbone dans le bois anhydre ;

x_H est la fraction massique d'hydrogène dans le bois anhydre ;

x_O est la fraction massique d'oxygène dans le bois anhydre.

En appliquant les valeurs du Tableau 2-2 à ce modèle, on obtient un PCI anhydre égal à 18796 kJ/kg.

Moyennant l'ensemble des valeurs considérées jusqu'ici, on obtient un PCI anhydre égal à 19100 kJ/kg, soit une valeur de 2,9% supérieure à celle donnée par Strehler [53].

2.1.2.1.3. Le PCI ou PCI humide

Le PCI utilisé en combustion est aussi appelé PCI humide par opposition au PCI anhydre. Il prend en compte l'eau contenue dans le bois. Nous avons donc besoin de l'humidité sur brut H_b pour le calculer.

Ce PCI comprend donc de l'énergie fournie par la combustion de la part de bois anhydre et de l'énergie absorbée par l'évaporation de la part d'eau. L'eau formée par la combustion du bois anhydre étant évaporée elle aussi, l'énergie prise en compte dans le calcul du PCI est celle du PCI anhydre selon la formule suivante :

$$PCI = (1 - H_b) \cdot PCI_{anhydre} - H_b \cdot L \quad (\text{Eq. 2-12})$$

Où : $PCI_{anhydre}$ est le pouvoir calorifique inférieur du bois anhydre en kJ/kg ;

L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, soit 2500 kJ/kg ;

H_b est l'humidité sur brut du combustible.

La variabilité de l'humidité du matériau hygroscopique qu'est le bois engendre une variabilité du PCI. En cela, il est sans intérêt aucun d'évoquer le PCI d'un combustible sans préciser l'humidité à laquelle ce PCI est donné. Néanmoins, il est intéressant de visualiser l'évolution du PCI en fonction de l'humidité.

La Figure 2-1 ci-dessous représente le PCI en fonction de l'humidité en considérant un PCS de 20500 kJ/kg et une fraction massique d'hydrogène de 6% par rapport à la masse de bois anhydre.

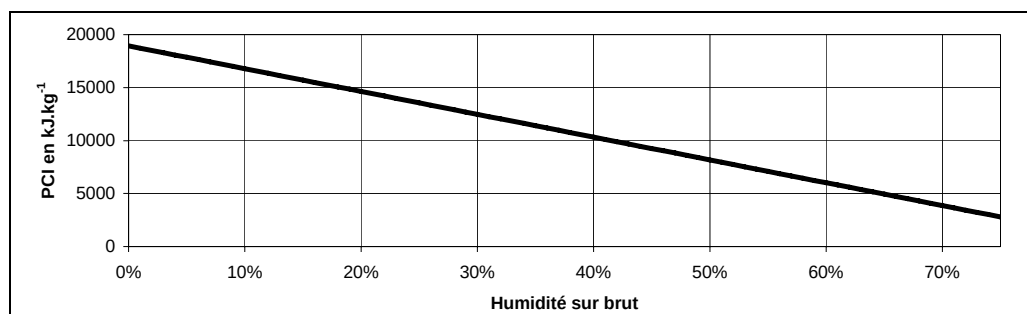


Figure 2-1 : Illustration de l'évolution du PCI en fonction de l'humidité sur brut.

La Figure 2-1 permet de constater qu'un bois à 20% d'humidité sur brut (bois ressuyé) a un PCI du double de celui d'un bois d'humidité sur brut de 55% (bois vert).

2.1.2.2. Taux de matières volatiles

La combustion du bois se déroule en trois phases : le séchage, la combustion vive et la combustion hétérogène. La période de séchage est dépendante de l'humidité du bois. La période de combustion vive dépend de la quantité de matières volatiles contenue dans le bois anhydre. La période de combustion hétérogène dépend de la quantité de carbone fixe. Enfin, les cendres représentent la quantité de matière restant après que la combustion ait eu lieu.

Les taux de matières volatiles et de carbone fixe déterminent donc la façon dont le bois anhydre brûle. Le Tableau 2-3 regroupe des informations publiées par Tillman (1987 [56]) obtenues par Rossi en 1984 [46]. Ces résultats sont issus de l'étude de plusieurs essences de bois. Ce Tableau 2-3 regroupe des mesures de fractions massiques de matières volatiles, de carbone fixe et de cendres, ainsi que le pouvoir calorifique supérieur. Une colonne supplémentaire indique le rapport massique entre matières volatiles et carbone fixe. A cette analyse de différentes essences de bois est ajoutée celle de six autres biomasses et de deux types de charbons minéraux afin d'en permettre une comparaison.

	Matières volatiles	Carbone fixe	Cendres	Rapport volatiles sur carbone fixe	PCS en kJ/kg
Chêne noir	85,6%	13,0%	1,4%	6,6	18 650
Pin Douglas	87,3%	12,6%	0,1%	6,9	20 370
Aulne rouge	87,1%	12,5%	0,4%	7,0	19 300
Chêne noir	81,0%	16,9%	2,1%	4,8	17 090
Pin Douglas	73,6%	25,9%	0,5%	2,8	21 930
Aulne rouge	77,3%	19,7%	3,0%	3,9	19 440
Noyau de Pêche	79,1%	19,8%	1,1%	4,0	19 420
Déchets de coton	75,4%	15,4%	9,2%	4,9	15 580
Son de riz	63,6%	15,8%	20,6%	4,0	14 890
Mout de raisin	74,4%	21,4%	4,2%	3,5	21 810
Charbon bitumineux de Pensylvanie	6,2%	79,4%	11,9%	0,1	34 900
Charbon sub-bitumineux du Wyoming	40,7%	54,4%	4,9%	0,8	23 300

Tableau 2-3 : Analyses en pyrolyse et en combustion de différents bois, biomasses et charbons minéraux publiées par Rossi en 1984 [46].

Les matières volatiles du bois représentent en moyenne 87% de la masse anhydre et 12,7% pour le carbone fixe. L'écart entre les essences est très faible ($\pm 2\%$), d'où un comportement homogène prévisible des bois utilisés pendant leur combustion.

En revanche, l'écorce de ces mêmes essences de bois contient moins de matières volatiles avec un maximum de 81% de la masse de bois anhydre. Dans les conditions opératoires choisies par Rossi, la fraction massique de charbon n'excède pas 13% de la masse de bois anhydre, due probablement à une mise en température rapide.

Par rapport aux bois, les autres biomasses combustibles contiennent moins de matières volatiles. Notons également que le charbon minéral se dégrade majoritairement sous forme de carbone fixe.

2.1.2.3. Taux de cendres

Les cendres sont des résidus de combustion solides ne comportant plus aucune part combustible. Par convention (Normes NF M 03-003 [33]), ces cendres sont obtenues après un séjour sous atmosphère oxydante (en pratique : de l'air) dans un four à 805-825°C, une stabilisation de la masse avec disparition complète des particules noires (charbon).

Le bois contient des matières minérales, principalement : Si, Ca, K, Al, Mg, P, Mn, Na, Fe [12]. Pendant la combustion, ces composés minéraux et métalliques se retrouvent sous forme oxydée dans les cendres. Les composés formant les cendres sont : SiO_2 , CaO , K_2O , Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , MnO_2 , Na_2O , Fe_2O_3 [36,37]. La quantité d'oxygène fixé dans les cendres fait que la masse de cendres obtenue est bien supérieure à la masse de minéraux contenue dans le bois.

Le bois forme 0,3% à 1% de sa masse anhydre de substances minérales [16,42,53,56]. Malgré ces données, le combustible-bois produit des cendres pour 1% de sa masse anhydre, voire plus. Cette augmentation de la masse de cendres est essentiellement due au mode de manipulation et de stockage du combustible bois qui entraîne une souillure du bois par du sable et de la terre végétale.

D'après nos mesures, le bois issu de l'industrie de seconde transformation donne une masse de cendres égale à 0,9% de la masse de combustible anhydre. En effet, ce bois est purgé de son écorce et de ses parties les moins nobles avant d'être déchiqueté. En revanche, le bois fragmenté obtenu par déchiquetage des coproduits d'exploitation forestière contient davantage de matières minérales. Le taux de cendres varie alors entre 2% et 5% de la masse de bois anhydre.

2.1.3. Conclusions

L'humidité du bois est très variable. Elle doit être mesurée sur chaque échantillon de bois. Elle joue un rôle majeur sur l'ensemble des paramètres du bois vu comme matériau ou comme combustible.

La composition élémentaire du bois anhydre peut être approchée par une constante quelle que soit l'essence ou la partie de l'arbre considérée. Cette approximation est d'une précision suffisante dans le domaine d'application du bois énergie où règne de nombreuses incertitudes dont la provenance du bois fragmenté utilisé.

La capacité calorifique du bois anhydre peut être considérée globalement. Son expression dépend principalement de la température.

La masse volumique du bois dépend beaucoup de l'échelle à laquelle le matériau est étudié. Concernant la forme et les volumes spécifiques (de l'ordre du MAP) du bois utilisé comme combustible, la masse volumique apparente d'un tas de bois ne dépend que de l'humidité. La masse volumique apparente d'un tas de bois fragmenté anhydre ne dépend alors que de la forme et de l'arrangement des particules. La masse volumique apparente doit donc être mesurée pour chaque type de fournisseur.

Le pouvoir calorifique supérieur peut être considéré comme constant quel que soit le combustible utilisé. Le pouvoir calorifique inférieur se déduit du précédent par la composition en hydrogène du bois anhydre (constante) et de l'humidité (mesurée). Le pouvoir calorifique inférieur n'est donc sujet à aucune mesure supplémentaire.

Le taux de matières volatiles du bois anhydre est très peu dépendant de son origine.

Le taux de cendres du bois fragmenté anhydre est très dépendant de la provenance du bois (industrie ou forêt). Ce paramètre demeure très faible (en rapport de masse) devant les incertitudes liées à l'humidité. Sa fraction massique dans le combustible peut donc être négligée.

2.2. Combustion du bois

Le paragraphe précédent a rappelé les caractéristiques du matériau bois. Le présent paragraphe a pour but de détailler le comportement du matériau lors de sa combustion. Il est composé de trois sous paragraphes qui reprennent chacun une étape de la combustion : le séchage, la combustion vive et la combustion hétérogène. Chaque partie est introduite par une figure qui permet de visualiser spatialement les différents phénomènes physiques se déroulant durant l'étape étudiée. Ces figures se lisent horizontalement afin de localiser chacun des phénomènes engendrés. La lecture verticale de ces figures permet de recouper les phénomènes chimiques (en bas) inhérents aux phénomènes thermiques (au centre) dus à un gradient de température (en haut) impliqué par l'énergie libérée par les réactions chimiques.

2.2.1. Etape préalable de séchage

Le bois est un matériau hygroscopique si bien qu'il contient toujours une part d'eau à la température ambiante. Or, cette eau change d'état au fur et à mesure de l'accroissement de la température. Cette étape de séchage est généralement terminée avant que le bois atteigne les températures auxquelles la dégradation des hémicelluloses commence, soit environ 200°C [9,12]. Notons également que la lignine subit une transition vitreuse à partir de 70°C sans que ce changement d'état ne soit la source d'émission de gaz

Cette première étape de la combustion d'une particule de bois est schématisée dans la Figure 2-2.

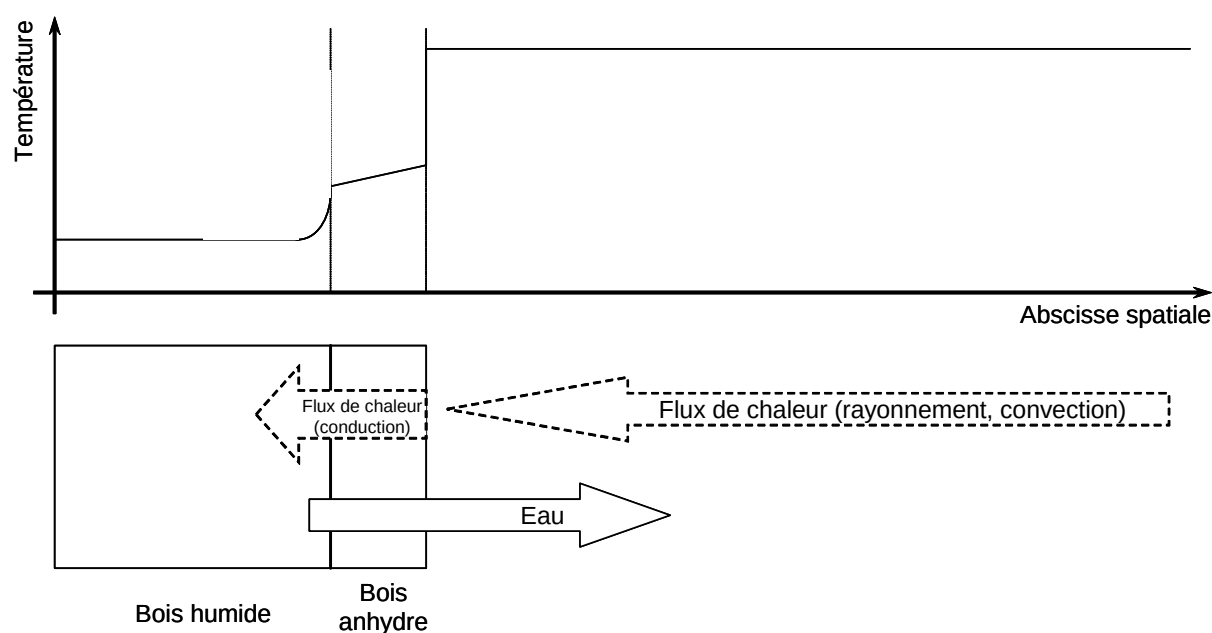


Figure 2-2 : Schématisation de l'étape de séchage du bois.

La Figure 2-2 indique le sens du flux de chaleur ainsi que son mode de propagation. L'énergie, essentiellement transmise par rayonnement (et par convection de façon moindre), a pour effet d'élever la température de la surface du solide. Ce gradient de température dans le solide engendre un flux de chaleur conductif au sein de celui-ci.

Le changement de phase de l'eau requiert un fort apport en énergie thermique si bien que la zone dans laquelle le changement de phase a lieu constitue une véritable barrière à la propagation de la chaleur au sein du solide encore humide.

2.2.2. Etape de dégradation thermique et de combustion vive

Durant cette étape de la combustion, le bois solide reçoit de l'énergie provenant de la flamme pour avancer sa dégradation thermique. Il émet des gaz qui réagissent avec l'oxygène de l'air environnant. Le lieu de rencontre et de réaction entre gaz et oxygène est visible, il s'agit de la flamme. Celle-ci se forme loin du solide car l'oxygène peine à atteindre la surface du solide vu qu'il est consommé au fur et à mesure.

Lorsque la température du solide atteint 500°C, les dégagements de gaz sont très faibles. La combustion devient hétérogène car l'oxygène de l'air peut enfin atteindre la surface du solide et réagir par adsorption. Cette dernière phase de la combustion est présentée dans le paragraphe 2.2.3.

Nous allons nous limiter dans ce paragraphe à la dégradation thermique du bois en atmosphère appauvrie en oxygène et à la combustion vive des gaz issus de cette dégradation.

2.2.2.1. Schématisation des phénomènes

Durant la phase de combustion vive, l'ensemble des gaz et condensables est évacué de la particule mu par une différence de pressions partielles et totale. Il rencontre alors l'oxygène provenant de l'air ambiant. Il en découle des réactions d'oxydation rapides et exothermiques. Ces réactions ont lieu en phase gaz. La flamme est alors qualifiée de diffusion puisque l'oxygène doit diffuser au travers des produits de combustion, mu par la différence de pression partielle, afin d'aller à la rencontre des produits combustibles émanant du bois en cours de pyrolyse. L'oxygène de l'atmosphère ambiante est consommé dans cette flamme si bien que très peu de cet oxygène atteint la surface solide de la particule (Kanury, 1994 [18]). Ce phénomène de barrière à l'oxygène implique une dégradation thermique du bois sous atmosphère pauvre en oxygène qui s'apparente à la pyrolyse (dégradation thermique sous atmosphère inerte).

Les zones dans le solide ainsi que les phénomènes de diffusion sont décrits sur la Figure 2-3.

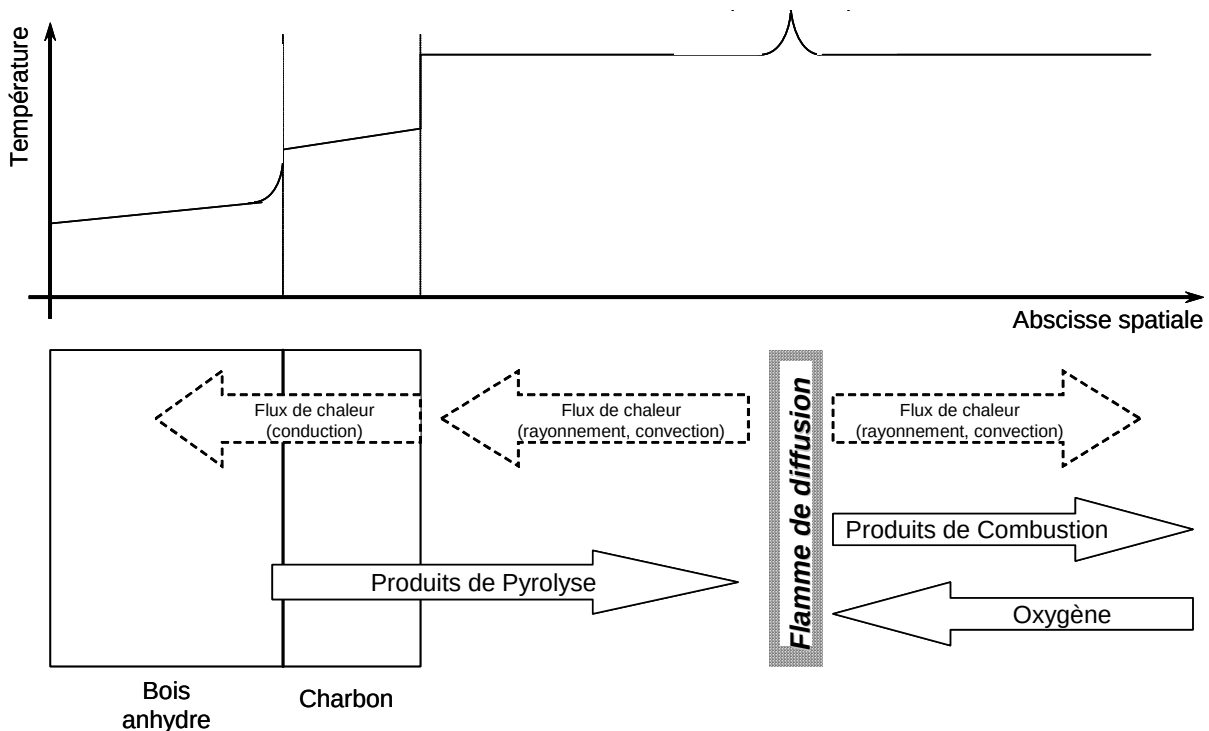


Figure 2-3 : Schématisation de l'étape 2 de combustion vive du bois.

La Figure 2-3 permet de visualiser les flux thermiques. L'étape de pyrolyse, phénomène endothermique, est alimentée en chaleur par la flamme qui rayonne sur la surface du solide. Le flux de chaleur convectif est limité par le flux de matière émanant de la particule.

Pour mieux comprendre les phénomènes qui ont lieu lors de cette étape de combustion vive, la suite de ce paragraphe présente indépendamment ces deux phases de dégradation thermique et de combustion vive.

2.2.2.2. Dégradation thermique du bois en atmosphère appauvrie en oxygène

En tant que combustible, le bois peut être abordé macroscopiquement. Toutefois, le bois est majoritairement constitué de plusieurs polymères organiques. Il est formé pour plus de 95% de cellulose, hémicelluloses et lignine, soient des substances macromoléculaires qui se caractérisent par des chaînes longues.

La Figure 2-4 illustre schématiquement la composition du bois.

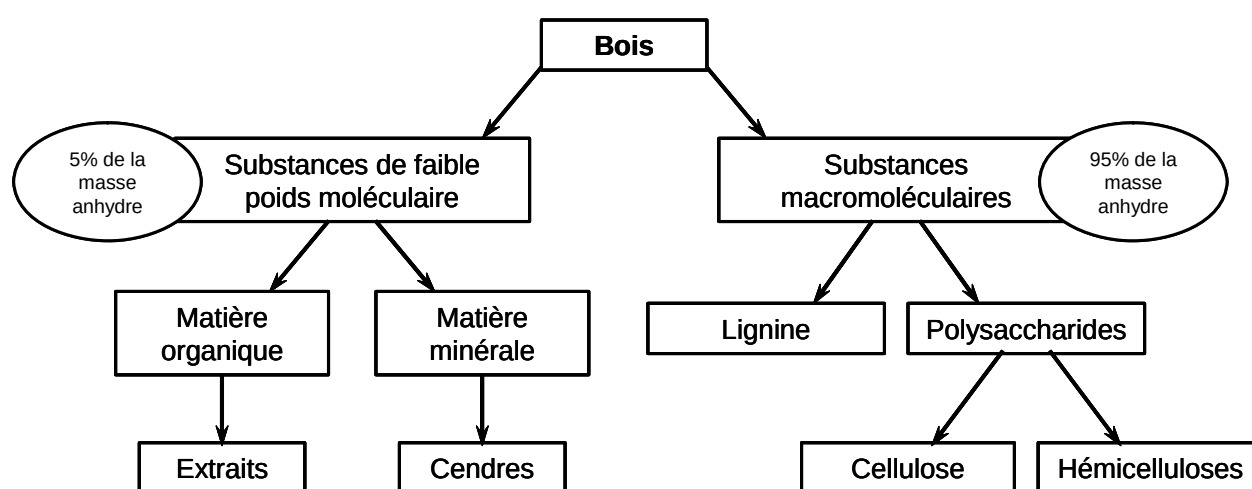


Figure 2-4 : Schématisation de la composition du bois.

Une première approche consiste à étudier séparément la dégradation thermique des différents polymères organiques avant de synthétiser la dégradation thermique du bois dans son ensemble.

La dégradation thermique de ces substances macromoléculaires conduit tout d'abord à la formation des monomères qui les constituent. La dégradation de ces monomères entraîne la formation d'hydrocarbures légers.

De compositions différentes, ces substances macromoléculaires se dégradent selon des mécanismes différents dépendants de la température. Ainsi, l'holocellulose (somme de la cellulose et des hémicelluloses) se dégrade dès 200°C tandis que la lignine n'est altérée qu'à partir de 280°C, même si elle fond à partir de 70°C pour se resolidifier vers 90°C.

Ce paragraphe traite logiquement de la dégradation de ces trois types de substances macromoléculaires dans ces deux principaux intervalles de température. Ces informations sont tirées des articles de synthèse de Beall et Eickner [3], Browne [9], Deglise [12], LeVan [21] et Morf et al. [29].

Données bibliographiques

2.2.2.2.1. Pour une température comprise entre 200°C et 280°C

2.2.2.2.1.1 Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont les premiers polymères du bois à se dégrader. Leur décomposition se produit à partir de 200°C, et peut être considérée comme totale pour une température supérieure à 260°C [21,44].

Globalement, cette décomposition se déroule selon le schéma suivant :

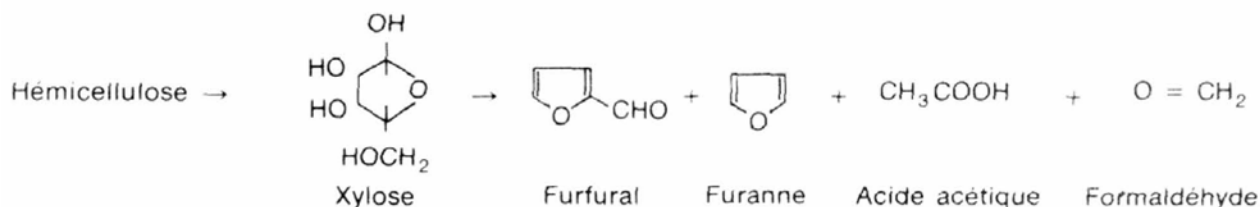


Figure 2-5 : Schématisation de la décomposition thermique des hémicelluloses (Deglise [12]).

En fait, la décomposition s'effectue selon deux processus consécutifs : une dépolymérisation suivie d'une décomposition des monomères.

Le monomère principal des hémicelluloses, le xylose, peut se dégrader de deux manières :

- une rupture du noyau aromatique :

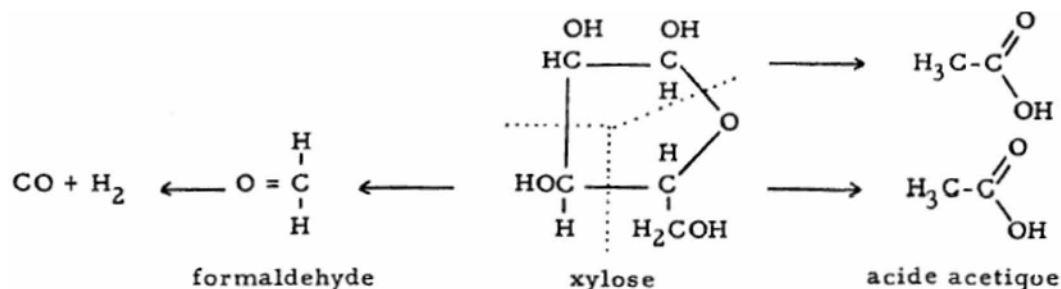


Figure 2-6 : Mécanisme de formation du formaldéhyde ou de l'acide acétique par dégradation du xylose (Deglise [12]).

- une déshydratation du cycle pentose :

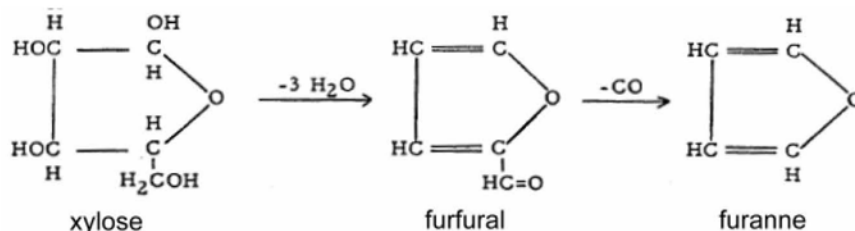


Figure 2-7 : Mécanisme de dégradation du xylose formant du furfural puis du furanne (Deglise [12]).

Les produits ainsi générés par la décomposition des hémicelluloses sont : l'acide acétique, le formaldéhyde, le monoxyde de carbone et des hétérocycles formant les goudrons.

2.2.2.2.1.2 La cellulose

Selon Browne [9], entre 200°C et 280°C, la cellulose commence à se décomposer selon une dépolymérisation, une déshydratation et une décarboxylation.

La dépolymérisation est le résultat de ruptures des liaisons carbone-oxygène. Ces ruptures peuvent avoir lieu n'importe où le long de la chaîne. Cela engendre deux sortes de monomères : le glucose avec terminaison « réductrice » ou le glucose avec terminaison « non-réductrice ». Ces deux monomères ne se décomposent pas de la même façon.

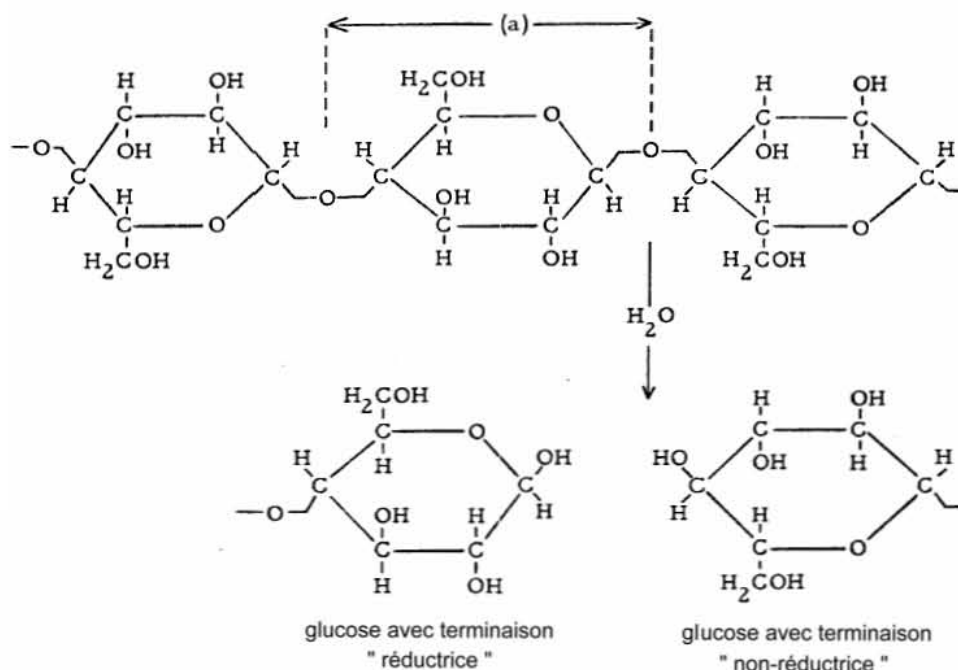


Figure 2-8 : Mécanisme de dépolymérisation de la cellulose en glucoses (Deglise [12]).

Les produits gazeux dégagés sont essentiellement du monoxyde de carbone et de l'eau ainsi qu'un peu de dioxyde de carbone. La cellulose conserve sa structure cristalline et seule la cellulose amorphe est attaquée. Les monomères formés sont ensuite dégradés à des températures supérieures.

2.2.2.2.1.3 La lignine

D'après l'ensemble des auteurs, la lignine est le composé le plus stable en température si bien que ce composé n'est pas (ou très lentement au regard de la loi de vitesse) dégradé dans cette plage de températures.

2.2.2.2.2. Pour une température entre 280°C et 500°C

2.2.2.2.2.1 Les hémicelluloses

Dans cette plage de températures, les hémicelluloses ayant été préalablement dégradées, seule la transformation des condensables en carbone fixe peut se faire.

2.2.2.2.2.2 La cellulose

Principal producteur de matières volatiles (LeVan [21]), la décomposition de la cellulose se poursuit par la dégradation des monomères de glucose produits de la dépolymérisation initiale.

Données bibliographiques

D'après Beall et Eickner [3], après 300°C il y a décomposition de la cellulose en charbon, condensables et gaz. Le composé majeur des condensables est le lévoglucosane produit à partir du monomère de glucose selon la réaction (Figure 2-9) :

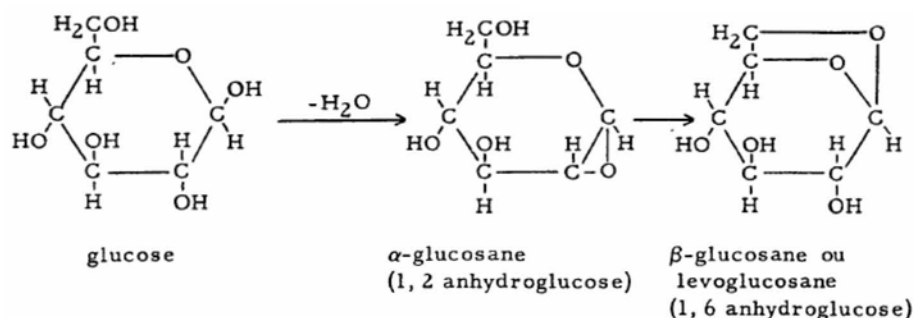


Figure 2-9 : Mécanisme de dégradation du glucose formant du lévoglucosane (Deglise [12]).

Deglise [12] propose un schéma de décomposition de la cellulose où apparaît de nouveau le lévoglucosane comme produit intermédiaire, les produits finaux étant de l'eau, des acides formique et acétique et du phénol comme le montre la Figure 2-10.

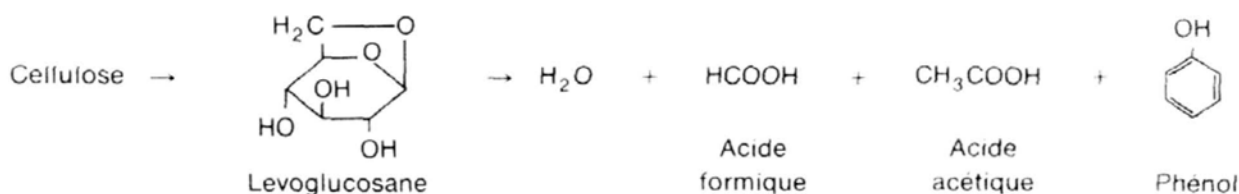


Figure 2-10 : Schématisation de la décomposition thermique de la cellulose (Deglise [12]).

L'explication apportée est la suivante : le lévoglucosane est stable jusqu'à 210°C mais se décompose à partir de 270°C (Deglise [12]).

2.2.2.2.3 La lignine

Contrairement à l'holocellulose, la lignine ne se décompose pas en produisant un produit majoritaire. Lorsque la lignine subit une élévation de température supérieure à 280°C (Beall et Eickner [3]), elle se décompose par rupture des liaisons éthers (carbone-oxygène) qui sont plus fragiles que les liaisons carbone-carbone selon le schéma suivant :

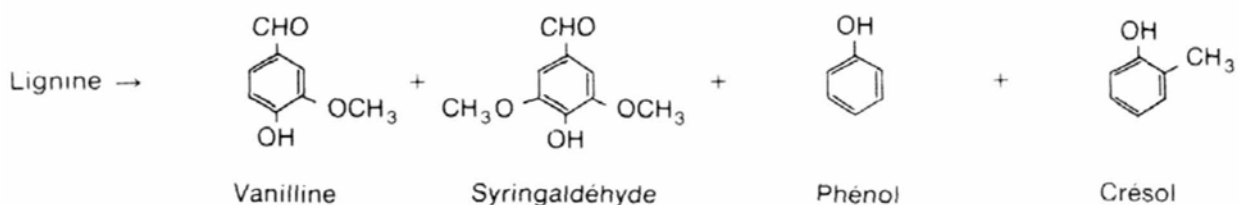


Figure 2-11 : Schématisation de la décomposition thermique de la lignine (Deglise [12]).

La complexité de la macromolécule de lignine formée de noyaux benzéniques liés par des cycles furannes ou des liaisons éthers (C-O) génère, en se décomposant, des cycles aromatiques. Ces produits aromatiques se décomposent ensuite, au fur et à mesure de l'accroissement de température, en méthanol qui provient des groupements méthoxy- (OCH₃) de la lignine et de ses dérivées aromatiques.

A plus haute température, la lignine est en grande partie à l'origine du charbon de bois. Ainsi, à 500°C, près de 55% de la masse initiale de lignine est convertie en charbon.

2.2.2.2.3. Récapitulatif des produits de dégradation thermique du bois

L'étude de la dégradation thermique des seules macromolécules constitutives du bois ne peut suffire. En effet, le bois contient chacune de ces substances dans des proportions propres à chaque essence ou partie de l'arbre. La dégradation thermique de ces macromolécules engendre des synergies. Ce paragraphe reprend la dégradation thermique globale du bois.

Le Tableau 2-4 résume les différents produits dégagés lors de la pyrolyse du bois en fonction des intervalles de températures distingués précédemment :

Températures		T < 200°C	200°C < T < 280°C	280°C < T < 500°C	500°C < T
Produits dégagés	majoritaires	H ₂ O	H ₂ O CO ₂ HCOOH CH ₃ COOH HCOCHO	HCOOH CH ₃ COOH CH ₂ O CO CH ₄ CH ₃ OH H ₂ goudrons	
	traces	CO ₂ HCOOH CH ₃ COOH HCOCHO	CO	aromatiques	
Bilan énergétique		endothermique	endothermique	exothermique	exothermique

Tableau 2-4 : Récapitulatif des principaux produits de pyrolyse dégagés en fonction de la température.

Ce tableau permet de constater que :

- avant 200°C, aucun produit combustible n'est fortement dégagé ;
- avant d'atteindre 260°C, toute l'eau formant l'humidité du bois ainsi que l'eau issue de la déshydratation de l'holocellulose sont dégagées. Les produits combustibles dégagés sont des gaz et des condensables dont les structures nécessitent de l'énergie pour être rompue avant que des réactions exothermiques puissent avoir lieu ;
- l'intégralité des produits volatils a été formée à des températures inférieures à 500°C. Au delà, il ne reste plus que la matrice graphitique sur laquelle réagissent plusieurs gaz.

Lorsque la température du bois atteint et dépasse la température de pyrolyse (200°C), la dégradation thermique du matériau engendre le dégagement de produits gazeux tels que CO₂, CH₃COOH, HCOOH, HCOCHO et de la vapeur d'eau.

Lorsque la température du bois dépasse 280°C, les produits dégagés sont CO, CH₃COOH, HCOOH, CH₂O, CH₄, CH₃OH, H₂ et H₂O ainsi que des molécules plus longues, facilement condensables, nommées globalement goudrons et constituées essentiellement d'aromatiques (Morf et al. [29]).

En définitive, la très grande majorité des produits volatils combustibles est générée dans un intervalle de températures compris entre 260°C et 500°C.

2.2.2.2.3.1 Composition des gaz formés non-condensables

(i) Les gaz non-combustibles

Le séchage du bois et la déshydratation de l'holocellulose ont pour effet commun d'être générateurs d'eau. La quantité d'eau dépend essentiellement de l'humidité du combustible bois mis en œuvre. La contribution de l'eau liquide à la formation de dihydrogène est très faible [12]. Autrement dit, on peut considérer que la quantité d'eau générée durant la pyrolyse est au moins égale à l'humidité sur brut du bois, et au plus égale à ce que l'on pourrait appeler une humidité totale H_{tot} telle que :

$$m_{eau} = \left(H_b + (1 - H_b) \cdot \frac{18}{2} \cdot x_H \right) \cdot m_{bois.humide} \quad (\text{Eq. 2-13})$$

$$H_{tot} = \frac{m_{eau}}{m_{bois.humide}} \quad (\text{Eq. 2-14})$$

Où : m_{eau} est la masse d'eau obtenue lors de la combustion d'une masse de bois humide égale à $m_{bois.humide}$, toutes deux exprimées dans la même unité ;

H_b est l'humidité sur brut du bois humide ;

18 est la masse molaire de l'eau en g/mol ;

2 est la masse molaire de l'hydrogène moléculaire en g/mol ;

x_H est la fraction massique d'hydrogène dans le bois anhydre.

Du dioxyde de carbone est produit durant la pyrolyse du bois selon des taux qui dépendent complètement des conditions de température du milieu et du flux de chaleur incident sur la particule solide. Ainsi, le taux de CO_2 dans les produits de pyrolyse varie de 5 à 10% (Deglise, 1982[12]).

(ii) Les gaz combustibles

Les principaux gaz combustibles sont CO , H_2 , CH_3OH , CH_2O , HCOOH , HCOCHO , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , bien que d'autres hydrocarbures gazeux soient également produits. Il convient de rappeler ici que les radicaux tels que O° , OH° , CH_i° ($i \in [1;3]$) et autres sont difficilement mesurables, leur durée de vie étant très faible.

2.2.2.2.3.2 Composition des gaz condensables

Sont condensables tous les hydrocarbures et les composés organiques dont la masse molaire avoisine ou dépasse 50 g/mol. Ainsi, tous les composés comportant un nombre d'atomes de carbone ou d'oxygène dont le nombre est supérieur ou égal à quatre sont considérés comme des condensables ou goudrons.

L'étude de Morf et al. (2002, [1]) sur les goudrons issus de la pyrolyse du bois montre que la production de ces composés peut être divisée en trois classes :

Goudrons primaires :

- pour des températures entre 400 et 700°C, une première classe de goudrons se distingue par la présence de composés oxygénés ;

Classes de goudrons	Type de composé	Nom du composé
Goudrons primaires	Acides	Acide acétique Acide propionique Acide butyrique
	Cétones	Acétol (1-hydroxy-2-propanone)
	Phénols	Phénol 2,3-Diméthylphénol 2,4/2,5-Diméthylphénol 2,6-Diméthylphénol 3,4-Diméthylphénol 3,5-Diméthylphénol
	Gayacols	Gayacol 4-Méthylgayacol
	Furannes	Furfural Alcool furfural 5-Méthylfurfural

Goudrons secondaires :

- pour des températures entre 700 et 850°C, des composés phénoliques et des oléfines sont produits ;

Classes de goudrons	Type de composé	Nom du composé
Goudrons secondaires	Phénols	Phénol
	Monoaromatiques hydrocarbonés	o-Crésol p-Crésol m-Crésol p/m-Xylène o-Xylène

Goudrons tertiaires :

- pour des températures entre 850 et 1000°C, une troisième classe de produits se distingue par des composés aromatiques. Cette dernière classe peut se diviser en une sous-classe de produits alkyls et une seconde sous-classe d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Classes de goudrons	Type de composé	Nom du composé
Goudrons secondaires tertiaires	Monoaromatiques hydrocarbonés	Benzène Ethylbenzène a-Méthylstyrène 3&2-Méthylstyrène 4-Méthylstyrène 3-Ethyltoluène 4-Ethyltoluène 2-Ethyltoluène
	Hydrocarbures	2,3-Benzofuranne Dibenzofuranne Biphényle Indène
	Dérivés aromatiques méthyliques	2-Méthyl-naphthalène 1-Méthyl-naphthalène Toluène

Les 4 tableaux suivants récapitulent les goudrons majoritaires de chacune des trois classes énoncées.

2.2.2.2.3.3 Détail des solides

Les solides produits par la pyrolyse à plus de 500°C sont de deux sortes :

- essentiellement une matrice carbonée (ou graphite) provenant principalement de la pyrolyse de la lignine ;
- des cendres formées d'oxydes minéraux et métalliques.

Classes de goudrons	Type de composé	Nom du composé
Goudrons tertiaires	HAP à 2 cycles	Acénaphthylène Acénaphthène Fluorène Naphthalène
	HAP à 3 cycles	Phénanthrène Anthracène Fluoranthène Pyrène
	HAP à 4 cycles	Benz [a] anthracène Chrysène Benz [e] acéphénanthrylène Benzo [k] fluoranthène
	HAP à 5 cycles	Benzo [a] pyrène Pérylène Dibenzo [ah] anthracène Indéno [1,2,3-cd] pyrène
	HAP à 6 cycles	Benzo [ghi] pérylène

Tableaux 2-5 : Analyse des goudrons émis par pyrolyse du bois (Morf et al. [29])

2.2.2.3. Combustion vive des gaz

Les produits de pyrolyse étant dégagés du combustible solide, ceux-ci migrent jusqu'à rencontrer l'oxygène dont ils ont besoin pour réagir en réactions globalement exothermiques.

Ce paragraphe présente les mécanismes de formation du dioxyde de carbone et de l'eau.

2.2.2.3.1. Formation du dioxyde de carbone

2.2.2.3.1.1 CO : précurseur de formation du CO₂

L'étude des produits issus de la dégradation thermique du bois montre que le principal produit précurseur de la formation du dioxyde de carbone est le monoxyde de carbone.

Les travaux de Saastamoinen [47] portent sur l'étude de la cinétique d'oxydation du CO en CO₂ dans une gamme de températures de 700 à 1400°C. Ses travaux font suite aux travaux de Dryer & Glassman [14] qui portent sur la cinétique d'oxydation du CO humide et du méthane. Cette étude repose sur des essais réalisés en four tubulaire avec des jets turbulents ($Re > 3500$), à pression atmosphérique, pour des températures entre 1030K et 1230K, et une concentration volumique en eau de 0,1% à 3%.

Ces études partent de la réaction globale d'oxydation du CO en CO₂ :



Le modèle cinétique fait intervenir les concentrations en CO, O₂ et H₂O comme paramètres d'influence sur la vitesse de disparition du CO :

$$-\frac{d[CO]}{dt} = k[CO]^a [O_2]^b [H_2O]^c \quad (\text{Eq. 2-16})$$

Où : [] est la fraction molaire du gaz considéré ;

t est le temps ;

k est la constante de vitesse dépendant de la température selon la loi d'Arrhenius ;

a, b, c sont les ordres de réaction.

Dryer et Glassman [14] donnent pour ce modèle les valeurs suivantes :

$$-\frac{d[CO]}{dt} = 10^{14,6 \pm 0,25} \cdot e^{\frac{-40000 \pm 1200}{RT}} \cdot [CO]^{1,0} \cdot [H_2O]^{0,5} \cdot [O_2]^{0,25} \quad (\text{Eq. 2-17})$$

Il est remarquable que l'eau qui ne figure pas dans la réaction globale d'oxydation du CO en CO₂ intervienne sur la cinétique de disparition du CO avec un ordre cinétique partiel égal à 0,5.

(i) Interprétation chimique

L'interprétation des auteurs est que l'eau est à l'origine de la formation de radicaux hydroxyles (OH). Ce radical joue ensuite un rôle majeur dans le mécanisme d'oxydation du CO, en introduisant l'étape radicalaire suivante :



En considérant O_2 , H_2O , O et OH en équilibre thermodynamique et H comme négligeable, la loi de vitesse s'exprime de la façon suivante :

$$-\frac{d[CO]}{dt} = 10^{12,6} \cdot e^{-\frac{39480}{RT}} \cdot [CO]^{1,0} \cdot [H_2O]^{0,5} \cdot [O_2]^{0,25} \quad (\text{Eq. 2-19})$$

L'énergie d'activation est similaire au précédent modèle. Le facteur pré-exponentiel est quant à lui plus faible de 2 ordres de grandeur. Autrement dit, la différence entre le premier et le second mécanisme est à attribuer plus à l'excès de radicaux OH qu'à l'équilibre thermodynamique.

Ainsi, les mécanismes suivants ont une influence secondaire sur l'oxydation du CO en CO_2 .



Il est admis que l'intermédiaire réactionnel de la réaction $CO + OH \xrightarrow{k_1} CO_2 + H$ est le complexe HOCO. Cependant, lorsque la température augmente, ce mécanisme n'est peut-être plus aussi prépondérant devant d'autres mécanismes tels que :



2.2.2.3.1.2 Le radical HOCO : intermédiaire réactionnel

Les travaux de Troe [57] sur l'étude cinétique de l'oxydation du CO ont révélé l'influence de la pression et de la température dans ce mécanisme d'oxydation.

L'auteur donne une explication à cette influence en faisant apparaître un intermédiaire réactionnel à savoir le radical HOCO. La dépendance à la pression et à la température de la réaction entre le CO et le radical OH permet d'avancer que cette réaction n'est pas la réaction bi-moléculaire directe suivante :



La présence du radical intermédiaire HOCO a été prouvée expérimentalement (^{26,27,41}), et par calcul de chimie quantique (^{2,20,48}). La réaction du radical hydroxyle sur le monoxyde de carbone fait apparaître une étape intermédiaire :



avec la possibilité de plusieurs réactions de consommation du HOCO :



2.2.2.3.2. Formation du monoxyde de carbone à partir du méthane

Les travaux de Dryer & Glassman [¹⁴] portent également sur la cinétique de disparition du méthane. Ces expériences ont été menées dans des conditions : de pression atmosphérique, de température comprises entre 1100K et 1400K sur le même four tubulaire que précédemment avec injection par jet turbulent ($Re > 3500$). Les points de mesures sont prélevés simultanément le long du four.

L'étude porte en partie sur les produits formés lors de la combustion du méthane.

2.2.2.3.2.1 Recensement

Les produits finaux d'oxydation sont H₂O et CO₂. Le CO a été observé pour être l'espèce intermédiaire principale dont l'importance augmente lorsque la température augmente.

Les autres espèces intermédiaires détectées sont listées dans le Tableau 2-6 avec les concentrations maximales relevées :

Espèces minoritaires	Concentrations maximales relevées
CH ₂ O	100 ppm
C ₂ H ₆	60 ppm
C ₂ H ₄	40 ppm
CH ₃ OH	5 ppm
C ₂ H ₂	1 ppm
C ₃ H ₆	0,01 ppm
C ₃ H ₈	0,01 ppm
H ₂	300 ppm
H ₂ O ₂	1 ppm

Tableau 2-6 : Espèces gazeuses principales mesurées lors de la combustion du méthane dans un four tubulaire pilote.

Les espèces intermédiaires à l'état de traces autres que l'éthane et l'éthylène ne sont pas déterminées.

Il est intéressant de constater qu'à partir du seul méthane (CH₄) comme source de carbone dans la flamme, il apparaît au cours de la combustion des espèces différentes de plus haut poids moléculaire que le méthane.

2.2.2.3.2.2 Evolution

L'évolution des différentes espèces le long du four est représentée sur la Figure 2-12.

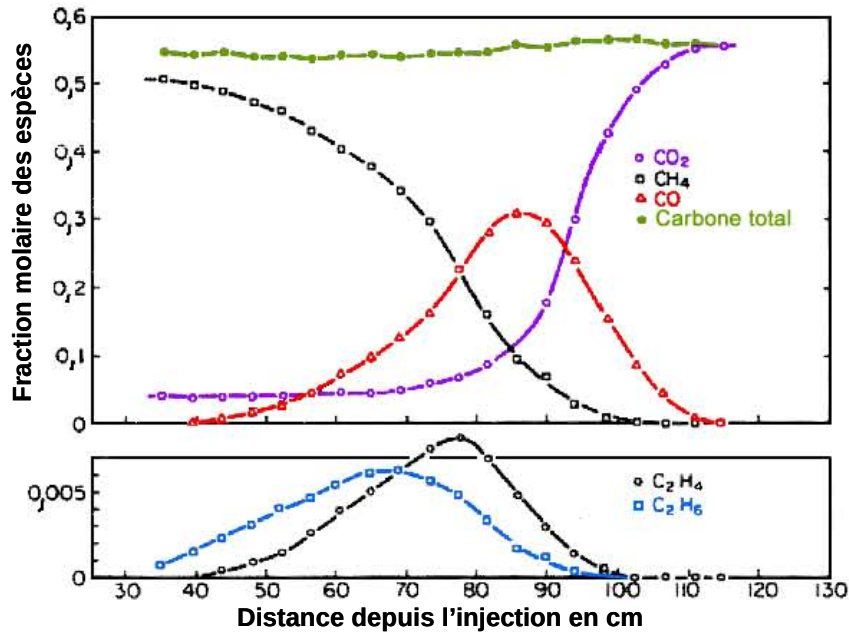


Figure 2-12 : Evolutions des teneurs en CO_2 , CH_4 , CO , C_2H_4 , C_2H_6 et de la température le long du four tubulaire durant la combustion de méthane, représentation du calcul du carbone total.

Sur ces graphiques on peut noter 2 phases pour la combustion méthane-air :

- une phase d'induction ;
- une phase de post-induction.

La phase d'induction n'a pas été étudiée quantitativement mais qualitativement. Aussi, il s'avère que la vitesse de disparition du méthane est inhibée par la présence de méthane et accélérée par la concentration en oxygène. L'injection de CO semble également accélérer cette vitesse de disparition du méthane.

La phase de post-induction a été étudiée quantitativement. La vitesse de disparition du méthane suit la loi suivante :

$$-\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = 10^{13,2 \pm 0,20} \cdot e^{-\frac{48400 \pm 1200}{RT}} \cdot [\text{CH}_4]^{0,7} \cdot [\text{O}_2]^{0,8} \quad (\text{Eq. 2-28})$$

L'expérience révèle que cette vitesse de disparition est indépendante de la concentration en eau, qu'elle soit produit de réaction ou produit injecté comme réactif.

La vitesse de production de CO_2 dans cette phase de post-induction est interprétée comme étant la vitesse d'oxydation du CO ce qui donne le modèle cinétique suivant :

$$+\frac{d[\text{CO}_2]}{dt} = 10^{14,75 \pm 0,40} \cdot e^{-\frac{43200 \pm 2200}{RT}} \cdot [\text{CO}]^{1,0} \cdot [\text{H}_2\text{O}]^{0,5} \cdot [\text{O}_2]^{0,25} \quad (\text{Eq. 2-29})$$

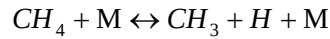
Ce modèle montre que les vitesses de formation du CO_2 sont 3,5 plus lentes que dans le cas de l'oxydation du CO humide. Le ralentissement de cette vitesse en présence d'hydrocarbures a déjà été observé. Lorsque le méthane a complètement disparu, la vitesse de formation du CO_2 est proche de celle observée dans le cas du CO humide.

2.2.2.3.3. Mécanisme d'oxydation du méthane

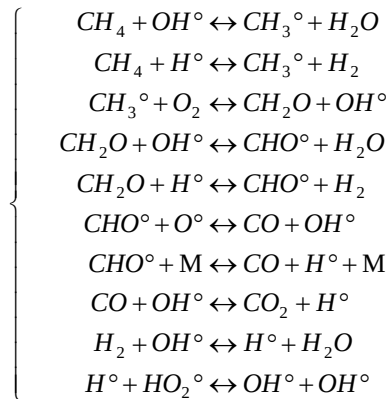
Les travaux de Bendtsen et al. [4] ont porté sur le développement d'un mécanisme réactionnel d'oxydation du méthane dans le but d'implémenter ce mécanisme dans un code comme CHEMKIN.

Ainsi, les mécanismes d'oxydation du méthane ont été décrits selon le modèle simplifié suivant :

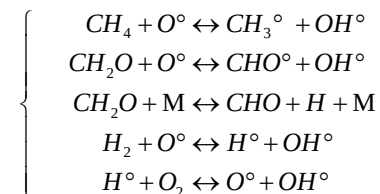
(i) Réaction initiation :



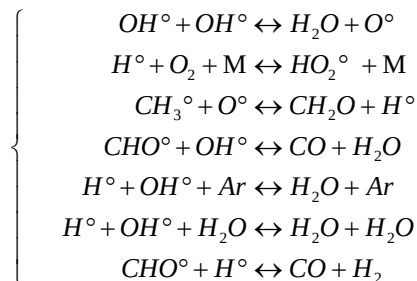
(ii) Réactions de propagation ne modifiant pas le nombre de radicaux :



(iii) Réactions de propagation produisant des radicaux :



(iv) Réactions de terminaison consommant des radicaux:

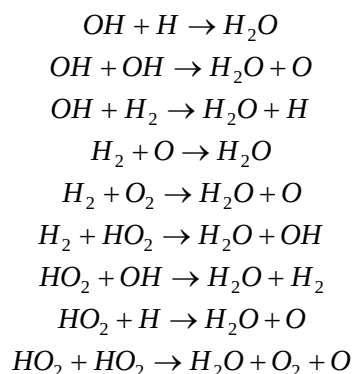


La combustion est un processus réactif utilisant des radicaux libres, le mécanisme ci-dessus est dit simplifié par son auteur lui-même. Cela permet de mesurer l'ampleur de la complexité de la combustion en phase gaz et d'apprécier la difficulté d'utilisation de modèles cinétiques comme ceux étudiés par Dryer & Glassman [14]. Il semble ainsi inimaginable d'écrire un mécanisme de combustion du bois, ni même de l'ensemble des gaz issus de la dégradation de celui-ci.

2.2.2.3.4. Formation de l'eau

L'eau est une molécule particulièrement stable. Cependant, les paragraphes précédents ont montré que les radicaux O, H et OH, mais aussi HO₂ sont à l'origine de tous les mécanismes radicalaires de combustion. Autrement dit, dans la flamme foisonnent des radicaux qui se recombinaient en sortie du front de flamme. Or, ces mécanismes de recombinaison sont gouvernés par la mobilité des espèces considérées et par la stabilité du composé formé (i.e. par la plus grande énergie libérée lors de la recombinaison) : l'eau est le candidat idéal. Non seulement l'eau est une molécule difficile à craquer donc stable, mais aussi les radicaux qui sont à son origine ont une grande mobilité due à leur faible masse molaire.

Les mécanismes de formation de l'eau peuvent se limiter aux réactions suivantes :



On relève alors pour le seul mécanisme réactionnel de formation de l'eau :

- 2 atomes différents sont considérés, l'hydrogène et l'oxygène ;
- 6 composés plus ou moins stables peuvent être formés : O, H, OH, H₂, H₂O, HO₂ ;
- 9 réactions élémentaires sont à prendre en compte.

Alors que la formation de l'eau semble être la plus simple à appréhender, cette écriture révèle la complexité de l'approche cinétique de la combustion.

2.2.2.4. Conclusions

Le bois est constitué pour 95% de sa masse anhydre de substances macromoléculaires qui se dégradent à partir de 200°C dégageant des produits carbonés plus ou moins lourds. Lorsque le bois atteint la température de 500°C, il ne dégage plus de produits carbonés, il reste alors une matrice charbonneuse.

Les produits dégagés durant la dégradation thermique du bois ont un très large spectre de tailles dont la répartition dépend fortement des conditions de montée en température du bois. Les produits de dégradation sont, par conséquent, qualifiables mais très difficilement quantifiables. Il est donc impossible d'appréhender la combustion du bois par cette voie qui consisterait à décomposer la combustion de chaque produit de dégradation indépendamment.

Si l'on remonte le processus de combustion depuis la fin, la combustion complète d'un combustible contenant du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène consiste à obtenir du dioxyde de carbone et de l'eau, il est possible de comprendre quels en sont les précurseurs.

Il apparaît que le dioxyde de carbone a comme unique précurseur le monoxyde de carbone dont l'oxydation est favorisée par la présence de radicaux hydroxyles, eux-mêmes précurseurs de formation de l'eau. Il existe donc une synergie entre l'oxydation complète du carbone et la présence d'eau dans le milieu réactif.

Cela permet d'envisager une action positive de l'humidité sur la combustion. En clair, on peut attendre de la combustion d'un bois humide d'engendrer moins de monoxyde de carbone que la combustion d'un bois moins humide. Cette supposition n'est basée que sur un *a priori* d'ordre cinétique, elle occulte l'abaissement de la température du foyer due à l'augmentation du volume d'eau dans les fumées.

2.2.3. Etape de combustion hétérogène

L'étape de combustion hétérogène apparaît lorsque tous les dégagements gazeux ou condensables au niveau de la particule cessent. La particule a épuisé ses réserves de produits dits volatiles comme définis au Paragraphe 2.1.2.2. Alors commence l'étape de combustion hétérogène. L'oxygène peut enfin atteindre la surface de la particule solide transformée en charbon. Le déplacement de l'oxygène est provoqué par différence de pression partielle. L'oxygène ayant atteint la surface solide du charbon, le gaz est adsorbé à la surface du solide. Cette réaction est exothermique. Elle engendre une réaction de rupture de liaisons au sein de la matrice charbonneuse. Le produit de cette réaction est alors désorbé sous forme d'un gaz qui diffuse à l'inverse de l'oxygène, principalement en arrachant du carbone.

D'après les travaux de Skreiberg et al. [50], cette étape est essentiellement génératrice de monoxyde de carbone, et assez peu de dioxyde de carbone.

Cette étape de combustion hétérogène est schématisée sur la Figure 2-13.

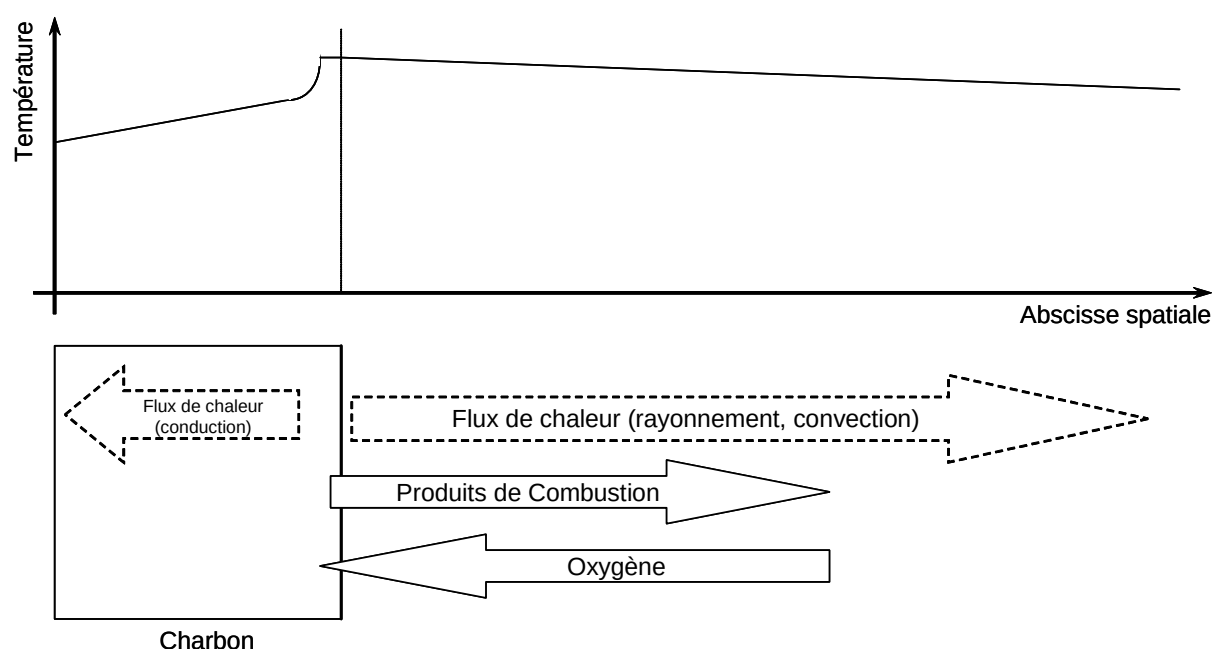


Figure 2-13 : Schématisation de l'étape de combustion hétérogène du charbon.

La Figure 2-13 permet de voir que la zone réactionnelle se trouve désormais au sein de la particule si bien que la propagation de chaleur se fait, non plus indirectement, mais directement par conduction dans la particule. De même, une partie de l'énergie dégagée est émise hors de la particule par rayonnement.

D'après LeVan [21], cette étape de combustion hétérogène a lieu à partir de 450°C.

D'après Browne [9], c'est à partir de 500°C que la surface du solide est complètement transformée en graphite. Les produits se dégageant des couches inférieures du bois réagissent alors sur cette matrice graphitique.

L'ensemble de la littérature s'accorde ainsi pour dire qu'après 500°C il ne demeure plus de produits volatiles dans le bois. Il ne subsiste alors que la matrice charbonnée incluant les matières minérales du bois.

Il est reconnu que, sauf dans de très rares cas de convection intense autour de la particule de charbon, les réactions de combustion hétérogène sont gouvernées par le transport de matière gazeuse et non par la vitesse de réaction ou par l'aire de la surface réactive du solide car ce processus implique :

- une migration de l'oxydant au travers du mélange gazeux jusqu'à la surface du solide ;
- une adsorption de cet oxydant sur la surface du solide ;
- et la migration inverse du produit formé.

Le charbon de bois est particulièrement réactif. Sa formule chimique est plus riche en carbone que celle du bois : la formule empirique suivante est donnée par Bradbury et Shafizadeh [8] :



Ce solide laissé par la dégradation thermique du bois est un charbon actif dont la surface est importante au prorata de sa masse entre 50 et 100 m²/g. Ainsi, ce charbon peut être considéré comme charbon actif.

Cette surface d'interface entre solide et gaz est fondamentale : plus la surface est grande et plus les gaz ont de sites d'adsorption à disposition.

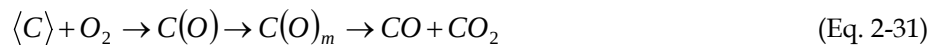
2.2.3.1. Aspect radicalaire

L'oxydation du charbon procède selon les mêmes processus radicalaires d'initiation, propagation et extinction que tout processus de combustion.

Le processus d'initiation peut apparaître sur des particules solides, particulièrement par la rupture de liaison sur des cycles aromatiques. De tels sites de formation de radicaux sont d'une importance capitale parce que la vitesse d'oxydation du charbon peut dépendre de la concentration en radicaux à la surface du charbon. Ainsi, la vitesse d'oxydation du charbon est limitée principalement par le transport de masse (Walker [60]).

De nombreux mécanismes ont été proposés pour l'oxydation du charbon. Bradbury et Shafizadeh [7] proposent une chimie-sorption directe à la surface du charbon. Leurs recherches mettent en évidence des énergies d'activation variant entre 54 et 105 kJ/mol dépendantes de la proportion d'oxygène adsorbé par gramme de charbon.

Ces réactions sont les suivantes :



Le premier mécanisme réactionnel est considéré comme se réalisant rapidement grâce à la mobilité des $C(O)_j$ comme noté par l'indice m , tandis que le second mécanisme réactionnel se réalise lentement à cause de la stabilité des $C(O)$ désignés par l'indice s .

Des mécanismes de l'oxydation du charbon supplémentaires sont proposés par Mulcahy et Young [24] :



Les radicaux hydroxyles requis pour ce mécanisme réactionnel peuvent être issus de la rupture homolytique des groupes hydroxyles durant la pyrolyse du bois. Ils peuvent également être issus de la dissociation de molécules d'eau bien que l'énergie de dissociation de cette molécule d'eau soit importante et implique une source de radicaux secondaires.

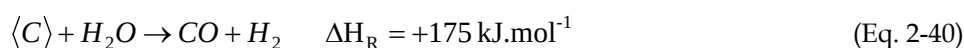
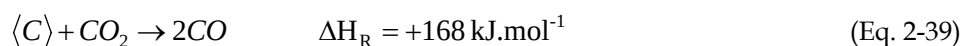
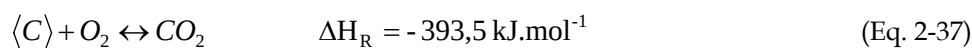
Deux mécanismes de terminaison sont considérés dans l'oxydation ou la dévolatilisation du charbon. Ce sont des réactions de gazéification comme celle de Boudouard et la réaction vapeur-charbon détaillées ci-après :



Ces réactions sont utilisées dans des systèmes comme les cellules humides de Lamb-Cargate dans le but d'accroître le taux d'oxydation ayant lieu en phase gaz et de contrôler la température des grilles. Les volatiles dégagés par une oxydation partielle du charbon sont alors complètement brûlés selon les mécanismes réactionnels décrits précédemment.

2.2.3.2. Aspect thermodynamique

Les mécanismes radicalaires permettent une compréhension des réactions mises en jeu dans la combustion du charbon. Néanmoins, l'aspect thermodynamique des réactions permet de répondre aux questions posées par le problème thermique. Les bilans thermodynamiques des réactions sont les suivants :



Ce bilan montre que l'oxydation du charbon en CO_2 est la réaction la plus énergétique, ceci étant dû à la variation d'enthalpie de la réaction d'oxydation du CO en CO_2 . Seulement, cette réaction requiert deux fois plus d'oxygène que la réaction d'oxydation du charbon en CO. Autrement dit, lorsque l'oxygène vient à manquer par limitation due au transport diffusionnel, la réaction d'oxydation du charbon en CO devient la réaction la plus exothermique. On peut remarquer que la réaction fondamentale de la gazéification du bois par l'eau est une réaction fortement endothermique avec $\Delta H_R = +175 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

Ces considérations sont de l'ordre du probable. Seule l'étude cinétique des dites réactions peut déterminer l'influence de l'eau contenue au sein de la particule de bois sur la vitesse de consommation de la matrice charbonneuse durant la pyrolyse. Il demeure évident par là que la réaction principale de la combustion du charbon est la réaction formant du CO.

2.2.3.3. Aspect énergétique quantique

Montoya et al. [28] ont étudié les potentiels énergétiques de sorption des molécules de O₂, H₂O et CO₂ sur la matrice de charbon. Ils ont également étudiés les énergies de rupture des liaisons créant du CO par désorption. La première partie du travail énoncé peut se résumer à la Figure 2-15 et la Figure 2-14.

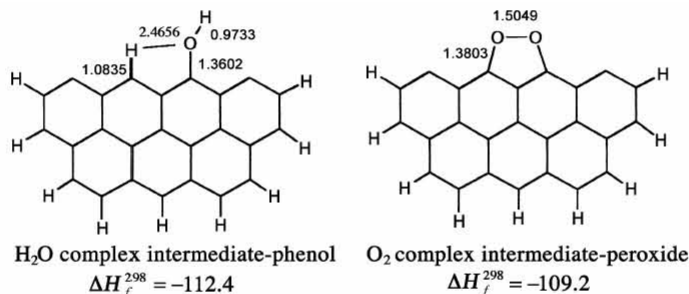


Figure 2-14 : Energies de sorption des composés H₂O et O₂ en fonction du complexe formé en kcal/mol.

L'adsorption de l'eau à la surface de la matrice est la réaction la plus énergétique avec $\Delta H_R^{298K} = -112,4$ kcal/mol, la réaction d'adsorption de l'oxygène moléculaire étant d'énergie équivalente avec $\Delta H_R^{298K} = -109,2$ kcal/mol. Suivent d'un peu plus loin dans un classement de potentiels énergétiques les réactions du CO₂ sur cette même matrice charbonneuse avec $\Delta H_R^{298K} = -85,0$ kcal/mol et $\Delta H_R^{298K} = -30,0$ kcal/mol (cf. Figure 2-15).

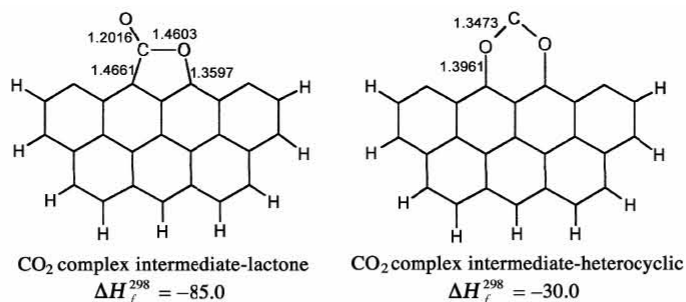


Figure 2-15 : Energies de sorption du CO₂ en fonction du complexe formé en kcal/mol.

Notons que chacune de ces réactions sont exothermiques, ce qui ne sera pas forcément le cas des réactions de rupture de liaisons pouvant engendrer du CO comme nous allons le voir sur la Figure 2-16 ci-dessous.

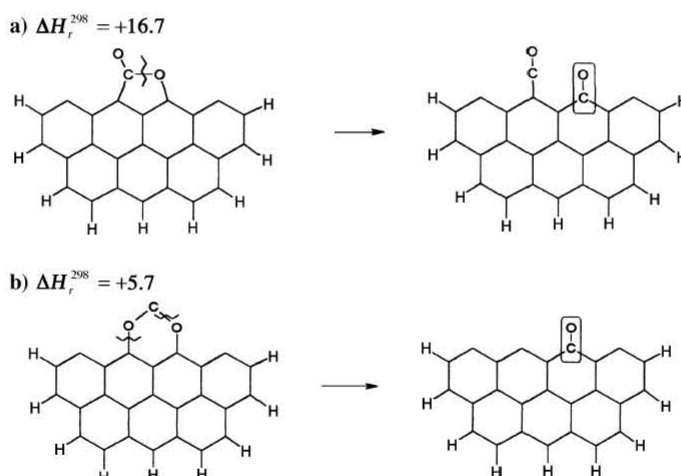


Figure 2-16 : Energies de rupture des liaisons des complexes formés par sorption du CO₂ en kcal/mol.

On peut ainsi remarquer que, non seulement le CO₂ libère moins d'énergie lorsqu'il est adsorbé à la surface de la matrice, mais aussi que l'énergie de rupture des liaisons dans le but de permettre la formation de CO est endothermique avec respectivement $\Delta H_R^{298K} = +16,7 \text{ kcal/mol}$ et $\Delta H_R^{298K} = +5,7 \text{ kcal/mol}$, et ce contrairement aux ruptures impliquée par l'eau ou l'oxygène comme le montre la Figure 2-17.

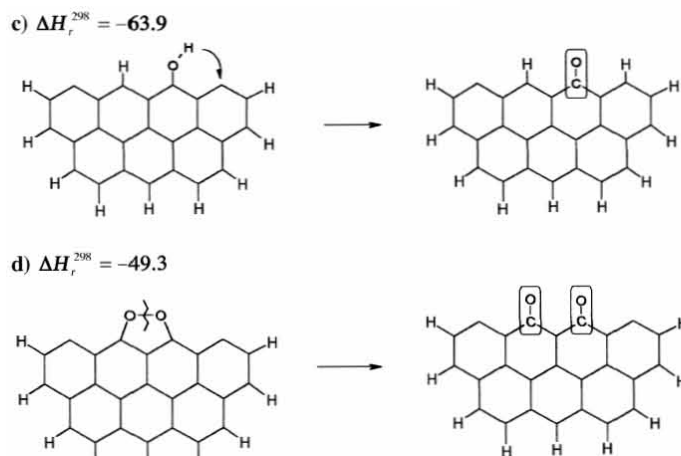


Figure 2-17 : Energies de rupture des liaisons des complexes formés par sorption des composés H₂O et O₂ en kcal/mol.

En définitive, l'étude de Montoya et al. [28] montre que :

- l'eau est adsorbée à la surface du charbon libérant plus d'énergie que l'adsorption de l'oxygène ou du dioxyde de carbone ;
- la rupture des liaisons du complexe formé par l'adsorption de l'eau libère plus d'énergie que le même mécanisme dans le cas de l'adsorption d'oxygène.

Il faut ainsi considérer que l'adsorption de l'oxygène moléculaire est génératrice de deux molécules de CO tandis que l'adsorption de l'eau n'est génératrice que d'une seule molécule de CO.

2.2.4. Conclusions

Les particules de bois sèchent totalement avant d'amorcer toute dégradation thermique. Ceci est dû au puit d'énergie qu'est la vaporisation de l'eau.

L'étape de dégradation thermique s'amorce lorsque bois est anhydre. Il dégage un large spectre de produits volatils qui réagissent en phase gaz avec l'oxygène de l'air. Ces réactions très exothermiques alimentent par rayonnement le processus de séchage des particules à venir. Ces réactions nombreuses et complexes sont ni quantifiables ni même qualifiables. Peu de monoxyde de carbone est produit durant cette étape si l'oxygène de l'air est apporté en quantité suffisante.

L'étape de combustion hétérogène est génératrice de monoxyde de carbone. Ce dernier doit être consommé en phase gaz. Il alimente alors la flamme de combustion vive. La matrice carbonneuse est plus réactive à l'eau vapeur qu'à l'oxygène de l'air.

2.3. Combustion en chaudières automatiques

Après avoir abordé les caractéristiques du bois et son comportement au feu, ce paragraphe fait état des études effectuées sur des chaudières utilisant le bois comme combustible. Ainsi, le comportement propre de la chaudière se manifeste en sus du comportement typique du bois. Ce paragraphe aborde succinctement les différentes technologies de chaudières existantes avant de traiter des études de combustion effectuées sur des matériels de type chaudières automatiques, objet de notre étude.

2.3.1. Technologies des chaudières automatiques

Les méthodes utilisées pour brûler du bois afin de profiter de la chaleur produite sont multitudes. Du feu de camp aux chaudières industrielles de plusieurs dizaines de mégawatts, la problématique est la même : apporter le combustible et le comburant en quantités suffisantes pour satisfaire les besoins en énergie.

Dans un souci de concision et de pertinence avec notre sujet, nous restreignons cet aperçu aux seules chaudières :

- alimentées avec du bois fragmenté excluant les bûches de bois ;
- alimentées mécaniquement en bois excluant le chargement manuel ;
- alimentées mécaniquement en air excluant les entrées d'air naturelles mal maîtrisées ;
- forcées mécaniquement à l'extraction des fumées excluant le tirage naturel si dépendant de la construction de la cheminée (diamètre, hauteur, calorifugeage, singularités d'écoulement, ...) ;
- produisant de l'eau chaude comme fluide caloporteur excluant les échangeurs air-fumées.

Malgré ces restrictions, l'imagination des fabricants de chaudières permet un choix aussi vaste qu'il existe de fabricants. De ce fait, nous abordons ici les grands principes.

2.3.1.1. Alimentation en bois

L'alimentation mécanique en bois fragmenté peut être effectuée de trois façons différentes :

- par vis d'Archimède mue par motoréducteur et moteur électrique :

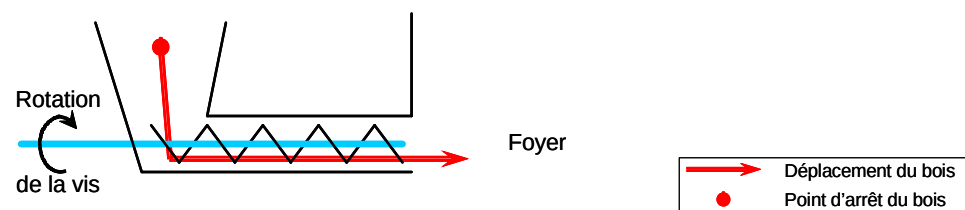


Figure 2-18 : Schématisation de l'alimentation par vis d'Archimède.

- par tiroir mu par un vérin hydraulique souvent alimenté par bande transporteuse :

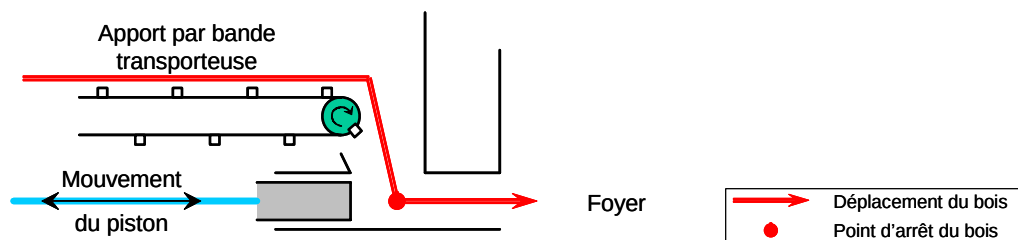


Figure 2-19 : Schématisation de l'alimentation par tiroir et bande transporteuse.

- par gravité via une antichambre permettant également une alimentation par bande transporteuse :

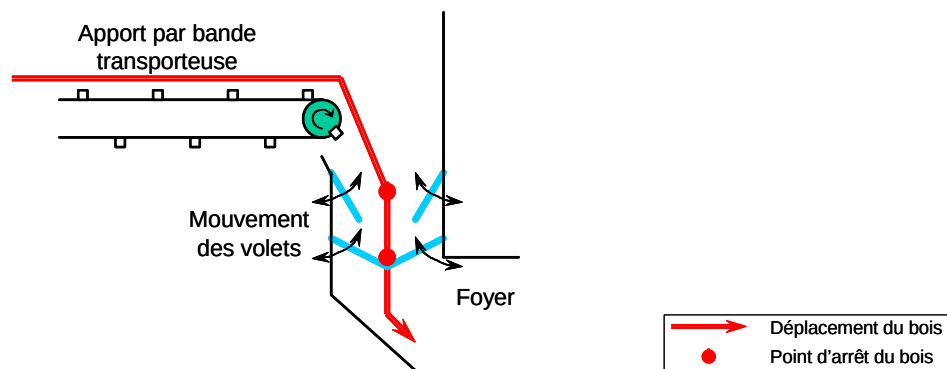


Figure 2-20 : Schématisation de l'alimentation par gravité.

La solution la plus économique, et par conséquent la plus courante, est l'alimentation par vis d'Archimède. La seule limite à l'utilisation de ce système est la granulométrie du combustible : la vis d'Archimède ne permet pas de transporter des plaquettes trop grosses.

2.3.1.2. Alimentation en air

L'alimentation mécanique en air est effectuée par des turbines centrifuges mues par moteur électrique. L'air doit être injecté dans le foyer en deux zones distinctes :

- De l'air, dit primaire, traverse le lit de bois en train de brûler. Cet air a deux buts distincts : il alimente en oxygène les réactions chimiques et il sert également à véhiculer les gaz formés en dehors du lit de bois.
- De l'air secondaire est injecté en dehors du lit de bois afin d'apporter un surplus d'oxygène aux gaz émanant de la zone primaire. La rencontre des gaz chargés d'imbrûlés et de l'oxygène permet de terminer l'oxydation de la plupart des imbrûlés.

En pratique, l'air primaire peut être divisé en plusieurs points d'injection différents selon la taille ou les spécificités du foyer.

De même, l'air secondaire peut être injecté directement au dessus du lit de bois. Ainsi les zones de combustion primaire et secondaire sont comprises dans une unique chambre de combustion. Cette technologie est la plus répandue.

Néanmoins, certains fabricants distinguent spatialement les zones primaire et secondaire moyennant un avant foyer qui reçoit le bois et l'air primaire. Les gaz produits dans l'avant foyer sont véhiculés vers un second foyer où est injecté l'air secondaire. On parle alors de post combustion. Cette technologie est plus volumineuse, ce qui la rend moins économique et donc plus rare.

Dans certains cas l'air secondaire est divisé en plusieurs zones d'injection si bien que l'on entend parler parfois d'air tertiaire ou plus. Ne nous trompons pas sur les définitions, l'air secondaire a pour but de terminer la combustion des imbrûlés présents dans les fumées. Ces zones de post combustion peuvent être multiples tant que la température des gaz est suffisante pour que les espèces chimiques réagissent entre elles. L'air injecté dans une zone ne remplissant pas cette condition thermique n'a plus comme effet que de diluer les fumées et, par conséquent, d'abaisser le rendement global de la chaudière.

2.3.1.3. Chambre de combustion

La chambre de combustion est un volume dans lequel réagissent chimiquement combustible et comburant. Ces réactions nécessitent une température suffisante pour leur bon déroulement. Le foyer doit donc permettre de garder une partie de la chaleur dégagée par les réactions de combustion afin de maintenir la température souhaitée. Pour ce faire, la plupart des foyers sont garnis de briques ou de bétons réfractaires.

Les chambres de combustion se distinguent tout d'abord selon leur distribution en bois. On parle alors principalement de foyer à grilles ou de foyer volcan.

2.3.1.3.1. Foyer volcan

Le foyer volcan (Figure 2-21) est toujours lié à une alimentation par vis d'Archimède. Le bois remonte par pression dans un tube large et court. Le bois brûle en surface. L'alimentation permet d'assurer le renouvellement du bois brûlé si bien que la surface de bois en train de brûler reste approximativement constante au cours du temps.

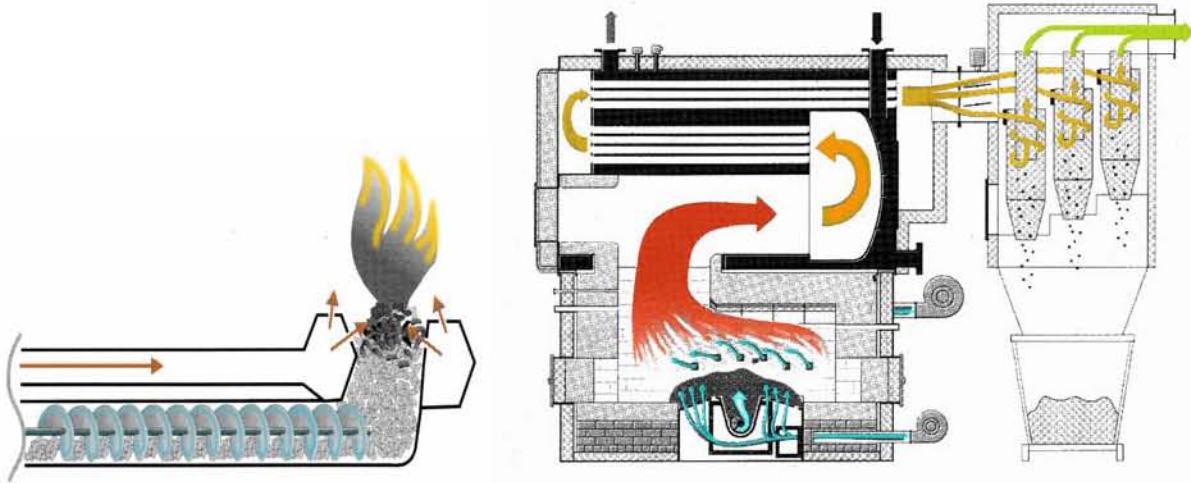


Figure 2-21 : Exemple de foyer volcan toujours lié à une alimentation par vis d'Archimède.

Cette technologie est limitée à de petites puissances à cause de problèmes liés à la circulation de l'air primaire (difficile au travers d'un tas de bois trop grand). Néanmoins, elle a l'avantage de permettre une bonne maîtrise de la surface de bois en contact avec les flammes et donc la puissance développée par la chaudière.

2.3.1.3.2. Foyer à grilles

Le foyer à grilles est le plus répandu. Le bois frais est réparti sur une grille au travers de laquelle passe l'air primaire. Le déplacement du bois sur les grilles est le plus souvent assuré par l'apport de bois frais. La Figure 2-22 représente un foyer à grilles.

Dans certains cas d'utilisation de bois très humide, les grilles sont mues par un vérin hydraulique. Le mouvement d'aller et retour des éléments de grilles permet de répartir le bois à la surface des grilles. Cet étalement du bois lui permet de recevoir la chaleur du foyer et donc de se sécher avant de brûler. Cette technologie est plus coûteuse car elle implique l'utilisation d'une centrale hydraulique mais elle permet d'utiliser du bois humide souvent moins cher.

Si l'angle global des grilles s'éloigne beaucoup de l'horizontale, on peut parler de foyer à gradins plutôt que de foyer à grilles. Malgré tout la nuance des termes reste à définir.

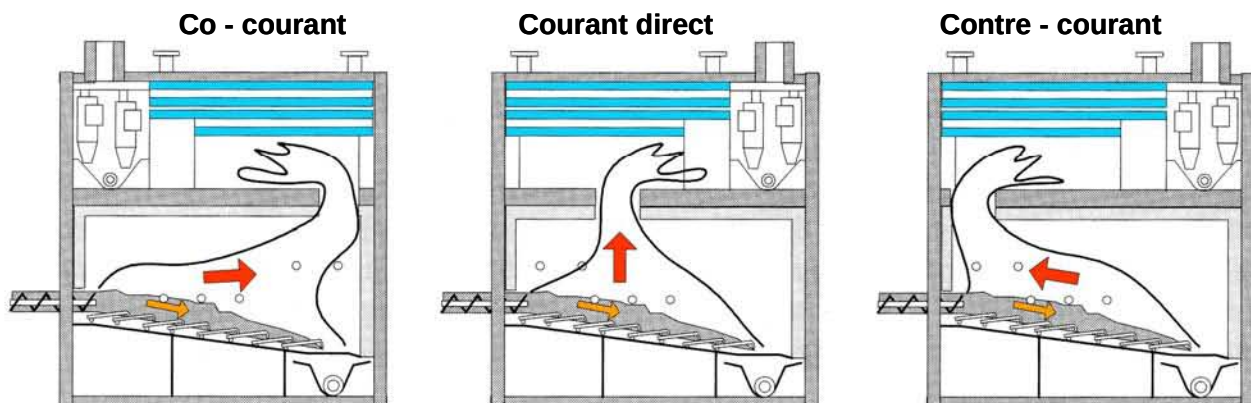


Figure 2-22 : Schématisation de différentes position de la voûte d'un foyer à grilles expliquant les flux de bois (flèche orange) et de gaz (flèche rouge).

Les foyers à grilles mobiles ont donc une aptitude particulière à brûler du bois humide. Afin d'accroître cette aptitude la voûte peut être adaptée comme l'illustre la Figure 2-22. Classiquement les foyers à grilles sont construits formant un co-courant. Autrement dit, le bois et les gaz de combustion circulent dans le même sens dans le foyer (schéma de gauche de la Figure 2-22). Lorsque le bois est très humide, il réclame davantage d'énergie pour sécher avant de pouvoir brûler. Pour ce faire, les gaz de combustion sont entraînés vers le bois venant d'entrer dans le foyer afin qu'ils donnent de leur chaleur au bois humide. Ainsi, l'évacuation des gaz est déplacée vers le centre de la voûte formant un foyer à courant direct. Poussant plus loin le raisonnement, l'évacuation des gaz est réalisée à l'aplomb de l'entrée du bois. Les flammes qui se développent dans le foyer peuvent alors *lécher* le bois humide qui circule dans le sens inverse.

Ces technologies sont utilisées dans des cas très spécifiques car elles ne sont pas sans poser de problème :

- Le foyer à courant direct requiert une forme de foyer particulière ou un volume de foyer supérieur afin de laisser aux gaz le temps réagir entre eux. En effet, la cinétique de réaction veut que les espèces gazeuses demeurent environ deux secondes à plus de 850°C pour que la combustion puisse être la plus avancée possible. Le foyer à courant direct doit donc être dimensionné en conséquence.
- Le foyer à contre courant doit remplir les mêmes conditions que le foyer à courant direct. Si ce type de foyer reçoit du bois très humide, les gaz effectuant le trajet le plus court ne sont formés que de vapeur d'eau, soit un gaz incombustible. En revanche, si le bois est suffisamment sec, les gaz effectuant un trajet court sont chargés de produits combustibles. Selon les dimensions du foyer, ces produits combustibles n'ont pas le temps de réagir avant d'être refroidis. Alors une part de produits imbrûlés se retrouve dans les fumées. Un foyer à contre courant doit donc brûler du bois d'une humidité suffisante pour fonctionner correctement.

2.3.1.3.3. Conclusion

L'humidité du bois utilisé et la puissance nécessaire permettent de déterminer le type de foyer le plus adapté.

En définitive, le foyer à grilles mobiles à co-courant forme l'association de solutions techniques la plus utilisée permettant de brûler un large spectre d'humidité des combustibles.

2.3.1.4. *Echangeur de chaleur*

L'échangeur de chaleur est le lieu où les gaz de combustion sont refroidis au profit de l'eau du réseau qui y est réchauffée. Ces deux fluides sont physiquement séparés par une paroi métallique au travers de laquelle s'établit un transfert thermique. Cette paroi doit, par conséquent, être suffisante pour transmettre à l'eau la l'énergie produite par le foyer. La surface, l'épaisseur et la conductivité thermique de la paroi sont donc déterminantes.

Les échangeurs sont identiques dans leurs principes mais peuvent se distinguer dans leur forme. Ainsi, il existe trois formes d'échangeurs :

- les échangeurs à tubes de fumées où les fumées circulent à l'intérieur de tubes métalliques dont la surface extérieure est mouillée par l'eau du réseau ;
- les échangeurs à plaques où la paroi métallique est plane ;
- les échangeurs à tubes d'eau où les fumées circulent entre des tubes métalliques à l'intérieur desquels circule l'eau du réseau.

Plus efficace et plus simple d'entretien, les échangeurs à tubes de fumées sont les plus répandus.

2.3.1.5. Evacuation des fumées

L'évacuation des fumées est le plus souvent mécanisée. Une turbine centrifuge assure une légère dépression dans la chaudière. Cette dépression oriente les flux de gaz dans les zones de fuites entre l'intérieur et l'extérieur de la chaudière. Ainsi, à tous les points donnant lieu à des fuites, la dépression force l'air à rentrer dans la chaudière plutôt qu'aux fumées d'en sortir, garantissant la sécurité.

Très souvent l'extraction des fumées est régulée en fonction de la différence de pression mesurée entre l'intérieur du foyer et l'ambiant. Un régulateur PID modifie la vitesse de rotation de la turbine d'extraction afin de maintenir une différence de pression de l'ordre de 100 Pa.

De surcroît, l'extraction mécanique des fumées permet la régulation du flux de gaz malgré un débit et des pertes de charge variables. Les variations du débit de fumées sont dues à la modification de la puissance délivrée par la chaudière. Les pertes de charge sont dues à la circulation des fumées dans l'échangeur, dans les dépoussiéreurs cycloniques et la cheminée. L'encrassement de l'échangeur et les conditions atmosphériques à la sortie de la cheminée sont les principales sources de modification des pertes de charge.

2.3.1.6. Régulation de la combustion

Toute chaudière automatique est gérée dans son fonctionnement.

Cette gestion peut être simplissime : une baisse de la température de l'eau circulant dans l'échangeur déclenche la mise en fonctionnement de la chaudière qui fournit alors de la chaleur. L'eau du réseau monte en température. Lorsque l'eau atteint sa température maximale, la chaudière est arrêtée.

Ce type de régulation *simpliste* est souvent mis en œuvre sur des chaudières de petite puissance pour des raisons économiques.

Malgré tout, une chaudière bois démarre et s'arrête difficilement. Ces deux phases du fonctionnement d'une chaudière sont génératrices d'imbrûlés à cause de températures trop basses ou de mauvais équilibre entre l'air et le bois en train de brûler.

Puisque les besoins en chaleur varient au cours du temps, de nombreuses chaudières sont équipées de matériel de régulation qui adapte la production de chaleur aux besoins du réseau de chauffage. Ainsi, ces régulations font varier le débit de bois et les débits d'air au sein de la chaudière afin qu'elle produise l'énergie suffisante au maintien de la température de l'eau au départ sur le réseau de chauffage.

La régulation de la puissance thermique produite fonctionne de la manière suivante :

- la température mesurée dans l'eau sortant de l'échangeur est comparée avec une consigne (couramment 90°C) ;
- l'écart entre mesure et consigne détermine un taux de fonctionnement de la chaudière (couramment appelé Charge). Cette charge est calculée par un régulateur PID qui intègre les phénomènes d'inertie de la chaudière. La charge varie entre 0 et 100% ;
- la charge permet de calculer l'alimentation en bois et en air primaire. Lorsque la chaudière fonctionne à pleine charge (i.e. 100%) l'alimentation en bois est suffisante à fournir la puissance nominale de la chaudière et le débit d'air primaire est suffisant à une bonne combustion ;
- parallèlement, le taux d'oxygène dans les fumées est mesuré grâce à une sonde Lambda. Le taux d'oxygène mesuré est comparé à une consigne généralement égale à 10% ;
- l'écart entre mesure et consigne est intégré par un second régulateur PID qui détermine le taux de fonctionnement de l'air secondaire. Une mesure d'oxygène inférieure à la consigne provoque une augmentation du débit d'air secondaire ;
- un troisième régulateur PID utilise la mesure de pression différentielle dans les fumées pour adapter la vitesse d'extraction des fumées. La consigne utilisée par ce régulateur PID est souvent égale à 100 Pa. Si cette différence de pression baisse, la vitesse d'extraction est augmentée.

La logique de régulation décrite ici est la plus courante aujourd'hui. Elle peut néanmoins être légèrement différente selon les fabricants de chaudières.

2.3.1.7. Conclusions

En résumé, malgré le cadre fixé au début de ce paragraphe, chaque élément constructif d'une chaudière automatique fonctionnant au bois fragmenté est l'objet d'un choix complexe déterminé entr'autres facteurs par l'humidité du bois, la puissance thermique à fournir et le coût global de la chaudière.

En guise de conclusion, nous pouvons décrire le profil type d'une chaudière automatique courante capable de brûler un large spectre de bois et répondant au mieux aux besoins de son utilisateur :

- Alimentation en bois par vis d'Archimède ;
- Alimentation en air divisé entre air primaire et secondaire ;
- Foyer à grilles mobiles à co-courant ;
- Echangeur à tubes de fumées ;
- Extraction mécanique régulée et dépoussiéreurs cycloniques ;
- Régulation proportionnelle, intégrale et différentielle (PID) faisant varier les débits de bois, d'air et de fumées.

2.3.2. Etudes de combustion

De nombreuses études traitent de la combustion du bois dans des fours de laboratoires. En revanche, peu d'études traitent de la combustion du bois dans des chaudières industrielles.

Ce paragraphe présente les principaux résultats tirés d'études effectuées sur des chaudières industrielles.

2.3.2.1. Influence du mélange combustible-comburant

Une illustration (Figure 2-23) tirée du Handbook of Biomass Combustion and Cofiring [59] page 105 révèle un premier résultat intéressant où apparaît l'influence du mélange combustible-comburant sur les émissions de monoxyde de carbone.

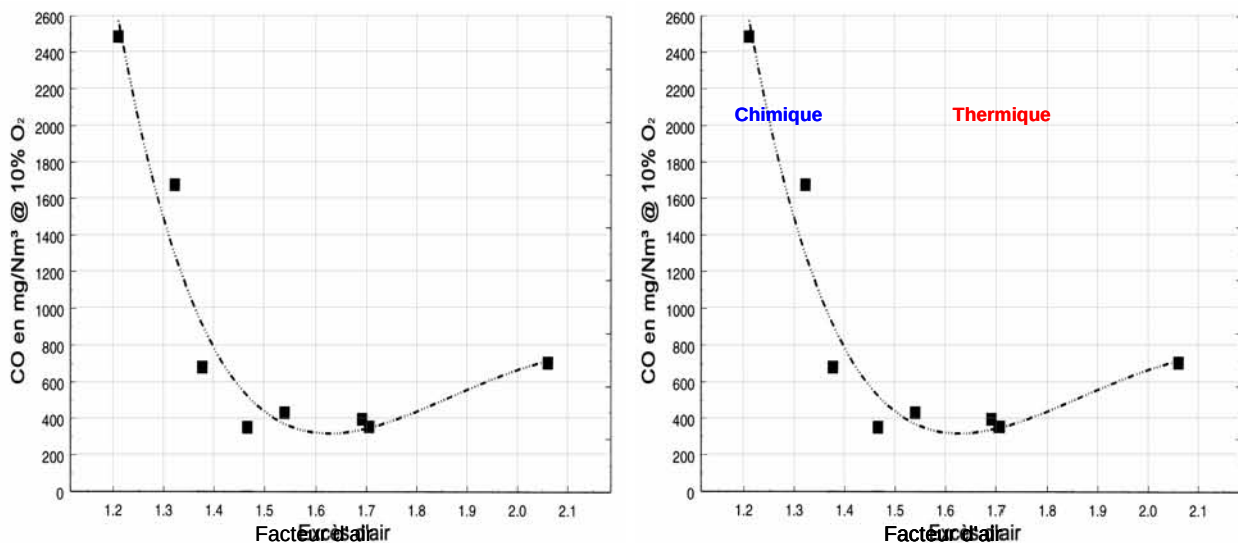


Figure 2-23 : Emissions gazeuses de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air.

La Figure 2-23 donne l'évolution des émissions de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air fourni à la combustion. Il apparaît que les émissions de monoxyde de carbone obtiennent un minimum pour un facteur d'air avoisinant 1,5. Ce minimum est le résultat d'un équilibre entre deux phénomènes distincts :

- Plus le débit d'air injecté augmente pour la combustion d'un même débit de bois, plus le débit de fumées augmente pour une même quantité d'énergie libérée : la température moyenne des fumées tend donc à diminuer. Cette baisse de température ralentit les vitesses d'oxydation des gaz et produit par conséquent davantage d'imbrûlés. Ce phénomène, dit thermique, est relevé par la droite rouge sur la droite de la Figure 2-23.
- Plus le débit d'air injecté diminue pour atteindre le débit d'air stœchiométrique, plus les imbrûlés gazeux manquent d'oxygène pour réagir. Ce phénomène, dit chimique, est lisible par la droite bleue sur la gauche de la Figure 2-23.

On note alors qu'il existe un domaine dans lequel l'air injecté est suffisant pour apporter l'oxygène nécessaire et assez faible pour garantir une température élevée.

Ce premier résultat indique que la combustion du bois requiert un juste équilibre entre débit d'air et débit de bois (traduit ici par le facteur d'air) afin de produire un minimum de monoxyde de carbone.

Rappelons que la réaction d'oxydation du CO en CO₂ produit plus des deux tiers de l'énergie produite par l'oxydation du carbone du bois en CO₂. Autrement dit, la présence de monoxyde de carbone dans les fumées, outre son caractère polluant, diminue le rendement énergétique.

2.3.2.2. Influences de l'humidité du bois et de la modulation de puissance

L'étude de Staiger et al. [51] est réalisée sur une chaudière automatique de 450 kW munie d'un foyer à grilles mobiles à contre courant brûlant des plaquettes forestières humides.

La Figure 2-24 illustre les émissions de monoxyde de carbone obtenues lors d'essais de combustion avec des plaquettes forestières d'humidités différentes en faisant fonctionner la chaudière de 450 kW à des puissances développées variant jusqu'à un tiers de la puissance nominale, soit 150 kW.

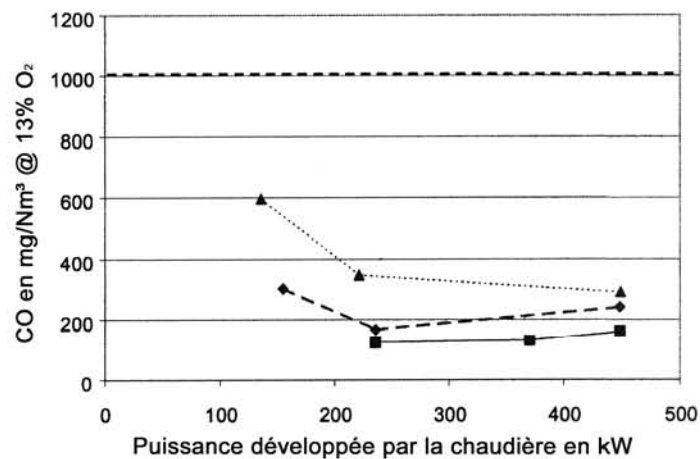


Figure 2-24 : Emissions de monoxyde de carbone en fonction de la puissance délivrée et de l'humidité du bois (carrés et ligne continue : $H_b = 42,4\%$; losanges et ligne discontinue : $H_b = 46,2\%$; triangles et ligne pointillée : $H_b = 51,4\%$).

La Figure 2-24 permet de noter les influences de l'humidité du bois et de la modulation de puissance sur les émissions de monoxyde de carbone. Ainsi, le premier résultat concernant l'influence de la modulation de puissance montre que :

- les émissions de monoxyde de carbone n'évoluent que peu et sont minimales dans un intervalle d'utilisation de la chaudière entre 50% et 100% de sa puissance nominale ;
- si la chaudière est utilisée en deçà de 50% de sa puissance nominale, les émissions de monoxyde de carbone augmentent fortement. On note une augmentation d'environ 50% des émissions de monoxyde de carbone lorsque la puissance délivrée est diminuée de 50% à 33% de la puissance nominale.

Ces résultats sur l'influence de la modulation de puissance sont manifestement peu dépendants de l'humidité du bois utilisé comme combustible.

Le second résultat traduit sur la Figure 2-24 concerne l'influence de l'humidité du combustible sur les émissions de monoxyde de carbone. Il apparaît une nette stratification des émissions de monoxyde de carbone en fonction de l'humidité du bois :

- plus le bois utilisé est humide et plus les émissions de monoxyde de carbone engendrées par sa combustion sont importantes pour une même puissance. Entre l'utilisation d'un bois à 42,4% d'humidité sur brut et un bois à 51,4%, les émissions de monoxyde de carbone sont presque doublées.

2.3.2.3. Solution technique particulière

La modulation de puissance semble être le défi technique devant être relevé sur les chaudières automatiques fonctionnant au bois.

C'est dans ce cadre qu'un fabricant suédois a développé une chaudière particulière en partenariat avec l'Université Technologique de Luleå (Suède). Cette chaudière a fait l'objet de travaux de recherche publiés par Lundgren et al. [22,23].

La chaudière qui développe une puissance nominale de 500 kW sert au chauffage d'un réseau de chaleur urbain dans la ville suédoise de Boden proche du cercle polaire arctique. Afin d'augmenter l'intervalle de modulation de la puissance, cette chaudière est munie d'un double foyer alimenté par trois vis d'Archimède (cf. Figure 2-25). Le petit foyer est prévu pour délivrer une puissance nominale de 150 kW. Il est alimenté par une vis d'Archimède tandis que le grand foyer de 350 kW est alimenté par deux vis.

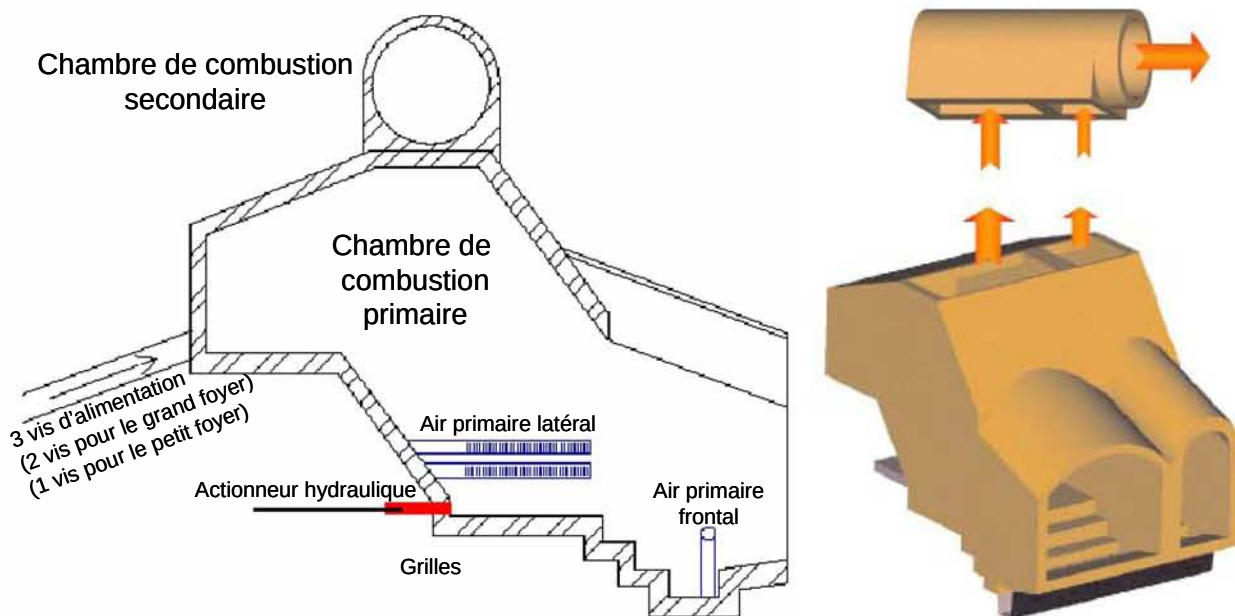


Figure 2-25 : Description du foyer double de la chaudière automatique produisant 500 kW.

Cette configuration double et asymétrique du foyer permet, d'après Lundgren, d'obtenir une modulation de la puissance sur un intervalle entre 10% et 100% de la puissance nominale. En fonction de la puissance thermique appelée par le réseau de chauffage, les foyers sont arrêtés ou démarrés.

- Ainsi, à pleine puissance les deux foyers fonctionnent en parallèle à pleine puissance.
- Lorsque la puissance diminue, le petit foyer est régulé jusqu'à être arrêté, la chaudière ne délivre donc plus que 350 kW.
- Lorsque la puissance appelée diminue encore, le grand foyer est régulé et le petit foyer redémarré jusqu'à ce que le grand foyer soit arrêté. La chaudière ne produit plus que 150 kW ;
- Si la puissance appelée baisse davantage, seul le petit foyer fonctionne et est régulé jusqu'à un tiers de sa puissance nominale, soit 50 kW.

La Figure 2-26 illustre une modulation de puissance type effectuée sur 12 heures de fonctionnement pendant lesquelles les appels de puissance varient entre 50 kW et 500 kW. Les émissions de monoxyde de carbone sont mesurées pendant ce cycle de fonctionnement et représentées (courbe noire) en parallèle de la courbe de puissance (courbe rouge).

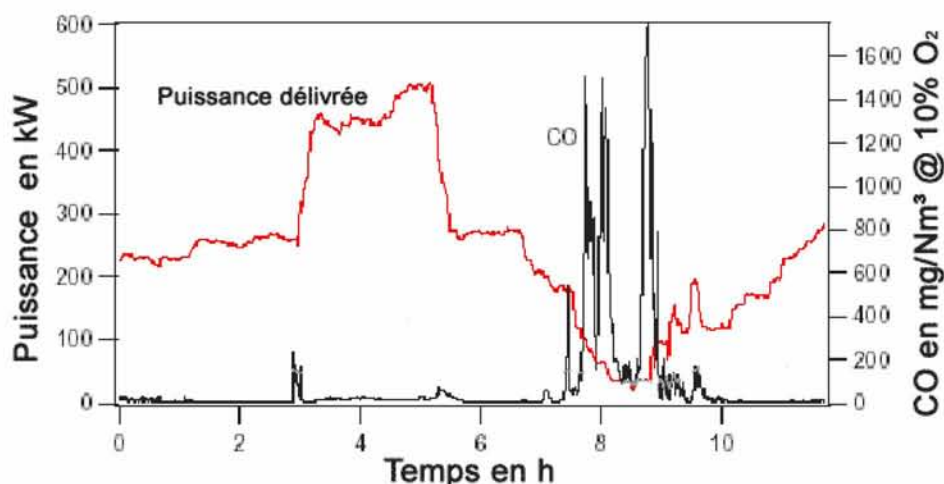


Figure 2-26 : Evolution au cours du temps de la puissance délivrée et des émissions de CO.

On peut noter alors les très faibles émissions de monoxyde de carbone lorsque la chaudière délivre plus de 150 kW. Quelques pics de monoxyde de carbone sont visibles lors des changements de puissance qui correspondent au démarrage ou à l'extinction d'un des foyers.

Lorsque la puissance baisse en deçà de 150 kW, les émissions de monoxyde de carbone sont plus chaotiques.

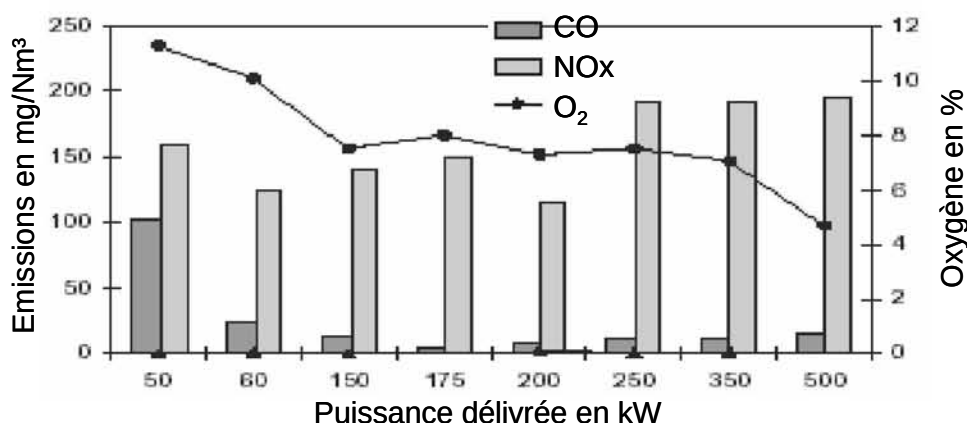


Figure 2-27 : Emissions de CO et de NOx, et teneur en oxygène dans les conditions de fonctionnement optimal en fonction de la puissance délivrée.

La Figure 2-27 illustre plus précisément les moyennes d'émissions de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote selon la puissance délivrée par la chaudière. Cette Figure 2-27 représente également la teneur en oxygène mesurée dans les fumées sèches. Les mesures ont été effectuées après optimisation du fonctionnement de la chaudière afin qu'elle produise un minimum de monoxyde de carbone quelle que soit la puissance délivrée.

On note que les émissions de monoxyde de carbone demeurent en dessous de 30 mg/Nm³ quelle que soit la puissance délivrée dans un intervalle compris entre 60 et 500 kW. A 50 kW, les émissions de monoxyde de carbone montent à 100 mg/Nm³. Les mesures d'émissions de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote sont corrigées à taux d'oxygène constant égal à 10%.

Il apparaît clairement que le taux d'oxygène optimal pour limiter les émissions de monoxyde de carbone varie nettement en fonction de la puissance délivrée.

Ainsi, pour des conditions proches des nôtres, lorsque la chaudière délivre entre 50 et 150 kW seul le petit foyer est en fonctionnement. A 50 kW le taux d'oxygène est approximativement de 11,5% alors qu'il est d'environ 7,5% lorsque le foyer délivre sa puissance nominale, soit 150 kW.

L'analyse des puissances supérieures est plus compliquée car il est difficile de connaître le taux de fonctionnement de chaque foyer. Notons juste que lorsque les deux foyers fonctionnent à plein régime le taux d'oxygène idéal dans les fumées est de l'ordre de 4,5%.

2.3.3. Conventions

2.3.3.1. Normalisation sur les émissions

Les chaudières automatiques d'une puissance inférieure ou égale à 300 kW fonctionnant au bois fragmenté sont soumises à la norme NF EN 303-5 [32]. Cette normalisation classe les installations en fonction de leur niveau d'émissions de monoxyde de carbone (cf. Tableau 2-7), de composés organiques gazeux et de poussières (cf. Tableau 2-8).

Puissance utile nominale en kW	CO en mg/Nm ³ à 10% d'O ₂		
	classe 1	classe 2	classe 3
P < 50	15 000	5 000	3 000
50 < P < 150	12 500	4 500	2 500
150 < P < 300	12 500	2 000	1 200

Tableau 2-7 : Emissions seuils en CO selon la norme NF EN 303-5.

Puissance utile nominale en kW	Composés Organiques Gazeux en mg/Nm³ à 10% d'O₂			Poussières en mg/Nm³ à 10% d'O₂		
	classe 1	classe 2	classe 3	classe 1	classe 2	classe 3
P < 50	1 750	200	100	200	180	150
50 < P < 150	1 250	150	80			
150 < P < 300						

Tableau 2-8 : Emissions seuils en COG et poussières selon la norme NF EN 303-5.

Les seuils d'émissions dictés par la norme permettent de classer les installations depuis les plus respectueuses de l'environnement (classe 3) aux plus polluantes (classe 1).

La norme NF EN 303-5 [32] concerne les chaudières d'une puissance maximale de 300 kW. La réglementation portant sur des chaudières automatiques consommant du bois fragmenté d'une puissance supérieure à 300 kW est l'Arrêté rubrique n° 2910 traitant des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Les chaudières concernées par cet Arrêté ont une puissance supérieure ou égale à 2 MW et inférieure à 20 MW. Notons donc que les chaudières d'une puissance intermédiaire (300 < P < 2000 kW) sont l'objet d'un flou normatif.

Puissance nominale	CO en mg/Nm ³ à 11% d'O ₂
2 ≤ P < 4 MW	250
4 ≤ P < 20 MW	

Tableau 2-9 : Emissions seuils en CO selon l'Arrêté rubrique n°2910.

Puissance nominale	Composés Organiques Gazeux en mg/Nm ³ à 11% d'O ₂	Poussières en mg/Nm ³ à 11% d'O ₂
2 ≤ P < 4 MW	50	150
4 ≤ P < 20 MW		100

Tableau 2-10 : Emissions seuils en COG et poussières selon l'Arrêté rubrique n°2910.

Les réglementations en vigueur fixent une limite d'émission de poussières évoluant peu avec la puissance de l'installation concernée. En revanche, les limites d'émissions en monoxyde de carbone et en Composés Organiques Gazeux se restreignent fortement avec la puissance.

Notons que les limites d'émissions ne sont pas données dans la même échelle selon les textes. La norme énonce des émissions en mg/Nm³ corrigé à 10% d'oxygène dans les fumées tandis que l'Arrêté utilise des mg/Nm³ corrigé à 11% d'oxygène. Une règle de conversion d'unités semble donc nécessaire pour comparer les mesures effectuées avec les seuils donnés par les réglementations.

2.3.3.2. Conversion d'unités

Les instruments de mesures de la qualité des gaz indiquent généralement la proportion volumique d'un gaz spécifique dans le milieu de prélèvement. Les mesures brutes sont souvent indiquées en ppm. L'information donnée par la mesure est donc sujette aux dilutions des gaz pouvant intervenir avant le lieu de mesure. Cette dilution s'effectuant le plus souvent avec de l'air, c'est le taux d'oxygène mesuré simultanément qui indique le degré de dilution. Ainsi, l'expression de la teneur en un gaz n'indique rien de comparable si elle n'est pas accompagnée du taux d'oxygène. Afin de comparer différentes teneurs entre elles, celles-ci doivent être exprimées à même taux d'oxygène.

La conversion du taux d'oxygène d'une mesure s'effectue par l'expression suivante :

$$X_{gaz @ p\%O_2} = \frac{0,21 - p}{0,21 - k} \cdot X_{gaz @ k\%O_2} \quad (\text{Eq. 2-41})$$

Où : $X_{gaz @ p\%O_2}$ est la teneur en gaz donnée à $p\%$ d'oxygène ;

$X_{gaz @ k\%O_2}$ est la teneur en gaz donnée à $k\%$ d'oxygène.

Rappelons que la mesure ainsi exprimée est un rapport volumique. Exprimé dans les conditions normales de pression et de température, cette représente des Nm³ de gaz mesuré par Nm³ de milieu. Connaissant la masse molaire du-dit gaz mesuré, on peut exprimer cette mesure en masse de gaz par Nm³ de gaz ambiant.

Prenons le cas particuliers du monoxyde de carbone dont la masse molaire est de 28 g/mol. Afin de convertir une mesure exprimée en ppm en une mesure exprimée en mg/Nm³, il est nécessaire d'appliquer la formulation suivante :

$$X_{CO} [\text{en mg/Nm}^3] = \frac{28}{22,4} \cdot X_{CO} [\text{en ppm}] \quad (\text{Eq. 2-42})$$

Où : 28 est la masse molaire du monoxyde de carbone en g/mol ;

22,4 est le volume molaire des gaz parfaits dans les CNTP en l/mol.

Notons que le degré de dilution n'est pas modifié par cette dernière expression.

La conversion d'une mesure effectuée en ppm à 13% d'oxygène en une mesure en mg/Nm³ à 10% d'oxygène requiert d'appliquer les deux formules de conversion précédentes.

La suite du document utilise respectivement des échelles de monoxyde de carbone en ppm à 13% d'oxygène et mg/Nm³ à 10% d'oxygène, précisons ici le rapport entre ces deux échelles :

$$X_{CO} [\text{en mg/Nm}^3 @ 10\% O_2] \cong 1,72 \cdot X_{CO} [\text{en ppm @ 13\% } O_2] \quad (\text{Eq. 2-43})$$

$$X_{CO} [\text{en ppm @ 13\% } O_2] \cong 0,58 \cdot X_{CO} [\text{en mg/Nm}^3 @ 10\% O_2] \quad (\text{Eq. 2-44})$$

2.3.4. Conclusions

La chaudière à grilles mobiles à co-courant alimentée par vis d'Archimède est le type de chaudières à bois le plus répandu.

Il existe un équilibre entre débit de combustible et débit de comburant qui permet d'obtenir une combustion minimisant la production de monoxyde de carbone.

Cet équilibre consiste à délivrer un débit de comburant supérieur au débit stœchiométrique si bien que le comburant en excès peut être mesuré dans les fumées afin de traduire l'équilibre.

Le facteur d'air comburant optimum dépend du taux de fonctionnement de la chaudière : le facteur d'air diminue au fur et à mesure que la puissance augmente pour atteindre la puissance nominale de la chaudière.

L'humidité du combustible intervient dans la production de monoxyde de carbone : plus l'humidité du combustible augmente et plus la production de monoxyde de carbone augmente.

Aucune information n'existe à propos de l'influence de l'humidité du combustible sur le facteur d'air optimal.

3. Matériel et traitements

3.1. Matériel utilisé

Ce paragraphe décrit le matériel utilisé durant cette étude. Une première partie traite du matériel que nous avons mis au point afin de caractériser le bois fragmenté utilisé. La deuxième partie traite des caractéristiques et spécificités de notre chaudière d'étude. Enfin, nous décrivons l'automate de gestion de la chaudière.

3.1.1. Banc de caractérisation du bois fragmenté

Dans le but de mesurer les caractéristiques physiques du bois fragmenté, nous avons mis au point un banc de caractérisation permettant d'obtenir les informations suivantes :

- la répartition granulométrique des particules de bois ;
- la masse volumique apparente du combustible bois ;
- le taux d'humidité moyen ;
- le taux de cendres formées par les résidus non combustibles ;
- les pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur du combustible bois ;
- l'analyse élémentaire sur les composés C, H, O et N contenus dans le résidu anhydre (analyse soustraite au laboratoire CNRS de Vernaison).

Ce travail de recherche étant d'un intérêt autant scientifique qu'industriel, nous avons mené chacune de nos démarches avec le souci de suivre une norme française, européenne ou d'un pays européen ; et ce, dans le but d'initier une démarche d'obtention de nos résultats aisément reproductible. La norme autrichienne $\ddot{o}$ norm M 7133 [34] est la seule dans toute l'Europe spécifique au combustible bois fragmenté. Aussi, nous nous sommes largement inspirés de ce texte pour développer ce banc de caractérisation. En l'absence de norme française ou européenne précisant à l'échelle nationale les protocoles d'essais, nous nous sommes bornés à adapter cette norme autrichienne en fonction de normes françaises proches.

3.1.1.1. Granulométrie

La mesure de la répartition granulométrique n'est soumise à aucune norme spécifique aux granulats de bois. La norme autrichienne $\ddot{o}$ norm M 7133 [34] stipule l'utilisation de sept tamis de mailles carrées afin d'obtenir huit classes de tailles. L'adaptation que nous avons faite du protocole réside dans la taille des mailles. D'après le texte, les mailles de contrôle doivent être de section carrée selon une ouverture de { 1 - 2,8 - 5,6 - 11,2 - 16 - 31,5 - 63 } mm. A la réalisation de notre machine de tri, nous avons simplifié ces dimensions par les suivantes : { 1 - 2 - 5 - 10 - 15 - 30 - 63 } mm.



Figure 3-1 : Table de tri vibrante recevant les tamis de tri granulométrique (visible sur la photo le tamis de 63mm d'ouverture).

Lorsqu'il s'agira d'exprimer les résultats de mesure de répartition granulométrique, nous avons opté pour une représentation graphique sur une échelle des abscisses logarithmiques représentant la surface d'ouverture de la maille. La Figure 3-2 illustre clairement la régularité des informations le long d'une telle échelle.

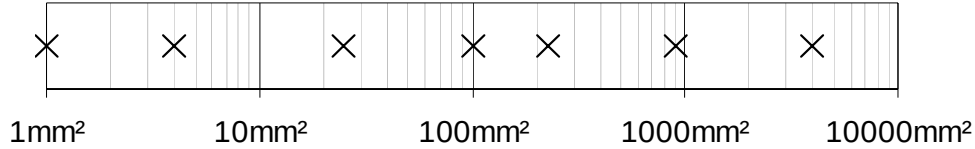


Figure 3-2 : Répartition des classes de tailles sur l'échelle des abscisses choisie.

Sur l'échelle des ordonnées sont reportées les fractions massiques x_i de chaque classe de taille calculés de la façon suivante :

$$x_i = \frac{m_i}{m_{\text{bois.humide}}} \quad (\text{Eq. 3-1})$$

où : m_i est la masse de bois passant au travers de la grille i et refusée par la grille $(i-1)$;

$m_{\text{bois.humide}}$ est la masse totale si bien que $\sum_j m_j = m_{\text{bois.humide}}$.

3.1.1.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est le seul lien entre la masse et le volume d'un tas de bois fragmenté. Dans notre cas, cette mesure est sujette à variations en fonction de l'humidité et du brassage des particules dans le tas. Ainsi, notre protocole de mesure, basé sur la norme NF B 51-005 [31], est réalisé en même temps que la détermination du taux d'humidité et se déroule de la façon suivante : un récipient d'un volume $V_{\text{récipient}}$ connu est rempli de bois fragmenté sans chute ni arrangement des particules. La masse $m_{\text{bois.humide}}$ investie est prise en compte et permet d'obtenir la masse volumique apparente humide $\rho_{\text{bois.humide}}$ par la formule suivante :

$$\rho_{\text{bois.humide}} = \frac{m_{\text{bois.humide}}}{V_{\text{récipient}}} \quad (\text{Eq. 3-2})$$

Le séchage d'un tas de bois fragmenté ne change que très peu le volume apparent qu'il occupe. On peut donc déterminer la masse volumique apparente anhydre d'un tas de bois fragmenté dès que l'on a obtenu l'humidité sur brut du bois H_b . La masse volumique apparente anhydre $\rho_{\text{bois.anhydre}}$ est calculée par déduction de la masse d'eau contenue dans le bois par la formule suivante :

$$\rho_{\text{bois.anhydre}} = (1 - H_b) \cdot \rho_{\text{bois.humide}} \quad (\text{Eq. 3-3})$$

La masse volumique apparente anhydre ρ_{anhydre} représente alors la caractéristique physique du bois fragmenté ne prenant en compte que la masse volumique anhydre du bois utilisé et le foisonnement maximal des particules.

3.1.1.3. Humidité

L'humidité est une caractéristique physique importante du bois fragmenté : elle joue sur les autres caractéristiques et peut varier fortement en peu de temps en fonction des conditions initiales et de stockage. Nous déterminons l'humidité selon la norme NF B 51-004 [30] dans une étuve ventilée régulée à une température de $103^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sur trois échantillons d'une centaine de grammes prélevés simultanément.

Nous exprimons systématiquement l'humidité sur brut, notée H_b ; autrement dit, le rapport de la masse d'eau m_{eau} sur la masse initiale de bois humide $m_{\text{bois,humide}}$. D'où la formule :

$$H_b = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{bois,humide}}} \quad (\text{Eq. 3-4})$$

Rappelons ici que les professionnels de la seconde transformation du bois expriment le plus souvent le taux d'humidité sur sec qui est notée H_s . H_s est le rapport de la masse d'eau sur la masse de bois anhydre. La relation entre les deux humidités est telle que :

$$H_b = \frac{H_s}{1 + H_s} \quad (\text{Eq. 3-5})$$

3.1.1.4. Taux de cendres

Le taux de cendres x_{cendres} représente l'ultime fraction de masse d'un matériau combustible ne pouvant pas brûler dans les conditions standard de la combustion. Nous mesurons le taux de cendres selon le protocole de la norme NF M 03-003 [33] en effectuant une première combustion d'un échantillon d'environ 100g de bois anhydre dans un creuset en Inconel placé sur un bec Meker. Après deux heures sur le bec Meker, le creuset est placé dans un four à moufle régulé à 850°C où il est laissé durant huit heures minimum jusqu'à ce que la fraction combustible ait complètement brûlé. L'expression du résultat s'effectue naturellement comme étant le rapport de la masse de cendres m_{cendres} sur la masse de bois anhydre $m_{\text{bois,anhydre}}$ selon la formule suivante :

$$x_{\text{cendres}} = \frac{m_{\text{cendres}}}{m_{\text{bois,anhydre}}} \quad (\text{Eq. 3-6})$$

3.1.1.5. Pouvoir calorifique

La détermination du pouvoir calorifique est sujette à nuances selon le mode opératoire utilisé. Dans un premier temps est déterminé le pouvoir calorifique supérieur (PCS) à l'aide d'une bombe calorimétrique.

La bombe demande à être étalonnée grâce à de l'acide benzoïque. En pratique le protocole requiert d'insérer le même volume d'eau dans la bombe calorimétrique afin d'obtenir un étalonnage global. Nous avons opté pour insérer dans la bombe une masse d'eau m_{eau} connue mais variable pour n'étalonner que la partie solide. Ainsi, la bombe calorimétrique dont nous disposons a une capacité calorifique $C_{\text{bombe,calorimétrique}}$ globale de 1811 J/K . Hormis cette nuance opératoire, notre protocole de mesure est en tout point celui décrit par la norme NF M 03-005 [34].

Ainsi, par combustion d'un échantillon de bois de masse $m_{pastille}$, la bombe calorimétrique va subir une augmentation de température égale à ΔT . Connaissant la capacité calorifique de la bombe $C_{bombe.calorimétrique}$, la masse d'eau m_{eau} et la capacité calorifique massique de l'eau Cp_{eau} , on calcule le PCS par la formule suivante :

$$PCS = \frac{(C_{bombe.calorimétrique} + m_{eau} \cdot Cp_{eau}) \cdot \Delta T}{m_{pastille}} \quad (\text{Eq. 3-7})$$

Grâce à la composition élémentaire, on peut exprimer le pouvoir calorifique inférieur du combustible anhydre :

$$PCI_{anhydre} = PCS - 9 \cdot x_H \cdot L \quad (\text{Eq. 3-8})$$

où : 9 est le rapport de masse d'eau formée par une masse d'hydrogène initiale ;

x_H est la fraction massique d'hydrogène contenu dans le combustible, soit 6% ;

L est la chaleur latente de changement d'état de l'eau, soit 2600 kJ/kg.

Ensuite, grâce à l'humidité sur brut H_b , on peut exprimer le pouvoir calorifique inférieur du combustible humide grâce à la formule suivante :

$$PCI = (1 - H_b) \cdot PCI_{anhydre} - H_b \cdot L \quad (\text{Eq. 3-9})$$

3.1.2. Chaudière COMPTE

Le matériel expérimental sur lequel est effectuée cette étude est une chaudière industrielle de 150 kW. Construite à partir d'une technologie de foyer à grilles mobiles, cette chaudière est commercialisée pour des applications de production d'eau chaude à but de chauffage collectif ou industriel.

Néanmoins, quelques éléments distinguent notre chaudière des modèles courants. Ainsi, les entrées d'air ont été multipliées afin de permettre l'étude de l'influence de la zone d'injection de l'air sur la combustion. Nous disposons donc de deux caissons d'air primaire munis de moteurs distincts permettant de localiser l'injection d'air le long des grilles. De même, trois injections d'air secondaire permettent de répartir l'arrivée d'air en phase gaz le long du foyer. Chacune de ces injections d'air est munie d'une turbine actionnée par un moteur électrique lui-même alimenté par un variateur de fréquence. A chacune de ces turbines correspond un volet d'obturation actionné par un servomoteur qui permet de maîtriser la perte de charge dans la tubulure d'injection d'air, et, par conséquent, de maîtriser totalement les débits d'air.

En plus des entrées d'air, nous bénéficions de la pleine modularité de la voûte du foyer. Nous avons la possibilité de démonter ces éléments de voûte afin de placer des instruments de mesure ou de transformer l'actuel foyer à co-courant en foyer à contre-courant (technologie des foyers d'incinération). Pour l'heure, les essais ont été réalisés avec une configuration classique du foyer, i.e. foyer à co-courant (cf. Figure 3-3).

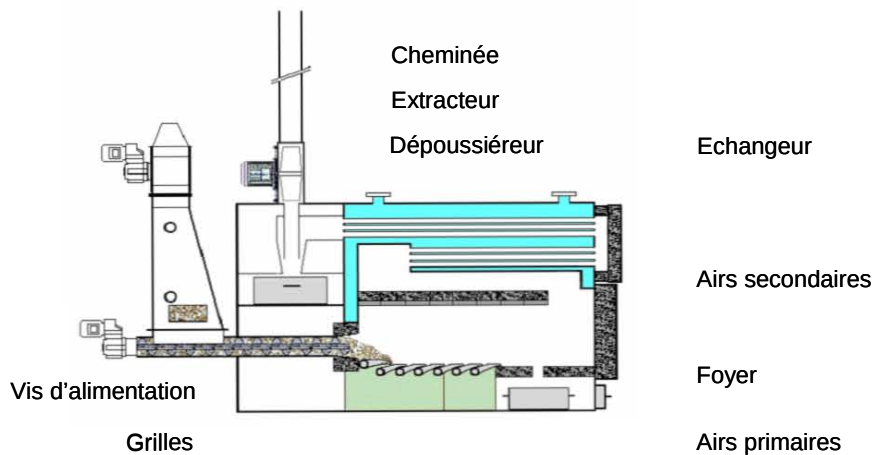


Figure 3-3 : Vue en coupe de la chaudière et de ses particularités.

Si l'on considère la chaudière d'essai comme un système modulaire, les variables d'entrée que nous pouvons maîtriser sont les 5 débits d'air, le débit de bois (i.e. la puissance thermique développée), la vitesse de déplacement des grilles et le débit d'extraction des fumées.

Le sous-paragraphe suivant décrit les capacités techniques de l'ensemble de cette chaudière.

3.1.2.1. Alimentation en bois

L'alimentation du foyer en combustible est assurée par une vis d'un pas de 150 mm évoluant dans un tube cylindrique de 177 mm de diamètre intérieur. Cette géométrie permet un débit théorique de 3,7 litres par tour de vis, mais en pratique le taux de remplissage n'est environ que de 50%.



Figure 3-4 : Schéma de la vis d'alimentation du foyer.

La vis est mue par un moteur triphasé de 550W avec un réducteur de vitesse, ce qui donne à la vis une vitesse de rotation maximale de 9,0 tours par minute, soit un débit volumique maximal théorique de 1,99 m³/h. Le moteur est lui-même alimenté par un variateur de fréquence qui permet de réduire la vitesse de rotation du moteur en jouant sur la fréquence maximale délivrée ($f_{\max}$) ainsi qu'amortir les arrêts et démarrages du moteur comme illustrée sur la Figure 3-5.

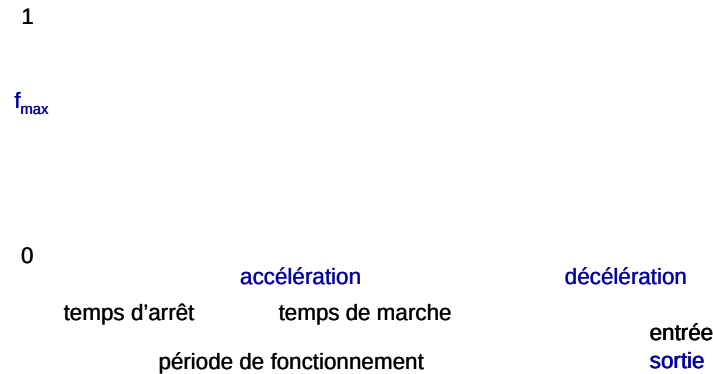


Figure 3-5 : Diagramme temporel illustrant le signal fourni en entrée du variateur et l'évolution de la fréquence d'alimentation du moteur en sortie du variateur.

En effet, l'adaptation du fonctionnement de la vis d'alimentation aux besoins en combustible se fait par un cycle de marche/arrêt sans contrôle de la vitesse de rotation du moteur et non par un fonctionnement continu de la vis selon une vitesse variable.

Définissons le rapport cyclique α , comme étant le taux de fonctionnement de la vis :

$$\alpha = \frac{\text{temps de marche}}{\text{période de fonctionnement}} \quad (\text{Eq. 3-10})$$

En jouant sur le rapport cyclique α , on obtient un temps de fonctionnement moyen de la vis précis quelle que soit la valeur de ce dernier. En pratique, l'automate, qui émet le signal d'entrée au variateur, prend comme valeur de calcul le temps d'arrêt t_P (que nous avons fixé à 1s) et le rapport cyclique α . Ainsi l'automate calcule le temps de marche t_M adéquat par la formule suivante :

$$t_M = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot t_P \quad (\text{Eq. 3-11})$$

3.1.2.2. Alimentations en air

Deux types de moteurs et turbines d'air comburant équipent la chaudière. Sur les airs primaires, deux moteurs de 180W entraînent chacun une turbine qui délivre environ 300 Nm³/h en régime maximal. Sur l'air secondaire, trois moteurs de 90W entraînent des turbines qui délivrent chacune environ 43 Nm³/h au maximum.

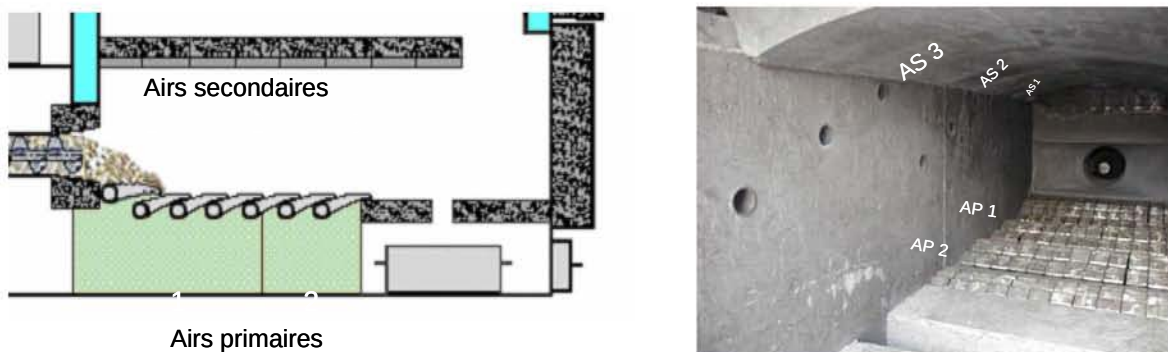


Figure 3-6 : Schéma et photo commentée précisant la position des différentes entrées d'air dans le foyer.

Souhaitant injecter davantage d'air secondaire, nous avons interverti les ensembles moteur/turbine entre l'air primaire 2 et l'air secondaire 1 (cf. Figure 3-6). Cette modification nous a permis d'obtenir grâce à l'ensemble moteur/turbine de 180W un débit d'air secondaire 1 de 72 Nm³/h en régime maximal.

Le contrôle des débits d'air par les volets de perte de charge est suffisamment aléatoire pour que nous abandonnions leur emploi au profit de la variation de fréquence à l'entrée des moteurs. Ainsi, nous avons recâblé l'automate, qui d'origine agissait sur les volets de perte de charge, afin qu'il agisse sur les variateurs de fréquence de chacun des moteurs d'air. Les volets d'air secondaire ont alors été raccordés ensemble à une sortie analogique libre de l'automate ; de même pour les volets d'air primaire. Nous avons alors fixé les volets d'air secondaire selon leur pleine ouverture (soit un signal de 7V sur l'entrée 0-10V de commande) et fait varier la position des volets d'air primaire selon le besoin et en particulier pour obtenir des faibles débits d'air.

3.1.2.3. Foyer

La géométrie du foyer est celle d'un foyer à co-courant. Le dessin de la Figure 3-7 représente le foyer en coupe transversale et longitudinale selon l'échelle précisée. Le volume vide fait 2m de long, 60cm de large et 54cm au plus haut de la voûte, soit un volume de 620 litres. Les 8 éléments de voûte s'étendent sur 1,60m. Ces éléments de voûte sont composés d'une partie mâle et une partie femelle faites de béton réfractaire. L'épaisseur du béton réfractaire est de : 12cm pour la voûte, 8cm pour les parois latérales, 6cm sur le bas et 10cm pour la porte.

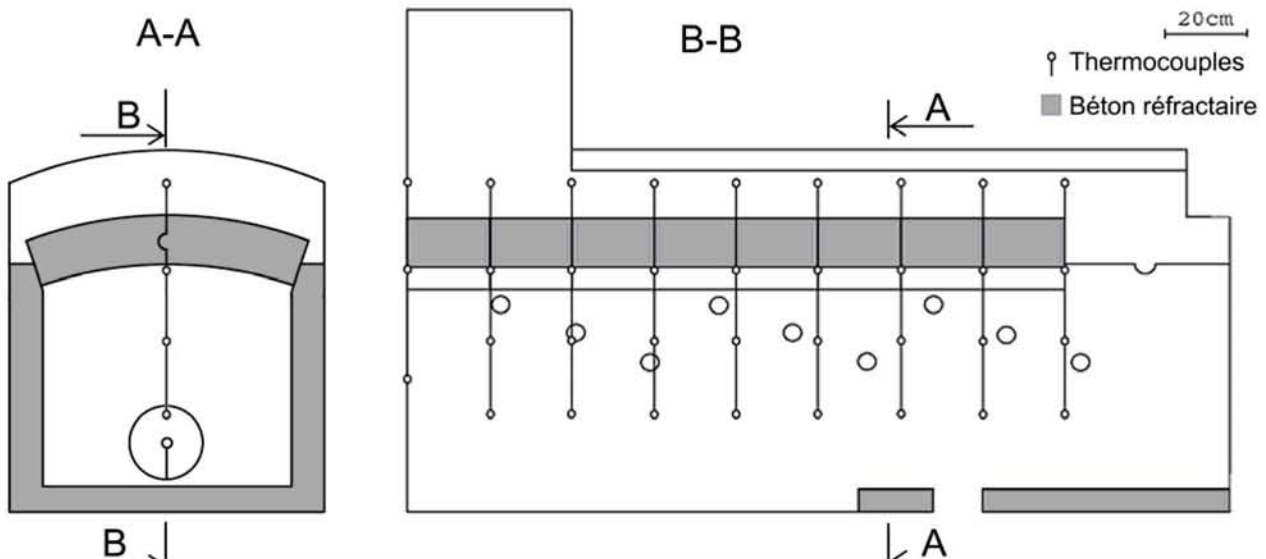


Figure 3-7 : Vue en coupe longitudinale du foyer.

3.1.2.4. Grilles

Les grilles sont formées d'éléments en fonte comme l'illustre la Figure 3-8.



Figure 3-8 : Vue d'un élément de grille.

Placées selon sept rangs de douze éléments, les grilles couvrent toute la largeur du foyer, soit 61cm de large, et s'étendent sur 112cm depuis l'entrée du bois dans le foyer comme le montre la Figure 3-9.



Figure 3-9 : Vue d'ensemble des grilles à l'intérieur du foyer.

Quatre rangs d'éléments de grilles sont immobiles par rapport au foyer et trois rangs sont mus par un vérin hydraulique. Les grilles ainsi formées permettent le déplacement de la matière solide reposant dessus. Les figures suivantes montrent la disposition des supports et le vérin.

Rangées fixes



Rangées mobiles

Figure 3-10 : Vue sous le foyer du mode de montage des éléments de grilles (à droite) et du vérin engendrant le déplacement (à gauche).

Lors d'un mouvement complet d'aller et retour des grilles, les particules en contact avec les grilles effectuent un déplacement maximal de 7,5 centimètres. Ce mouvement d'aller et retour est accompli en 21 secondes minimum, ce qui correspond à une vitesse moyenne maximale de 3,6 mm/s. La vitesse moyenne de déplacement des grilles peut ensuite être contrôlée grâce à un cadencement de marche/arrêt du même type que celui utilisé pour la vis d'alimentation en bois.

3.1.2.5. Echangeur

L'échangeur de chaleur est du type tubes de fumées. Les fumées circulent à l'intérieur de tubes d'acier de 50mm de diamètre intérieur selon un premier passage s'effectuant au travers de 29 tubes de 1,6m de long pour aboutir dans une boîte de fumées et ensuite effectuer un second passage au travers de 18 tubes de 2m de long. La Figure 3-11 illustre la géométrie de l'échangeur ainsi que les sens de circulation des fumées.

Ø 50 mm

1600 mm

2100 mm

Figure 3-11 : Description géométrique de l'échangeur de chaleur incluant le sens de parcours des fumées.

3.1.2.6. Dépoussiéreur

En sortie d'échangeur, les fumées sont distribuées dans 6 dépoussiéreurs cycloniques. En entrant dans la partie cylindrique du cyclone, les gaz sont mis en rotation par des ailettes. Les particules solides en suspensions dans les fumées, plus denses que les gaz, sont projetées par force centrifuge vers la paroi extérieure du cyclone (mouvement noté 1 sur la Figure 3-12).

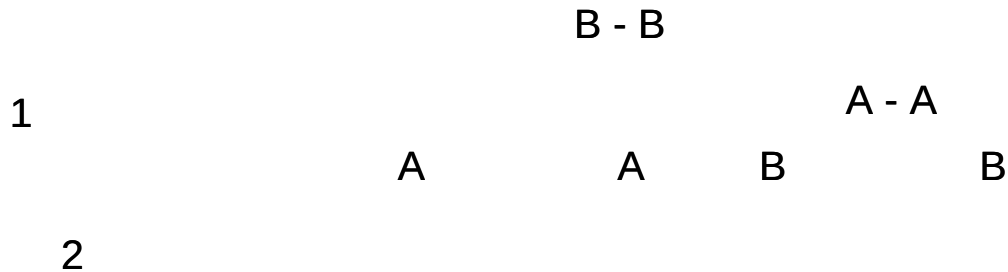


Figure 3-12 : Schéma de principe d'un dépoussiéreur cyclonique.

Lorsque les gaz atteignent la partie conique, le rétrécissement de la section de passage augmente leur vitesse en proportion, ce qui accentue davantage l'éjection des particules solides. Dès que les particules solides atteignent la paroi, elles se retrouvent piégées dans la couche limite de l'écoulement des gaz. La vitesse des gaz étant trop faible au maintien des particules en suspension, celles-ci choient le long de la paroi inclinée du cône (mouvement 2) jusqu'au bac situé en dessous de l'orifice. Les gaz sont évacués par le tube central.

3.1.2.7. Extracteur

L'extraction des fumées est assurée par une turbine centrifuge actionnée par un moteur électrique de 2200W alimenté par un variateur de fréquence. Classiquement, l'extraction des fumées est surdimensionnée pour répondre à un mode d'utilisation particulier : la vitesse de rotation du moteur d'extraction est réglée par un PID afin de maintenir une différence de pression entre l'intérieur du foyer et l'air ambiant.

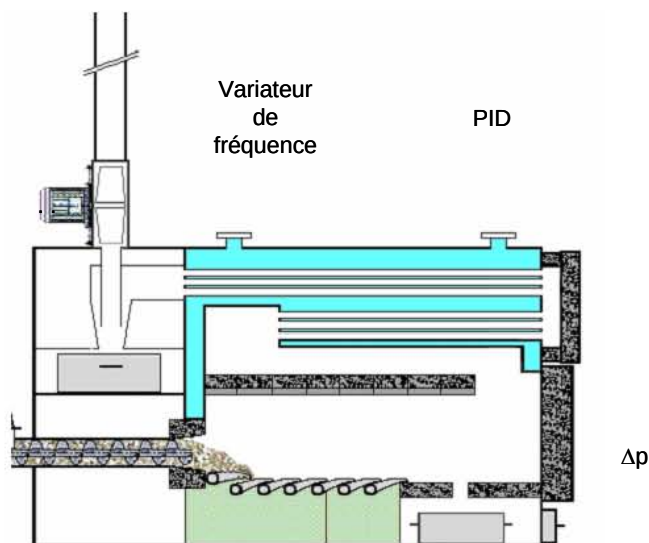


Figure 3-13 : Illustration du mode de control de la puissance d'extraction.

Ainsi, la puissance d'extraction des fumées s'adapte automatiquement aux débits d'entrée d'air et de combustible, aux pertes de charge amonts rencontrées dans le foyer, l'échangeur et le dépoussiéreur, ainsi qu'aux pertes de charge avals rencontrées dans la cheminée et à l'évacuation en toiture (perturbation par le vent). La différence de pression prise pour consigne est de 100Pa. Dans ces conditions d'utilisation, nous avons mesuré un débit maximal de 600Nm³/h de fumées extraites sans que la pression dans le foyer ne remonte.

3.1.2.8. Cheminée d'évacuation

D'origine, la cheminée est un tube de 235mm de diamètre intérieur fait de tôles d'acier pliées et soudées. Afin d'obtenir des vitesses d'écoulement des fumées suffisamment élevées, nous avons du refaire la conduite. La cheminée actuelle est un tube laminé de 107mm de diamètre intérieur. Cette modification permet :

- de multiplier par 5 la vitesse des fumées afin de faire travailler l'instrument de mesure en pleine échelle ;
- de diminuer la longueur utile à stabiliser l'écoulement des gaz et ainsi d'améliorer la qualité de nos mesures.

3.1.3. Automate de gestion

L'automate de gestion est le système de régulation de la chaudière : vers lui convergent toutes les informations, de lui viennent tous les ordres, avec lui dialogue l'opérateur. Notons que l'automate utilisé est un Télémécanique 3722 comportant 32 entrées logiques et 8 entrées analogiques (0-10V), 24 sorties logiques et 8 sorties analogiques (0-10V).

Dans ce paragraphe, nous allons établir la liste exhaustive des points d'entrées et de sorties de l'automate.

3.1.3.1. Points d'entrées

Les entrées de l'automate se font sur deux modules de 16 entrées logiques (notés %I1 et %I3) et deux modules de 4 entrées analogiques (notés %IW5 et %IW7). Les entrées logiques permettent de renseigner l'automate sur un état comme une intrusion ou un bourrage sur le circuit d'alimentation, un état plein d'un conteneur comme la trémie ou le doseur, un état physique par rapport à une référence comme une pression (pressostat) ou une température (thermostat), ou encore l'état de défaut renvoyé par un variateur de fréquence ou par un disjoncteur de rupture thermique d'un moteur. Les figures notées Figure 3-14, Figure 3-15, Figure 3-16, Figure 3-18, illustrent la correspondance des capteurs présents sur la chaudière avec les différentes entrées logiques de l'automate.

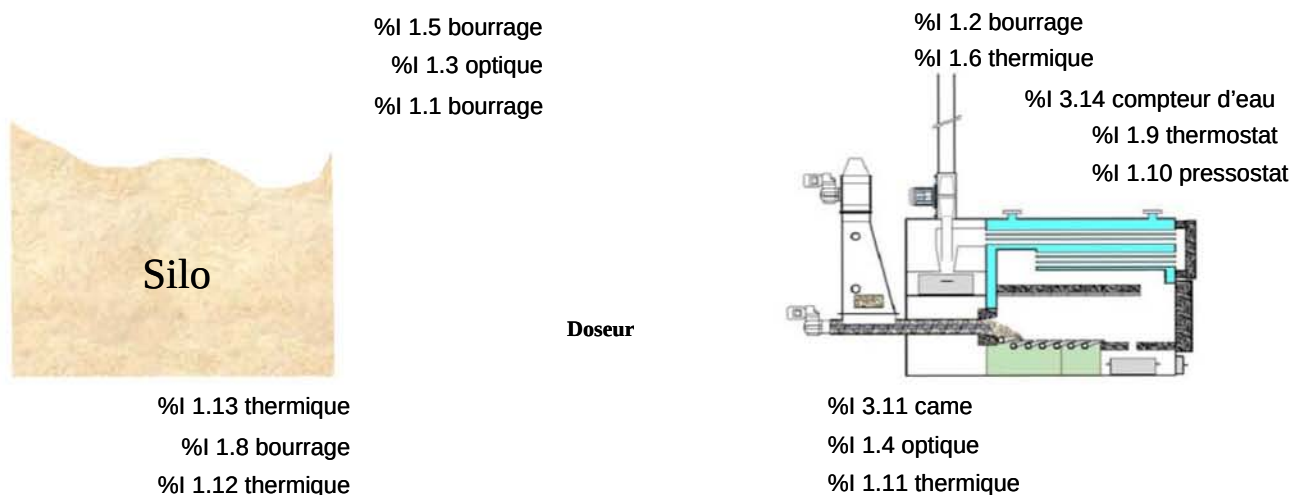


Figure 3-14 : Schéma de localisation des informations entrant dans l'automate.

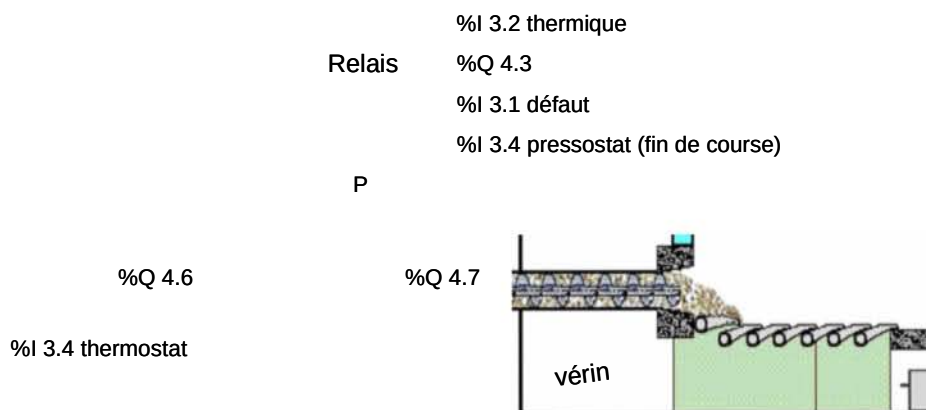


Figure 3-15 : Schéma de liaison des organes de fonctionnement des grilles avec l'automate.

Les entrées analogiques permettent de numériser un état continu d'un capteur afin que l'information puisse être utilisée directement dans le langage de programmation de l'automate. Ainsi, six entrées analogiques sont utilisées pour intégrer : quatre mesures de température, une mesure de pression différentielle entre le foyer et l'ambiant et une mesure du taux d'oxygène dans les fumées. C'est grâce à ces données que l'automate régule le fonctionnement de la chaudière.

3.1.3.1.1. Sonde Lambda

La première voie %IW5.0 reçoit l'état 0-10V de la sonde Lambda permettant de mesurer la teneur en oxygène dans les fumées sèches. La conversion du signal s'obtient par la formule :

$$X_{O_2} = 0,013.U_{O_2} + 0,03 \quad (\text{Eq. 3-12})$$

où : X_{O_2} est le taux d'oxygène mesuré (rapport molaire du dioxygène dans les fumées sèches) ;

U_{O_2} est la différence de potentiel mesurée par l'automate en V.

Cette conversion donne directement le domaine de validité de la mesure. En effet, le signal électrique (borné entre 0 et 10V) ne peut correspondre qu'à un taux d'oxygène minimal de 3% et de 16% au maximum. Cette information n'est donc valable que si elle est strictement comprise entre 3% et 16% d'oxygène.

3.1.3.1.2. Température des fumées

La voie %IW5.1 reçoit la température des fumées mesurée juste après l'extracteur par une sonde thermorésistive PT100. La conversion du signal s'obtient par la formule :

$$T_f = 10.U_{T_f} \quad (\text{Eq. 3-13})$$

où : T_f est la température mesurée en °C ;

U_{T_f} est la différence de potentiel mesurée par l'automate en V.

3.1.3.1.3. Température d'eau

La voie %IW5.2 reçoit la température de l'eau dans l'échangeur mesurée par une sonde thermorésistive PT100. La conversion du signal s'obtient par la formule :

$$T_{eau} = 105.U_{T_{eau}} - 200 \quad (\text{Eq. 3-14})$$

où : T_{eau} est la température mesurée en °C ;

$U_{T_{eau}}$ est la différence de potentiel mesurée par l'automate en V.

Matériel et traitements

3.1.3.1.4. Température du foyer

La voie %IW5.3 reçoit la température des fumées en sortie de foyer mesurée par thermocouple de type K. La conversion du signal s'obtient par la formule :

$$T_{\text{foy}} = 100.U_{T_{\text{foy}}} \quad (\text{Eq. 3-15})$$

où : T_{foy} est la température mesurée en °C ;

$U_{T_{\text{foy}}}$ est la différence de potentiel mesurée par l'automate en V.

3.1.3.1.5. Dépression du foyer

La voie %IW7.0 reçoit l'état 0-10V de la sonde de pression différentielle. La conversion du signal s'obtient par la formule :

$$\Delta p = 50.U_{\Delta p} \quad (\text{Eq. 3-16})$$

où : Δp est la pression différentielle mesurée en Pa ;

$U_{\Delta p}$ est la différence de potentiel mesurée par l'automate en V.

3.1.3.1.6. Température des fumées avant l'échangeur

La voie %IW7.3 reçoit la température des fumées en entrée d'échangeur mesurée par thermocouple de type K. La conversion du signal s'obtient par la formule :

$$T_{\text{éch}} = 164,2.U_{T_{\text{éch}}} - 270 \quad (\text{Eq. 3-17})$$

où : $T_{\text{éch}}$ est la température mesurée en °C ;

$U_{T_{\text{éch}}}$ est la différence de potentiel mesurée par l'automate en V.

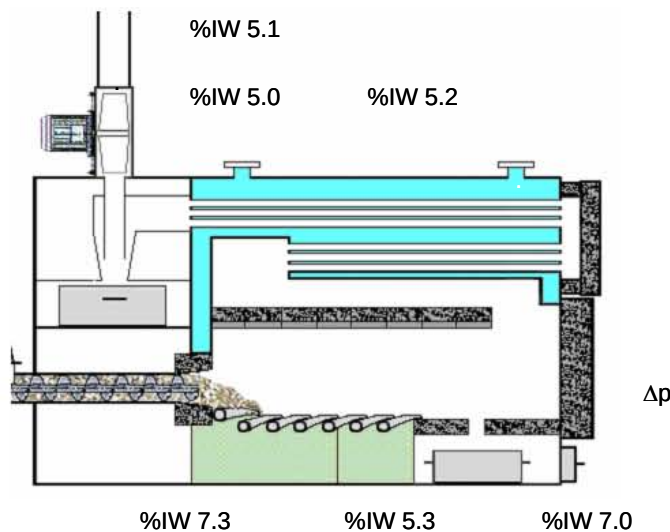


Figure 3-16 : Localisation des sondes délivrant un signal analogique (%IW) à l'automate.

Les voies %IW7.1 et %IW7.2 sont inutilisées.

3.1.3.2. Points de sortie

Les sorties de l'automate se font sur deux modules de 12 sorties logiques (notés %Q2 et %Q4) et deux modules de 4 sorties analogiques (notés %QW6 et %QW8). Les sorties logiques sont des moyens d'agir directement sur les actionneurs du système comme les moteurs électriques (au travers de relais de puissance ou de variateur de fréquence) ou les distributeurs de circuit hydraulique. Les sorties analogiques permettent d'ajuster en finesse la vitesse de rotation d'un moteur (au travers d'un variateur de fréquence) ou la position d'une vanne ou d'un volet. La Figure 3-15 et la Figure 3-17 illustrent la localisation des actionneurs gérés par les points de sortie correspondants. La Figure 3-18 illustre plus précisément les points de sortie logiques et analogiques liés à la modulation de fonctionnement des admissions d'air.

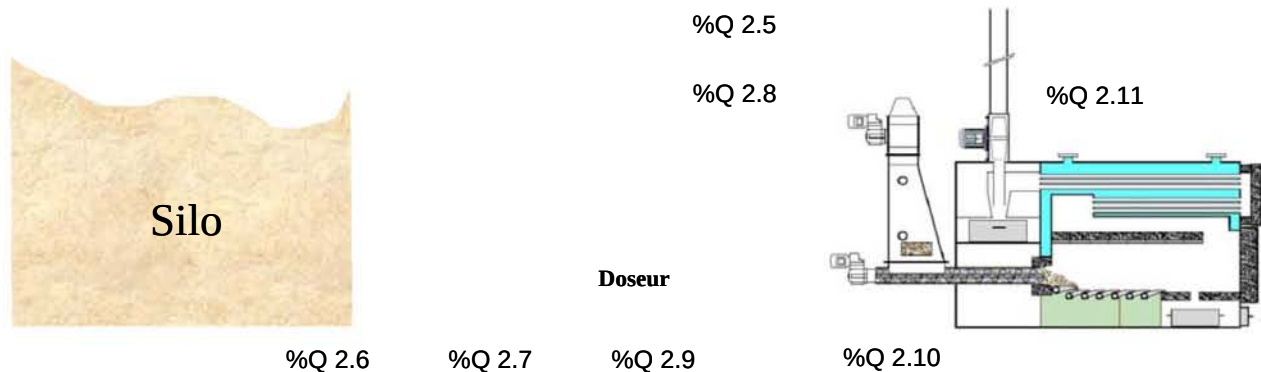


Figure 3-17 : Détail des actions des différentes sorties de l'automate.

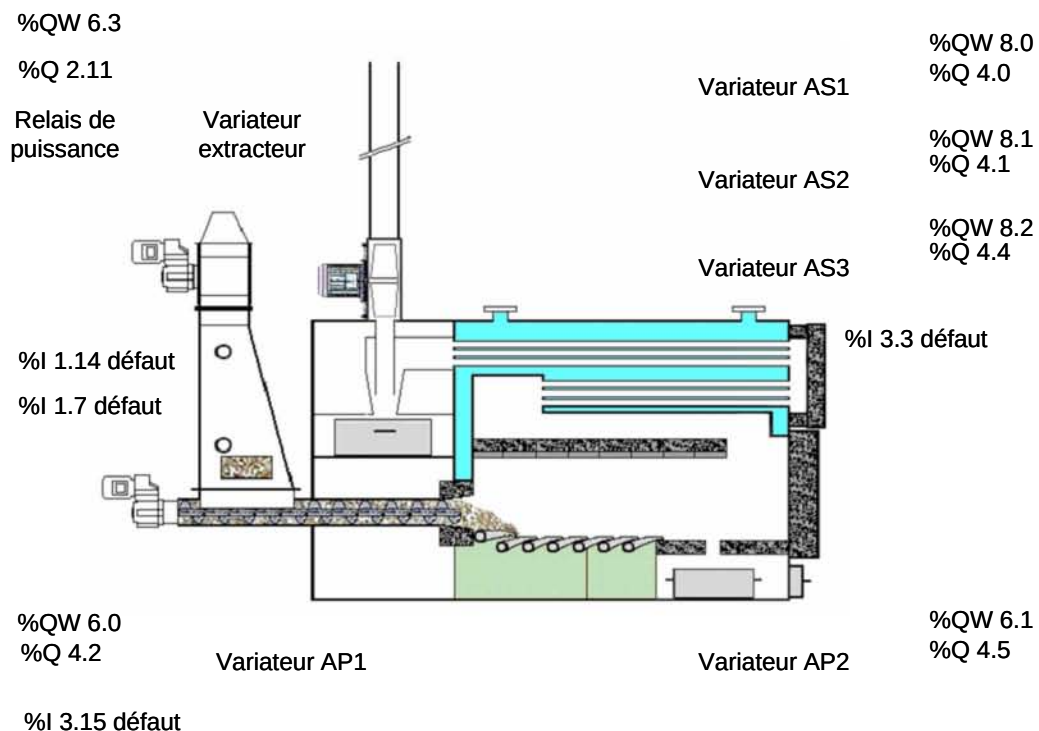


Figure 3-18 : Détails des actions logiques et analogiques sur les flux gazeux et les défauts renvoyés par les relais et variateurs.

3.1.3.3. Logique de régulation de la chaudière

Outre le fonctionnement que l'on impose à la chaudière pour réaliser nos essais, il est important de connaître la logique de fonctionnement programmée dans l'automate. Cette logique est modulaire si bien que l'utilisation d'un automate complexe pourrait être remplacée facilement par de simples PID. Néanmoins, l'utilité de l'automate est entière pour gérer les arrêts d'urgence, la mémorisation d'informations permettant l'entretien et l'interface utilisateur. Nous allons voir dans ce paragraphe la logique de chacun de ces modules.

3.1.3.3.1. Besoin en chaleur

La fonction première de la chaudière est de produire de la chaleur. Le besoin en chaleur se traduit par la température de l'eau en sortie de l'échangeur que l'on note T_{eau} . L'utilisateur demande à l'automate le maintien de cette température à une température de consigne que l'on note $T_{consigne}$. Dès lors que le réseau de chauffage consomme de l'énergie, la température de l'eau baisse. Cette eau circule dans l'échangeur et se réchauffe avant de ressortir. Si la température T_{eau} baisse en dessous de la consigne $T_{consigne}$, cela traduit un besoin en chaleur que l'automate interprète comme une charge variant de 0 à 1 que l'on note X ; 0 traduisant la mise en veille de la chaudière et 1 le fonctionnement à pleine puissance.

Ce paramètre de fonctionnement X est calculé par un régulateur de type PID qui prend comme entrée la différence ($T_{consigne} - T_{eau}$). L'utilisation d'un PID permet de compenser les phénomènes de retard et d'inertie.

Cette charge X permet ensuite de calculer la vitesse moyenne de la vis d'alimentation en bois. L'utilisateur implémente dans l'automate une vitesse moyenne maximale Ω_{max} correspondant à la puissance maximale de la chaudière en fonction du bois utilisé. Alors, la vitesse de fonctionnement de la vis d'alimentation Ω est déterminée par :

$$\Omega = X.\Omega_{max} \quad (\text{Eq. 3-18})$$

De même, le débit maximal d'air primaire $Q_{AP\ max}$ est implémenté par l'utilisateur et le débit d'air primaire Q_{AP} en fonctionnement est déterminé par :

$$Q_{AP} = X.Q_{AP\ max} \quad (\text{Eq. 3-19})$$

Ainsi, le besoin en chaleur impose un débit de bois et un débit d'air primaire, lequel débit d'air primaire est plus ou moins suffisant à l'obtention d'une bonne combustion.

3.1.3.3.2. Besoin en oxygène

Afin d'obtenir une bonne combustion, la plupart des chaudières sont équipées d'une sonde Lambda dont le but est de mesurer la teneur en oxygène dans les fumées. Cette mesure d'oxygène fait, là aussi, l'objet de comparaison avec une consigne implémentée par l'utilisateur. La différence entre mesure et consigne du taux d'oxygène sert à un second PID pour réguler le débit d'air secondaire.

Ainsi, le surplus d'air utile à l'obtention d'une bonne combustion est calculé à partir d'une mesure du taux d'oxygène dans les fumées et est injecté comme air secondaire.

3.1.3.3.3. Besoin en tirage

Afin d'éviter les fuites de fumées dans la chaufferie et surtout d'assurer le bon transit des gaz au sein de la chaudière, la plupart des chaudières sont équipées d'extracteur de fumées permettant d'assurer une dépression dans le foyer. Cet extracteur fait également l'objet d'une régulation basée sur une mesure de pression différentielle entre l'ambient et l'intérieur du foyer. Cette information sert à un troisième PID qui la compare à une consigne implémentée par l'utilisateur, en fonction de quoi la vitesse d'extraction des fumées est augmentée ou diminuée.

Ainsi, le tirage est régulé pour que la différence de pression entre l'ambient et le foyer soit maintenue constante, dans notre cas à 100Pa.

3.1.3.3.4. Besoin en bois

En ce qui concerne le désilage, celui-ci répond à la logique suivante. La vis d'alimentation du foyer prend le bois dans une petite trémie. Sur cette trémie est placé un capteur optique qui détermine si la trémie est pleine. Dès lors que le capteur optique ne voit plus de bois, l'automate commence un décompte du nombre de tours de la vis d'alimentation. Lorsque trois impulsions du contact ont été mesurées, les vis de désilage sont mises en fonctionnement pour remplir la trémie. Les vis de désilage sont arrêtées lorsque le capteur optique détecte du bois sans interruption depuis plus de trois secondes. Cette dernière condition sert à stabiliser le fonctionnement car la chute du bois s'effectue devant le capteur optique. Sans cette condition de temps, l'arrêt des vis de désilage s'effectuerait au premier morceau de bois passant devant la cellule et non quand la trémie est pleine.

3.2. Grandeurs mesurées

Ce paragraphe décrit les différents outils grâce auxquels nous avons obtenu les mesures nécessaires à notre étude. Ces outils sont des sondes et des capteurs qui mesurent un état physique comme, par exemple, la température d'un milieu. Les outils sont reliés à une centrale d'acquisition qui permet de collecter simultanément 129 valeurs de mesures toutes les 20 secondes. Cela représente plus de 23 millions de valeurs de mesures pour l'ensemble de notre étude. Par conséquent, nous avons développé une suite de logiciels permettant, outre l'acquisition, le stockage et le post traitement de ces informations afin d'en extraire des grandeurs déduites de mesures. Ces grandeurs déduites sont décrites au paragraphe suivant.

3.2.1. Matériel de mesure

3.2.1.1. Centrale d'acquisition

La quasi-totalité des mesures effectuées sur la chaudière (températures, vitesses d'air et de fumées, position des grilles, débit de poussières) sont enregistrées via une centrale d'acquisition. Chaque instrument de mesure est connecté à une clé qui lui est spécifique. La clé transforme le signal du capteur en un signal numérique interprétable par la centrale d'acquisition qui scrute en permanence les clés qui lui sont connectées à raison de 100 clés par seconde. La centrale collecte les valeurs pour les envoyer vers un ordinateur où elles sont stockées avant d'être analysées.

3.2.1.1.1. Mesures de températures

Les températures mesurées dans le foyer ont pour but de réaliser une cartographie du champ de températures des gaz au cours du temps. Placés dans le plan de symétrie de la chaudière ces mesures se décomposent de la façon suivante :

- 7 températures sont prises sur les éléments de grilles correspondant aux 7 rangées d'éléments ;
- 17 températures sont prises en phase gaz en deux rangées de huit températures plus une. Ces rangées sont placées à un tiers et deux tiers de la hauteur du foyer. Les neuf colonnes formées sont calées sur les extrémités des huit rangs d'éléments en béton formant la voûte du foyer ;
- 9 températures sont prises juste sous la voûte correspondant aux mêmes colonnes que précédemment ;
- 9 températures sont prises au dessus de la voûte à mi-hauteur de l'espace existant ;
- 3 températures sont prises en entrée, mi-parcours et sortie de l'échangeur.

La Figure 3-19 illustre la position des thermocouples de type K effectuant les mesures des 45 températures énoncées.

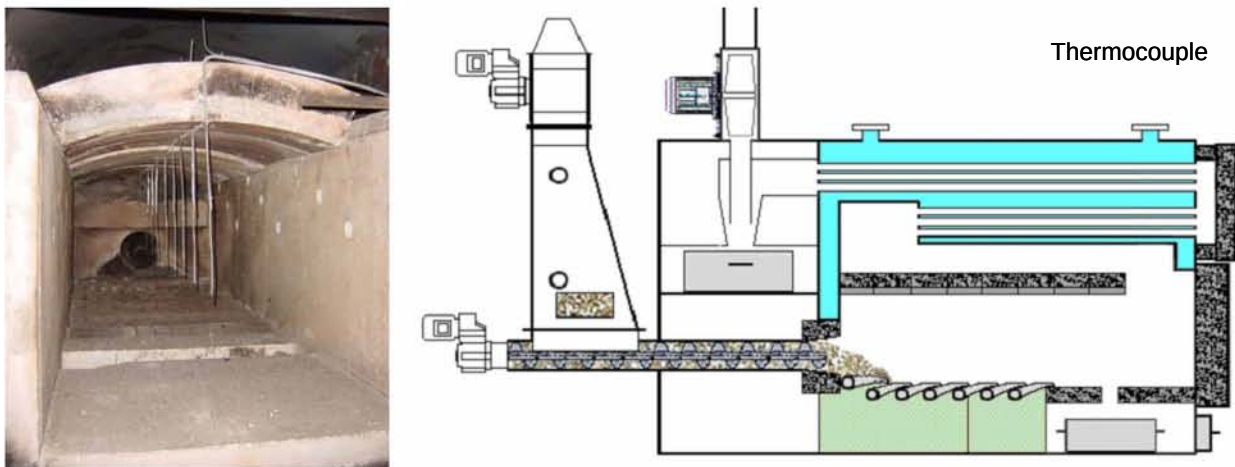


Figure 3-19 : Vue en coupe de l'implantation des points de mesure de température au sein de la chaudière.

Deux températures supplémentaires sont acquises par sondes thermorésistives de type PT100 sur le départ et le retour de l'eau circulant dans l'échangeur de chaleur.

Six températures supplémentaires sont acquises parallèlement aux cinq mesures de vitesses d'air comburant et à la mesure de vitesse des fumées afin d'exprimer les débits en Nm^3/h .

3.2.1.1.2. Mesures de vitesse des gaz

Afin d'obtenir une mesure des débits massiques de gaz circulant dans la chaudière, nous mesurons températures et vitesses des gaz dans des conduites de diamètre connu. Les phénomènes d'écoulement de gaz étant difficilement maîtrisables, nous avons choisi des diamètres de conduites permettant d'exploiter nos instruments de mesure de vitesse dans leur pleine échelle. Autrement dit, le diamètre de chaque conduite est choisi pour qu'au débit maximal la vitesse du gaz dans la conduite soit légèrement inférieure à la vitesse maximale mesurable par l'instrument. Ce choix permet également d'obtenir un écoulement à grand nombre de Reynolds, soit un écoulement turbulent dont les propriétés aérauliques permettent de considérer que la vitesse du gaz est identique quel que soit le point de mesure (écoulement piston).

Dans les cas de mesures du débit d'air comburant, nous avons opté pour des mesures par moulinets. Ceux-ci étant limités à 20m/s , nous les avons placés dans des conduites de 96mm de diamètre intérieur pour les airs primaires et de 73mm pour les airs secondaires.

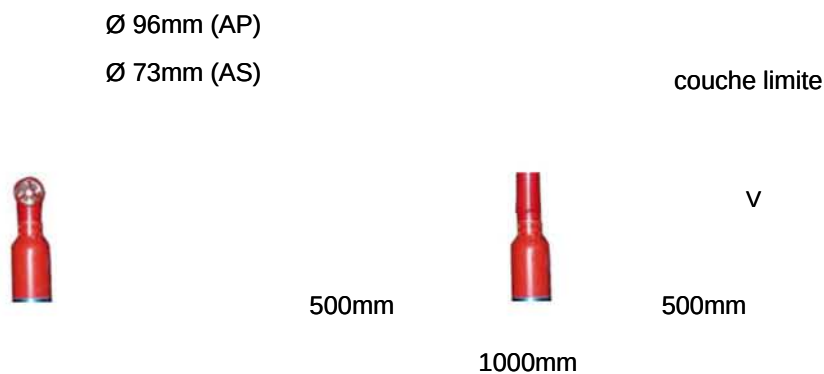


Figure 3-20 : Schéma d'implantation du moulinet au sein de la veine de mesure.

Concernant la mesure de débit des fumées, gaz chaud (150°C en moyenne, pouvant monter jusqu'à 250°C), humide et chargé de particules solides, nous avons opté pour un tube de Pitot et une sonde de pression différentielle corrigée en température. Mesurant une vitesse maximale de 40m/s , nous avons dû modifier la conduite de cheminée afin d'obtenir de telles vitesses maximales comme nous l'avons indiqué au paragraphe 3.1.2.8.

Une fois chaque veine de mesure mise en place, nous avons étalonné les appareils grâce à un compteur de gaz de ville à turbine, ce dernier étant étalonné par le centre de vérification des poids et mesures. Nous en avons déduit un coefficient correcteur propre à chaque moulinet dans sa mise en place. Le Tableau 3-1 récapitule les coefficients correcteurs pour chacune des veines d'air.

Veine de mesure	Corrections de débit	Diamètre des tubes	Surface corrigée
AP1	95,01%	96 mm	$68,8\text{ cm}^2$
AP2	93,09%	96 mm	$67,4\text{ cm}^2$
AS1	89,01%	73 mm	$37,3\text{ cm}^2$
AS2	90,04%	73 mm	$37,7\text{ cm}^2$
AS3	92,61%	73 mm	$38,8\text{ cm}^2$

Tableau 3-1 : Récapitulatif des corrections apportées aux mesures de débit d'air.

La mesure de débit de fumées est effectuée dans la veine de cheminée grâce à un tube de Pitot corrigé en température. L'étalonnage a révélé un décalage à l'origine si bien que la formule de correction doit inclure un second terme correcteur. La formulation du débit de fumées $Q_{\text{fumées, humides}}$ en fonction de la vitesse mesurée $v_{\text{mesurée}}$ s'exprime de la façon suivante :

$$Q_{\text{fumées}} = 0,9655 \cdot S_{\text{cheminée}} \cdot (v_{\text{mesurée}} + 0,135) \quad (\text{Eq. 3-20})$$

où : $S_{\text{cheminée}}$ est la surface réelle de la veine de cheminée dont le diamètre intérieur mesure 107mm, donc 89,92cm².

3.2.1.2. Analyseur de gaz

L'analyse des gaz de combustion est effectuée grâce à un analyseur de gaz portatif de type TESTO 350 XL muni de cellules électrochimiques. Cet appareil permet une mesure continue des concentrations en O₂, CO (H₂), NO, NO₂ et C_xH_y sur échantillon sec.

Le gaz est prélevé directement dans la cheminée où la température de l'échantillon est mesurée.

L'échantillon de gaz est d'abord séché grâce à un module à effet Peltier qui refroidit le gaz à une température entre 4 et 8°C. L'eau de condensation est pompée vers un réservoir.

L'échantillon de gaz est ensuite dépoussiéré dans un filtre, pour enfin être injecté dans les cellules de mesure. Les plages de mesure, les précisions obtenues et les temps de réaction de chacune des cellules de mesure sont précisés dans le Tableau 3-2.

Cellule	O ₂	CO	NO	NO ₂	C _x H _y
Unité	% vol.	ppm vol.	ppm vol.	ppm vol.	ppm vol.
Plage de mesure	0 - 25	0 - 10 000	0 - 3 000	0 - 500	0 - 5 000
Précision	± 0,8%	± 10 ppm	± 5%	± 5%	± 10 ppm
	de la mesure				
Temps de réaction à 90% de la valeur	20 s	40 s	30 s	40 s	40 s

Tableau 3-2 : Récapitulatif des capacités des cellules électrochimiques de l'analyseur de gaz.

L'appareil est régulièrement vérifié grâce à des gaz étalons. A chaque mise en route, l'appareil s'initialise automatiquement avec de l'air.

3.2.2. Outils logiciels

Trois instruments collectent les informations relatives aux mesures effectuées :

- la centrale d’acquisition qui regroupe toutes les mesures physiques ;
- l’analyseur de gaz ;
- l’automate de régulation de la chaudière.

Un logiciel développé spécifiquement se charge de la connexion des instruments, de la reconnaissance des voies de mesure et de l’implémentation à pas de temps fixé des informations de mesures dans un tableur. En pratique, ce sont 129 mesures qui, toutes les 20 secondes, sont collectées dans une unique feuille du tableur.

Le logiciel assez complexe a été développé par nos soins afin de répondre au mieux à nos besoins : collecte rapide et simultanée de l’ensemble des mesures, stockage simple dans un tableur pour faciliter le traitement et les calculs.

Une rapide explication est proposée dans ce paragraphe afin d’expliciter l’architecture et le fonctionnement du programme.

3.2.2.1. Paramétrages et connexions

Le mode de connexion est différent pour chaque appareil ce qui rend la simultanéité des acquisitions difficile et explique en partie la logique de programmation.

3.2.2.1.1. Choix offerts

Le logiciel permet de gérer jusqu’à quatre ports séries (RS232). Sur chacun de ces ports peut être connecté :

- soit un boîtier Testo 350 de type M ou XL (analyseur de gaz) ;
- soit un boîtier Testo 454 (boîtier de mesure courant) ;
- soit un automate Télémécanique (automate de régulation de la chaudière) ;
- soit une centrale d’acquisition Ahlborn ;
- soit enfin rester libre.

Ainsi, le logiciel permettrait, par exemple, l’acquisition simultanée de quatre analyseurs de gaz identiques. Ce cas extrême ne s’est jamais présenté, mais en revanche nous avons pu vérifier la simultanéité des réponses des deux analyseurs de gaz Testo 350 XL dont nous disposons et ce afin de valider leur bon fonctionnement mutuel.



Figure 3-21 : Vue de l'interface graphique du logiciel d'acquisition.

L’interface du logiciel (Figure 3-21) intègre le choix du nom et l’emplacement du fichier de résultats ainsi que la périodicité des mesures. En pratique, le délai de réponse global des différents instruments ne permet pas d’obtenir un fonctionnement stable du logiciel dès lors que l’on demande une période d’acquisition

inférieure à 10 secondes. Si l'on souhaite réduire ce délai, il faut alléger le fonctionnement du logiciel en distribuant les appareils sur plusieurs ordinateurs qui gèrent chacun un seul port de communication série. Il est alors possible d'obtenir une période de deux secondes sur la connexion au Testo 350 XL, une période de cinq secondes pour la connexion à l'automate Télémécanique, et difficilement moins de huit secondes pour la centrale d'acquisition Ahlborn.

3.2.2.1.2. Testo 350 XL

La connexion au Testo s'effectue grâce à une bibliothèque d'instructions complète permettant d'obtenir l'intitulé de la mesure, sa valeur instantanée, sa valeur moyennée sur un temps défini, etc. Les résultats obtenus sont directement convertis en des valeurs exploitables et certifiées. Cette bibliothèque d'instructions consiste en un code de programmation optimisé, et c'est pourquoi nous pouvons solliciter l'acquisition sur le Testo au-delà des autres connexions.

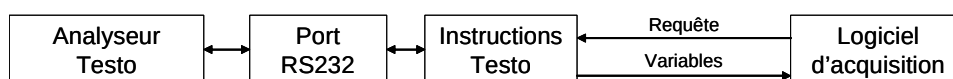


Figure 3-22 : Schéma de connexion à l'analyseur de gaz Testo.

3.2.2.1.3. Automate Télémécanique

La connexion à l'automate Télémécanique réside dans une bibliothèque d'instructions succincte qui nous permet d'obtenir un fichier formaté comprenant les valeurs courantes d'un ensemble de variables de l'automate. Autrement dit, nous avons en partie détourné l'usage de l'automate en le programmant pour qu'il stocke dans certaines de ses variables les valeurs courantes d'entrée, de sortie et de compteurs. Une interface que nous avons développée parallèlement attribue au numéro de variable de l'automate un nom distinct. A la connexion avec l'automate, le logiciel va ouvrir un fichier de données renfermant l'éventail de numéros de variables à lire ainsi que leur nom respectif. L'acquisition des informations de l'automate consiste à envoyer l'instruction de création du fichier de résultats des valeurs courantes des variables. Le fichier créé est alors ouvert et le texte contenu interprété afin de transformer les chaînes de caractères en plusieurs informations chiffrées correspondantes.

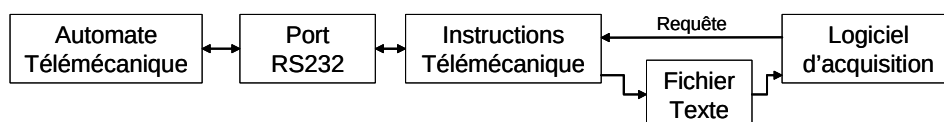


Figure 3-23 : Schéma de connexion à l'automate Télémécanique.

3.2.2.1.4. Centrale d'acquisition Ahlborn

La connexion à la centrale d'acquisition est aisée car elle consiste en un dialogue direct avec l'instrument via le port série. Les instructions de requêtes sont de format texte, tout comme les réponses que l'on obtient. La difficulté de traitement consiste alors à interpréter la réponse de l'appareil car elle est sujette à de nombreuses perturbations de communication. Il faut alors *nettoyer* la chaîne de caractères recueillie afin de n'obtenir que les informations numériques utiles. Ce traitement est long et coûteux en temps processeur, d'où la limitation de la fréquence d'acquisition.

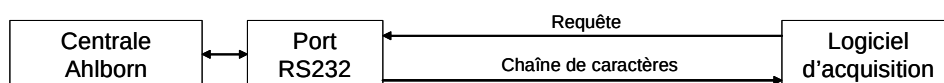


Figure 3-24 : Schéma de connexion à la centrale d'acquisition Ahlborn.

3.2.2.2. Transit des informations

L'action d'acquisition des informations est régie par une horloge qui se déclenche selon un intervalle de temps correspondant à celui imposé par l'utilisateur.

Les informations obtenues des instruments de mesure sont importées au travers des ports séries. Le logiciel interprète les informations obtenues afin de les formater et les stocke dans des variables.

Une seconde horloge, d'exécution rapide, est mise en route par la première horloge. Le but de cette seconde horloge est d'interroger des variables d'état de l'exécution de chacune des procédures de lecture. Une fois l'ensemble des lectures effectuées, cette horloge effectue l'écriture des variables dans la feuille du tableur et s'arrête jusqu'à ce que la première horloge la déclenche de nouveau.

La Figure 3-25 synthétise la procédure de transit des informations.

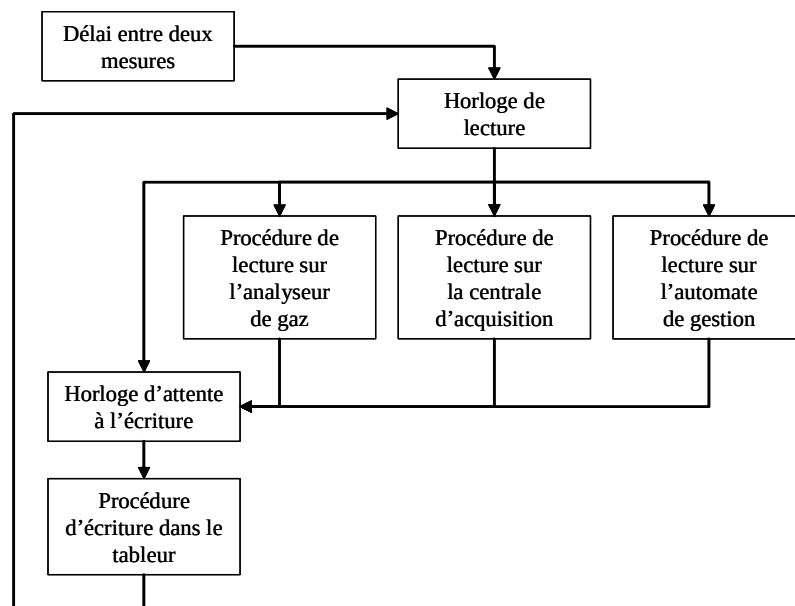


Figure 3-25 : Schéma de synthèse de la procédure de transit des informations.

La méthode de transit des informations venant d'être décrite permet d'obtenir une très bonne synchronisation des mesures effectuées bien que de provenances diverses :

- la lecture sur chacun des appareils connectés est lancée simultanément sur tous ;
- l'écriture n'est effectuée que lorsque tous les appareils ont répondu ;
- l'heure prise en compte est celle de l'écriture des données dans la feuille du tableur.

Le second point n'est pas sans poser de problèmes car toute interruption de dialogue entre l'ordinateur et un seul des appareils de mesure bloque l'ensemble de l'acquisition des mesures. Néanmoins, la qualité des connexions a permis de limiter les pertes de données à quelques cas isolés sur approximativement 1000 heures de fonctionnement.

3.2.2.3. Liaison des mesures aux calculs

Le logiciel d'acquisition des mesures génère une feuille du tableur Excel dont les cellules renferment, par colonne, les grandeurs mesurées sur chaque instrument de chaque appareil. Le mode de connexion et de reconnaissance des voies étant dynamique, ce tableau de résultats peut contenir (ou pas) n'importe quelle mesure dans n'importe quelle colonne pendant n'importe quelle durée. La première opération consiste donc à repérer les grandeurs mesurées grâce à un tableau de pointeurs.

		ALMEMO	ALMEMO	ALMEMO	ALMEMO	ALMEMO	ALMEMO	ALMEMO	ALMEMO
Mesure n°	Date & Heure	AS1 v	AS1 T	AP2 v	AP2 T	AS2 v	AS2 T	AP1 v	AP1 T
1	22 juin 04 16:44:11	1,83 m/s	35,7 °C	4,26 m/s	31,6 °C	0,00 m/s	36,7 °C	4,48 m/s	30,9 °C
2	22 juin 04 16:44:31	1,85 m/s	36,3 °C	4,53 m/s	30,9 °C	0,00 m/s	36,7 °C	4,92 m/s	30,9 °C
3	22 juin 04 16:44:51	1,78 m/s	35,8 °C	4,13 m/s	30,9 °C	0,00 m/s	37,4 °C	4,65 m/s	30,8 °C
4	22 juin 04 16:45:11	1,71 m/s	36,1 °C	3,78 m/s	31,5 °C	0,00 m/s	37,1 °C	4,70 m/s	31,2 °C
5	22 juin 04 16:45:31	1,81 m/s	35,9 °C	4,17 m/s	31,6 °C	0,00 m/s	36,8 °C	4,96 m/s	31,0 °C

Tableau 3-3 : Exemple d'un tableau d'acquisition des mesures.

Le Tableau 3-3 donne un exemple de tableau de résultats d'acquisition. On y voit les colonnes de valeurs de vitesses et de températures mesurées dans les veines d'airs primaires et secondaires se succédant sans ordre logique. Le tableau de pointeurs a pour but d'indiquer aux colonnes de calculs que, selon cet exemple, l'information de vitesses mesurées dans la veine d'air primaire n°2 se situe dans la 5^{ème} colonne du tableau d'acquisition des mesures.

3.2.2.3.1. Informations communes à tout essai

Certaines informations sont communes à tous les essais. Ainsi, la calibration des mesures de vitesse d'air et de fumées obtenue grâce à l'étalonnage figurent en clair dans le classeur Excel et sont prises en compte automatiquement dans les calculs. Parmi ces informations, figurent aussi les coefficients de régression linéaire en fonction de la température de la capacité calorifique des gaz. Le Tableau 3-4 renseigne sur les coefficients de régression linéaire.

Variations des Cp des gaz		
$C_p = a.T + b$	a	b
Cp CO ₂	0,0007905	1,6370
Cp H ₂ O	0,0001937	1,4850
Cp N ₂	0,0005739	1,2970
Cp O ₂	0,0001818	1,3040
Cp CO	0,0000837	1,2980
Cp Air	0,0004923	1,2985

Tableau 3-4 : Tableau de facteurs de régression de la capacité calorifique des gaz en kJ/(Nm³.K) en fonction de la température exprimée en °C.

L'écriture déplacée de ces constantes permet de clarifier et d'alléger les formules de calculs. L'ensemble de ces informations a été implémenté une fois pour toutes et sert à tous les calculs effectués.

3.2.2.3.2. Informations propres à l'essai

Pour chaque essai de combustion, nous évaluons le débit massique anhydre de combustible, son humidité et sa masse volumique anhydre. De plus, nous calculons la vitesse moyenne de rotation de la vis d'alimentation en bois. Ces informations propres à chaque essai sont implémentées manuellement aux côtés des constantes précédemment évoquées.

3.3. Grandeurs calculées

Déduire des grandeurs par calcul à partir de grandeurs mesurées fait toujours appel à des principes théoriques. Ce paragraphe a pour but d'exprimer l'ensemble des grandeurs calculées que nous utilisons. Logiquement, ce paragraphe est composé tout d'abord de la définition de certaines grandeurs caractéristiques de la combustion, puis des relations liant les grandeurs entre elles, enfin d'exprimer simplement les grandeurs calculées en fonction des grandeurs mesurées.

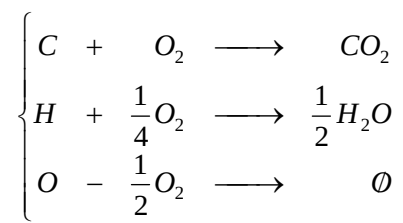
3.3.1. Définitions des grandeurs courantes

Dans ce paragraphe, le raisonnement est basé sur un combustible anhydre de formule chimique $CH_{1,44}O_{0,66}$. Sa masse molaire M_{comb} est de 24 g/mol.

3.3.1.1. Combustion neutre

C'est la combustion théorique qui, grâce à un apport d'air stoechiométrique, transforme tout le combustible en gaz (CO_2 , H_2O) sans qu'il ne subsiste ni d'oxygène (O_2) ni d'imbrûlés (C_xH_y) [15].

Les réactions sur chaque élément sont les suivantes :



En considérant un combustible de formule chimique $CH_{1,44}O_{0,66}$, on peut réécrire ces équations de la manière suivante afin de visualiser le bilan matière de la combustion neutre :

1	C	+	O_2	$\longrightarrow$	CO_2
1,44	H	+	$\frac{1}{4}O_2$	$\longrightarrow$	$\frac{1}{2}H_2O$
0,66	O	-	$\frac{1}{2}O_2$	$\longrightarrow$	$\emptyset$
1	$CH_{1,44}O_{0,66} + 1,03.O_2 \longrightarrow CO_2 + 0,72.H_2O$				

Tableau 3-5 : Récapitulatif de la combustion neutre.

Par conséquent, pour la combustion neutre d'une mole de combustible, il faut 1,03 moles d'oxygène moléculaire afin d'obtenir une mole de fumées sèches et 0,72 mole d'eau.

3.3.1.2. Pouvoir comburivore

C'est la quantité d'air nécessaire et suffisante à la combustion neutre d'une unité de masse de combustible [15]. En respectant le système international, le pouvoir comburivore doit être exprimé en Nm^3 par kg de combustible anhydre.

Grâce au Tableau 3-5, on peut déterminer directement que le rapport molaire oxygène sur combustible utile à la combustion neutre d'une mole de bois, soit 1,03. On en déduit le pouvoir comburivore qui s'exprime par la formule suivante :

$$V_a = \frac{1,03}{24} \cdot \frac{22,4}{0,208} \quad (\text{Eq. 3-21})$$

$$\Rightarrow V_a = 4,62 \text{ Nm}^3 / \text{kg}_{\text{anhydre}} \quad (\text{Eq. 3-22})$$

où : V_a est le pouvoir comburivore en Nm^3 par kg de combustible anhydre ;

24 est la masse molaire du combustible en g/mol ;

1,03 est le rapport molaire dioxygène consommé sur combustible ;

22,4 est le volume molaire des gaz parfaits dans les conditions normales de pression et de température en l/mol ;

0,208 est le rapport molaire de l'oxygène moléculaire présent dans l'air.

3.3.1.3. Facteur d'air

Le facteur d'air est le rapport de la quantité d'air fourni sur la quantité d'air stœchiométrique (pouvoir comburivore). Il s'exprime donc par la formule suivante :

$$f = \frac{\bar{Q}_{AT}}{V_a} \quad (\text{Eq. 3-23})$$

où : f est le facteur d'air ;

$\bar{Q}_{AT}$ est la quantité d'air fourni en Nm^3 par kg de combustible anhydre ;

V_a est le pouvoir comburivore en Nm^3 par kg de combustible anhydre.

Nota : Au facteur d'air f est associé l'excès d'air, noté e et défini comme étant le taux d'air fourni en excès (ou en défaut) à la combustion. Littéralement :

$$e = f - 1 = \frac{\bar{Q}_{AT} - V_a}{V_a} \quad (\text{Eq. 3-24})$$

3.3.1.4. Répartition de l'air comburant

L'air comburant, en pratique, n'est pas introduit dans la zone de combustion en un seul point. Cet air est injecté en partie sous le lit de combustible solide, il est alors nommé air primaire. La seconde partie de l'air est injectée au dessus du lit combustible, exactement dans la zone de combustion vive. Cet air est nommé air secondaire. La somme de l'air primaire et de l'air secondaire est appelé air total.

La répartition de l'air total est un paramètre important de la combustion. On peut l'évaluer en exprimant des facteurs d'air spécifiques à chacun de ces flux d'air.

$$\left. \begin{aligned} f_{AP} &= \frac{\bar{Q}_{AP}}{V_a} \\ f_{AS} &= \frac{\bar{Q}_{AS}}{V_a} \end{aligned} \right\} \Rightarrow f = f_{AT} = f_{AP} + f_{AS} \quad (\text{Eq. 3-25})$$

où : V_a est le pouvoir comburivore en Nm^3 par kg de combustible anhydre ;

f_{AP} est le facteur d'air primaire ;

$\bar{Q}_{AP}$ est le débit d'air primaire en Nm^3 par kg de combustible anhydre ;

f_{AS} est le facteur d'air secondaire ;

$\bar{Q}_{AS}$ est le débit d'air secondaire en Nm^3 par kg de combustible anhydre ;

f_{AT} est le facteur d'air total.

3.3.1.5. Pouvoir fumigène

C'est la quantité de fumées produite par la combustion neutre d'une unité de masse de combustible [15]. Selon que l'eau contenue dans les fumées est restée à l'état de vapeur ou est condensée, on distingue le pouvoir fumigène humide (noté V_f) et le pouvoir fumigène sec (V'_f). Comme le pouvoir comburivore, le pouvoir fumigène doit être exprimé en Nm^3 par kg de combustible anhydre.

En visualisant le Tableau 3-5, on peut déterminer directement que le rapport molaire dioxyde de carbone sur combustible émis par la combustion neutre d'une mole de bois, soit 1. Le rapport molaire eau sur combustible émis par la combustion neutre d'une mole de bois, soit 0,72. De plus l'azote de l'air comburant que l'on retrouve dans les fumées est lié au pouvoir comburivore. Le rapport molaire diazote sur combustible présent dans les fumées lors de la combustion neutre d'une mole de bois est $\left(1,03 \cdot \frac{0,792}{0,208}\right)$.

On en déduit le pouvoir fumigène sec qui s'exprime par la formule suivante :

$$V'_f = \frac{22,4}{24} \cdot \left(1 + 1,03 \cdot \frac{0,792}{0,208}\right) = \frac{22,4}{24} + 0,792 \cdot V_a \quad (\text{Eq. 3-26})$$

$$\Rightarrow V'_f = 4,59 Nm^3 / kg_{anhydre} \quad (\text{Eq. 3-27})$$

On en déduit le pouvoir fumigène humide qui s'exprime par la formule suivante :

$$V_f = \frac{22,4}{24} \cdot \left(1 + 0,72 + 1,03 \cdot \frac{0,792}{0,208}\right) = \frac{22,4}{24} \cdot (1 + 0,72) + 0,792 \cdot V_a \quad (\text{Eq. 3-28})$$

$$\Rightarrow V_f = 5,27 Nm^3 / kg_{anhydre} \quad (\text{Eq. 3-29})$$

où : V'_f est le pouvoir fumigène sec en Nm^3 par kg de combustible anhydre ;

V_f est le pouvoir fumigène humide en Nm^3 par kg de combustible anhydre ;

24 est la masse molaire du combustible en g/mol ;

1 est le rapport molaire fumées sèches produites sur combustible ;

1,03 est le rapport molaire dioxygène consommé sur combustible ;

0,72 est le rapport molaire eau produite sur combustible ;

22,4 est le volume molaire des gaz parfaits dans les conditions normales de pression et de température en l/mol ;

0,792 est le rapport molaire d'azote moléculaire présent dans l'air ;

0,208 est le rapport molaire de l'oxygène moléculaire présent dans l'air.

3.3.1.6. Rendements

Le rendement est une notion générale. Il est associé à deux autres notions que sont l'efficacité et la perte. Le rendement est très souvent symbolisé par la lettre grecque η et défini comme étant un rapport entre ce que l'on obtient sur ce que l'on souhaiterait obtenir. Autrement dit, le rendement idéal est égal à 1 ou 100% mais en réalité celui-ci est inférieur à 1, la différence entre le rendement idéal et le rendement réel est alors une perte.

De cette première approche du rendement, on peut facilement comprendre que la notion de rendement est applicable à tout processus de transformation.

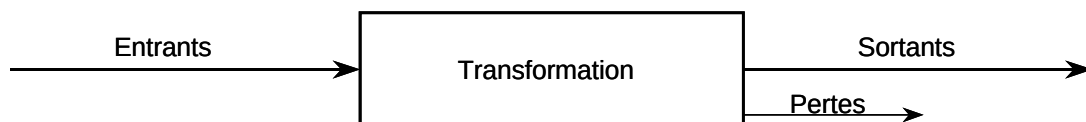


Figure 3-26 : Schématisation de la transformation permettant de calculer un rendement.

Alors le rendement est défini par la formule générale suivante :

$$\eta = \frac{\text{Valeur des sortants}}{\text{Valeur des entrants}} \quad (\text{Eq. 3-30})$$

Afin de définir un rendement précis il reste donc à considérer :

- le processus de transformation que l'on cherche à qualifier ;
- la valeur commune aux produits entrant et sortant de ce processus.

3.3.1.6.1. Rendement global de chaufferie

On peut alors aisément comprendre, dans le cas précis d'une chaufferie, qu'un rendement global peut être défini en considérant que la transformation opérée est une transformation d'ordre énergétique. On considèrera alors comme valeur commune l'énergie potentielle des produits entrants (PCI) et l'énergie thermique des produits sortant (chaleur utilisable produite par l'installation). On a alors :

$$\eta_{\text{global}} = \frac{\text{chaleur produite par kg de combustible humide}}{\text{PCI du combustible}} \quad (\text{Eq. 3-31})$$

En pratique, une chaufferie bois a un rendement global de l'ordre de 85%.

3.3.1.6.2. Autres rendements

Notons enfin que de nombreux rendements peuvent être définis en fonction de la partie que l'on étudie en particulier. Pourront alors être définis :

- le rendement de combustion où les pertes considérées sont les pertes énergétiques par les émissions de produits imbrûlés ;

- le rendement d'échangeur qui définit la capacité de l'échangeur à transmettre l'énergie des fumées chaudes à l'eau du réseau.

3.3.2. Relations théoriques entre les grandeurs

A partir du débit d'air comburant $\bar{Q}_{total}$, du taux d'oxygène X_{O_2} et du taux de monoxyde de carbone X_{CO} mesuré dans les fumées, il est possible de calculer le débit de bois anhydre $m_{bois.anhydre}$ et le débit de fumées sèches $\bar{Q}_{fumées.sèches}$ correspondant. Ensuite, connaissant l'humidité sur brut H_b du bois utilisé, le débit de fumées humides $\bar{Q}_{fumées.humides}$ peut être déterminé.

Avant toute chose, nous poserons les hypothèses utiles à notre raisonnement. Après, chacune des grandeurs sera convertie dans la quantité de matière correspondante. Enfin, la conservation des flux de matière nous permettra de déduire les liens entre les grandeurs.

3.3.2.1. Hypothèses

- L'air comburant est exempt de dioxyde de carbone, de monoxyde de carbone et d'eau. Celui-ci se compose donc à 20,8% d'oxygène et à 79,2% d'azote moléculaire.
- L'azote moléculaire ne réagit pas dans le foyer si bien que tout ce qui rentre avec l'air comburant ressort dans les fumées.
- Le bois anhydre est de composition élémentaire $CH_{1,44}O_{0,66}$.
- La combustion du bois dans le foyer le transforme complètement en dioxyde et monoxyde de carbone et en eau. Les réactions de combustion consomment de l'oxygène apporté par l'air comburant.
- Le taux d'humidité sur brut du bois est connu et noté H_b . L'eau ainsi apportée dans le foyer ressort en intégralité dans les fumées.
- Les minéraux contenus dans le bois sont négligés dans les bilans matières.

3.3.2.2. Changements d'unités

Afin de simplifier le raisonnement, qui se fera sur une quantité de matière exprimée en moles plutôt qu'en mètre-cubes ou en kilogrammes, nous commençons par noter les expressions de conversion adéquates.

3.3.2.2.1. Conversion des gaz

A un volume de gaz $\bar{Q}$ exprimé en Nm^3 correspond une quantité de matière q exprimée en moles :

$$q = \frac{1}{0,0224} \bar{Q} \quad (\text{Eq. 3-32})$$

3.3.2.2.2. Conversion du bois

A une masse $m_{bois.humide}$ exprimée en kg de bois humide d'humidité sur brut H_b connue correspondent une masse $m_{bois.anhydre}$ de bois anhydre et une masse m_{eau} d'eau :

$$m_{bois.anhydre} = (1 - H_b) m_{bois.humide} \quad (\text{Eq. 3-33})$$

$$m_{eau} = H_b m_{bois.humide} \quad (\text{Eq. 3-34})$$

A une masse $m_{\text{bois.anhydre}}$ de bois anhydre exprimée en kg correspond une quantité de bois q_{bois} exprimée en moles :

$$q_{\text{bois}} = \frac{1}{0,024} \cdot m_{\text{bois.anhydre}} \quad (\text{Eq. 3-35})$$

A une masse m_{eau} d'eau exprimée en kg correspond une quantité d'eau $q_{\text{H}_2\text{O}}$ exprimée en moles :

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1}{0,018} \cdot m_{\text{eau}} \quad (\text{Eq. 3-36})$$

3.3.2.3. Description des flux

Air, fumées humides ou sèches, bois anhydre, tous ces éléments sont une description globale des grandeurs physiques mises en œuvre dans le foyer. Néanmoins, toutes ces grandeurs sont composées d'éléments chimiques dans des proportions connues ou mesurables.

3.3.2.3.1. Description de l'air

La quantité d'air q_{air} se compose d'une quantité d'azote q_{N_2} et d'une quantité d'oxygène q_{O_2} selon des proportions connues telles que :

$$\left. \begin{array}{l} q_{\text{N}_2} = 0,792 \cdot q_{\text{air}} \\ q_{\text{O}_2} = 0,208 \cdot q_{\text{air}} \end{array} \right\} \Rightarrow q_{\text{N}_2} + q_{\text{O}_2} = q_{\text{air}} \quad (\text{Eq. 3-37})$$

Afin de distinguer la quantité d'oxygène entrant dans le foyer de celle sortant par les fumées, on note d'un indice i la quantité d'oxygène présente dans l'air, si bien que :

$$q_{\text{O}_2}^i = q_{\text{air}} - q_{\text{N}_2} = 0,208 \cdot q_{\text{air}} \quad (\text{Eq. 3-38})$$

L'oxygène excédentaire qui est ensuite présent dans les fumées est noté d'un indice o , soit $q_{\text{O}_2}^o$.

3.3.2.3.2. Description des fumées

Les fumées sont composées d'azote et d'oxygène provenant de l'air, d'eau provenant de l'humidité du bois et de l'oxydation de l'hydrogène constitutif du bois, enfin de dioxyde et monoxyde de carbone provenant de la combustion du bois. On distinguera alors les fumées que l'on nomme fumées humides des fumées sèches.

La quantité $q_{\text{fumées.humides}}$ de fumées humides est liée à la quantité de fumées sèches $q_{\text{fumées.sèches}}$ par l'expression de la quantité d'eau $q_{\text{H}_2\text{O}}$ présente dans les fumées :

$$q_{\text{fumées.humides}} = q_{\text{fumées.sèches}} + q_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{Eq. 3-39})$$

Comme décrite plus haut, la quantité d'eau q_{H_2O} présente dans les fumées provient de deux origines distinctes : l'une que l'on note $q_{H_2O}^h$ représente l'eau contenue dans le bois sous forme d'humidité, l'autre que l'on note $q_{H_2O}^c$ est produite par la combustion de l'hydrogène contenu dans le bois. On a la relation :

$$q_{H_2O} = q_{H_2O}^h + q_{H_2O}^c \quad (\text{Eq. 3-40})$$

La quantité de fumées sèches est liée à la quantité d'azote q_{N_2} , de dioxyde de carbone q_{CO_2} , de monoxyde de carbone q_{CO} et d'oxygène excédentaire $q_{O_2}^o$ par la relation :

$$q_{\text{fumées.sèches}} = q_{N_2} + q_{CO_2} + q_{CO} + q_{O_2}^o \quad (\text{Eq. 3-41})$$

Notre analyseur de gaz mesure les taux d'oxygène X_{O_2} et taux de monoxyde de carbone X_{CO} sur un échantillon de gaz sec, ce en quoi nous distinguons les fumées sèches des fumées humides.

Ainsi, les résultats de mesure équivalent aux expressions suivantes :

$$X_{O_2} = \frac{q_{O_2}^o}{q_{\text{fumées.sèches}}} \Leftrightarrow q_{O_2}^o = X_{O_2} \cdot q_{\text{fumées.sèches}} \quad (\text{Eq. 3-42})$$

$$X_{CO} = \frac{q_{CO}}{q_{\text{fumées.sèches}}} \Leftrightarrow q_{CO} = X_{CO} \cdot q_{\text{fumées.sèches}} \quad (\text{Eq. 3-43})$$

3.3.2.3.3. Description du bois

Le lien entre la quantité d'eau issue de l'humidité du bois $q_{H_2O}^h$ et la quantité de bois anhydre q_{bois} se déduit directement des expressions de conversion données ci-avant selon la relation suivante qui fait intervenir l'humidité sur brut H_b :

$$q_{H_2O}^h = \frac{H_b}{1 - H_b} \cdot \frac{24}{18} \cdot q_{\text{bois}} \quad (\text{Eq. 3-44})$$

Une quantité q_{bois} de bois anhydre, de formule chimique $CH_{1,44}O_{0,66}$, est composée des quantités de carbone q_C , d'hydrogène q_H et d'oxygène q_O si bien que sont respectées les relations suivantes :

$$q_{\text{bois}} \cdot CH_{1,44}O_{0,66} \Rightarrow \begin{cases} q_C = & q_{\text{bois}} \\ q_H = & 1,44 \cdot q_{\text{bois}} \\ q_O = & 0,66 \cdot q_{\text{bois}} \end{cases} \quad (\text{Eq. 3-45})$$

3.3.2.3.4. Description de la combustion

La combustion considérée ici est une combustion incomplète car génératrice de monoxyde de carbone. Ainsi, le carbone du bois se transforme en dioxyde et en monoxyde de carbone. L'hydrogène du bois se transforme en eau. L'oxygène du bois supplée à l'oxygène de l'air pour oxyder carbone et hydrogène.

Une quantité q_{bois} de bois anhydre génère une quantité q_C de carbone s'oxydant en une quantité q_{CO_2} de dioxyde de carbone et q_{CO} de monoxyde de carbone consommant une quantité $q_{O_2,C}^c$ d'oxygène. Ces quantités sont liées par les relations :

$$\left. \begin{array}{l} q_C = q_{bois} \\ q_{CO_2} + q_{CO} = q_C \\ q_{O_2,CO_2}^c = q_{CO_2} \\ q_{O_2,CO}^c = \frac{1}{2} q_{CO} \\ q_{O_2,C}^c = q_{O_2,CO_2}^c + q_{O_2,CO}^c \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} q_{O_2,C}^c = q_{bois} - \frac{1}{2} q_{CO} \\ q_{CO_2} + q_{CO} = q_{bois} \end{array} \right. \quad (\text{Eq. 3-46})$$

Une quantité q_{bois} de bois anhydre génère une quantité q_H d'hydrogène s'oxydant en une quantité $q_{H_2O}^c$ d'eau consommant une quantité $q_{O_2,H}^c$ d'oxygène. Ces quantités sont liées par les relations :

$$\left. \begin{array}{l} q_H = 1,44 \cdot q_{bois} \\ q_{H_2O}^c = \frac{1}{2} \cdot q_H \\ q_{O_2,H}^c = \frac{1}{2} \cdot q_{H_2O}^c \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} q_{O_2,H}^c = \frac{1,44}{4} \cdot q_{bois} \\ q_{H_2O}^c = \frac{1,44}{2} \cdot q_{bois} \end{array} \right. \quad (\text{Eq. 3-47})$$

Une quantité q_{bois} de bois anhydre génère une quantité q_O d'oxygène suppléant à une quantité $q_{O_2,O}^c$ d'oxygène. Ces quantités sont liées par les relations :

$$\left. \begin{array}{l} q_O = 0,66 \cdot q_{bois} \\ q_{O_2,O}^c = -\frac{1}{2} \cdot q_O \end{array} \right\} \Rightarrow q_{O_2,O}^c = -\frac{0,66}{2} \cdot q_{bois} \quad (\text{Eq. 3-48})$$

3.3.2.4. Conservation des flux de matière

La Figure 3-27 résume les flux molaires entrants et sortants du foyer.

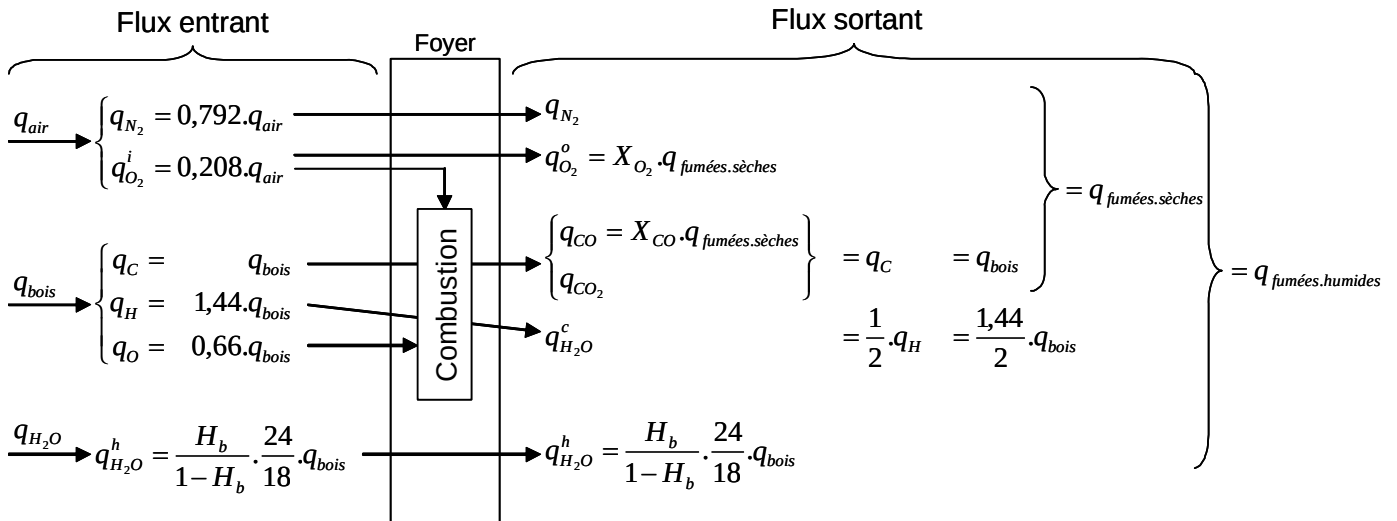


Figure 3-27 : Schématisation des flux molaires dans le foyer.

3.3.2.4.1. Bilan sur l'oxygène

Le bilan sur l'oxygène entrant avec l'air $q_{O_2}^i$ et sortant dans les fumées $q_{O_2}^o$ permet de faire apparaître la quantité $q_{O_2}^c$ d'oxygène consommé par les réactions de combustion selon la relation de conservation de l'oxygène suivante :

$$q_{O_2}^i = q_{O_2}^o + q_{O_2}^c \quad (\text{Eq. 3-49})$$

L'oxygène consommé par les réactions de combustion est lié par la relation suivante :

$$q_{O_2}^c = q_{O_2,C}^c + q_{O_2,H}^c + q_{O_2,O}^c \quad (\text{Eq. 3-50})$$

En identifiant chacune des composantes de cette équation avec les équations de description de la combustion du paragraphe 3.3.2.3.4, on obtient le bilan suivant :

$$\left. \begin{aligned} q_{O_2,C}^c &= q_{bois} - \frac{1}{2} \cdot q_{CO} \\ q_{O_2,H}^c &= \frac{1,44}{4} \cdot q_{bois} \\ q_{O_2,O}^c &= -\frac{0,66}{2} \cdot q_{bois} \end{aligned} \right\} \Rightarrow q_{O_2}^c = 1,03 \cdot q_{bois} - \frac{1}{2} \cdot q_{CO} \quad (\text{Eq. 3-51})$$

Ceci permet d'obtenir une expression de la quantité $q_{O_2}^o$ d'oxygène sortant dans les fumées :

$$\begin{aligned}
 q_{O_2}^o &= q_{O_2}^i - q_{O_2}^c \\
 &= 0,208.q_{air} - \left(1,03.q_{bois} - \frac{1}{2}q_{CO} \right)
 \end{aligned}
 \quad (\text{Eq. 3-52})$$

Rappelons ici l'expression de la mesure de la quantité $q_{O_2}^o$ d'oxygène sortant dans les fumées :

$$q_{O_2}^o = X_{O_2} \cdot q_{\text{fumées.sèches}} \quad (\text{Eq. 3-53})$$

3.3.2.4.2. Bilan sur les fumées sèches

Reprenons l'expression de la quantité de fumées sèches $q_{\text{fumées.sèches}}$ énoncée au paragraphe 3.3.2.3.2 :

$$q_{\text{fumées.sèches}} = q_{N_2} + q_{CO_2} + q_{CO} + q_{O_2}^o \quad (\text{Eq. 3-54})$$

Si l'on identifie chacun des termes de cette expression, on obtient une expression de la quantité de fumées sèches $q_{\text{fumées.sèches}}$:

$$\begin{aligned}
 q_{\text{fumées.sèches}} &= q_{N_2} + q_{CO_2} + q_{CO} + q_{O_2}^o \\
 &= 0,792.q_{air} + q_{bois} + X_{O_2} \cdot q_{\text{fumées.sèches}}
 \end{aligned}
 \quad (\text{Eq. 3-55})$$

$$\Rightarrow q_{\text{fumées.sèches}} = \frac{1}{1 - X_{O_2}} \cdot (0,792.q_{air} + q_{bois})$$

Si l'on reprend l'expression de la mesure de la quantité $q_{O_2}^o$ d'oxygène sortant dans les fumées, on obtient une seconde relation exprimant la quantité de fumées sèches en fonction de la quantité d'air q_{air} et de la quantité de bois anhydre q_{bois} faisant intervenir les mesures en taux d'oxygène X_{O_2} et en taux de monoxyde de carbone X_{CO} :

$$\begin{aligned}
 q_{O_2}^o &= X_{O_2} \cdot q_{\text{fumées.sèches}} \\
 &= q_{O_2}^i - q_{O_2}^c \\
 &= 0,208.q_{air} - \left(1,03.q_{bois} - \frac{1}{2} \cdot X_{CO} \cdot q_{\text{fumées.sèches}} \right)
 \end{aligned}
 \quad (\text{Eq. 3-56})$$

$$\Rightarrow q_{\text{fumées.sèches}} = \frac{1}{X_{O_2} - \frac{1}{2} \cdot X_{CO}} \cdot (0,208.q_{air} - 1,03.q_{bois})$$

3.3.2.4.3. Bilan sur les fumées humides

La quantité de fumées humides $q_{\text{fumées.humides}}$ se déduit des quantités de fumées sèches $q_{\text{fumées.sèches}}$ et d'eau q_{H_2O} par la relation suivante :

$$q_{\text{fumées.humides}} = q_{\text{fumées.sèches}} + q_{H_2O} \quad (\text{Eq. 3-57})$$

La quantité d'eau q_{H_2O} a pour origine l'eau de combustion $q_{H_2O}^c$ et l'eau du combustible $q_{H_2O}^h$ telles que :

$$\begin{aligned} q_{H_2O} &= q_{H_2O}^h + q_{H_2O}^c \\ &= \frac{H_b}{1-H_b} \cdot \frac{24}{18} \cdot q_{bois} + \frac{1,44}{2} \cdot q_{bois} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow q_{H_2O} = \omega_{H_b} \cdot q_{bois} \quad (\text{Eq. 3-58})$$

$$\text{où } \omega_{H_b} = \frac{H_b}{1-H_b} \cdot \frac{24}{18} + \frac{1,44}{2}$$

Ceci permet d'obtenir une expression de la quantité de fumées humides $q_{\text{fumées.humides}}$ en fonction des quantités d'air q_{air} , de bois anhydre q_{bois} , des taux d'oxygène X_{O_2} et de monoxyde de carbone X_{CO} mesurés dans les fumées sèches et de l'humidité sur brut du bois H_b :

$$\begin{aligned} q_{\text{fumées.humides}} &= q_{\text{fumées.sèches}} + q_{H_2O} \\ &= \frac{1}{X_{O_2} - \frac{1}{2} \cdot X_{CO}} (0,208 \cdot q_{\text{air}} - 1,03 \cdot q_{\text{bois}}) + \omega_{H_b} \cdot q_{\text{bois}} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3-59})$$

$$\Rightarrow q_{\text{fumées.humides}} = \frac{0,208}{X_{O_2} - \frac{1}{2} \cdot X_{CO}} \cdot q_{\text{air}} + \left(\frac{-1,03}{X_{O_2} - \frac{1}{2} \cdot X_{CO}} + \omega_{H_b} \right) \cdot q_{\text{bois}}$$

3.3.2.5. Ecriture des relations

3.3.2.5.1. Relation entre air et bois

En posant les deux expressions donnant la quantité de fumées sèches $q_{\text{fumées.sèches}}$ en fonction de la quantité d'air q_{air} et de bois q_{bois} , on obtient directement une relation entre ces deux dernières quantités de matières ne prenant en compte que les informations de taux d'oxygène X_{O_2} et de monoxyde de carbone X_{CO} :

$$\begin{aligned} \frac{1}{1-X_{O_2}} \cdot (0,792 \cdot q_{\text{air}} + q_{\text{bois}}) &= \frac{1}{X_{O_2} - \frac{1}{2} X_{CO}} \cdot (0,208 \cdot q_{\text{air}} - 1,03 \cdot q_{\text{bois}}) \\ \left[0,792 \left(X_{O_2} - \frac{1}{2} X_{CO} \right) - 0,208 \cdot (1 - X_{O_2}) \right] \cdot q_{\text{air}} &= \left[-1,03 \cdot (1 - X_{O_2}) - \left(X_{O_2} - \frac{1}{2} X_{CO} \right) \right] \cdot q_{\text{bois}} \\ \left[X_{O_2} - 0,208 + \frac{0,792}{2} X_{CO} \right] \cdot q_{\text{air}} &= \left[0,03 \cdot X_{O_2} + \frac{1}{2} X_{CO} - 1,03 \right] \cdot q_{\text{bois}} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3-60})$$

$$\Rightarrow q_{\text{bois}} = \left(\frac{X_{O_2} - 0,208 + \frac{0,792}{2} X_{CO}}{0,03 \cdot X_{O_2} + \frac{1}{2} X_{CO} - 1,03} \right) \cdot q_{\text{air}}$$

Une étude paramétrique simple permet de vérifier que la teneur en monoxyde de carbone X_{CO} n'a que très peu d'influence sur ces calculs. On remarque en effet que pour une teneur en monoxyde de carbone X_{CO} inférieure à 5000ppm, soit 0,5% (ce qui sera toujours le cas dans nos essais), l'influence de ce paramètre sur le calcul précédent est inférieure à 0,5%.

Ainsi, dans la suite de nos calculs, nous négligerons X_{CO} .

On obtient alors l'expression réduite de la quantité de bois q_{bois} suivante :

$$q_{bois} = \frac{0,208 - X_{O_2}}{1,03 - 0,03 \cdot X_{O_2}} \cdot q_{air} \quad (\text{Eq. 3-61})$$

De plus, le taux d'oxygène X_{O_2} est compris entre 0% et 20,8%. Cela entraîne l'approximation suivante :

$$0,03 \cdot X_{O_2} \ll 1,03 \quad (\text{Eq. 3-62})$$

D'où l'expression finale de la quantité de bois q_{bois} en fonction du seul taux d'oxygène X_{O_2} :

$$q_{bois} = \frac{0,208 - X_{O_2}}{1,03} \cdot q_{air} \quad (\text{Eq. 3-63})$$

3.3.2.5.2. Relation entre air et fumées

En utilisant l'expression réduite de la quantité de bois q_{bois} en fonction du taux d'oxygène X_{O_2} et en négligeant la teneur en monoxyde de carbone X_{CO} devant le taux d'oxygène X_{O_2} , on exprime simplement les quantités de fumées sèches $q_{fumées.sèches}$ et de fumées humides $q_{fumées.humides}$ par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} q_{fumées.sèches} &= \frac{1}{X_{O_2} - \frac{1}{2} \cdot X_{CO}} \cdot (0,208 \cdot q_{air} - 1,03 \cdot q_{bois}) \\ \Rightarrow \quad q_{fumées.sèches} &\cong q_{air} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3-64})$$

$$q_{fumées.humides} = q_{fumées.sèches} + q_{H_2O}$$

$$\Rightarrow \quad q_{fumées.humides} \cong \left(1 + \left(\frac{H_b}{1 - H_b} \cdot \frac{24}{18} + \frac{1,44}{2} \right) \cdot \frac{0,208 - X_{O_2}}{1,03} \right) \cdot q_{air}$$

3.3.3. Expression des grandeurs

Nous avons établi les liens physiques entre air, bois et fumées ne prenant en compte que l'humidité du bois et le taux d'oxygène. Chacune de ces grandeurs fait l'objet de mesure directe ou indirecte grâce à notre instrumentation. Toute mesure est entachée d'erreur que l'on peut corriger par l'étalonnage, s'il est faisable. Ce paragraphe décrit les différentes façons d'obtenir les informations utiles. En estimant l'erreur commise en fonction de l'origine de l'information, nous optons pour la formulation la plus précise.

3.3.3.1. Débits d'air comburant

Les entrées d'air pulsées ont toutes fait l'objet d'étalonnage précis. Une entrée d'air parasite a été découverte lors de l'étalonnage de la mesure de débit de fumées. Ces fuites ont également été étalonnées.

3.3.3.1.1. Débit d'air mesuré dans les veines d'entrées

Chacun des débits d'entrées d'air est évalué par la formule suivante :

$$\bar{Q} = \alpha \cdot S \cdot V \cdot \frac{273}{T + 273} \quad (\text{Eq. 3-65})$$

- où : α est le coefficient de correction donné par l'étalonnage ;
 S est la surface de la section droite de la veine de mesure exprimée en m^2 ;
 V est la vitesse mesurée par le moulinet exprimée en m/h ;
 T est la température mesurée par le thermocouple exprimée en $^{\circ}\text{C}$.

Les coefficients correcteurs α ainsi que les surface S sont donnés dans le Tableau 3-1. Les débits obtenus sont exprimés en Nm^3/h .

3.3.3.1.2. Débit d'air de fuites

Après l'étalonnage des différents débitmètres, nous avons obtenu un décalage sur le débit mesuré dans la cheminée. Ainsi, le foyer étant maintenu à dépression constante, un débit d'air supplémentaire à ceux comptabilisés par les débitmètres d'entrées se retrouve en sortie de la chaudière. Ce débit de fuite est dépendant de la dépression Δp mesurée dans le foyer. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\bar{Q}_{\text{fuite}} = 9,52 \cdot \sqrt{\Delta p} - 9,15 \quad (\text{Eq. 3-66})$$

- où : Δp est la dépression exprimée en Pa ;
 $\bar{Q}_{\text{fuite}}$ est exprimé en Nm^3/h .

Après inspection de la chaudière, nous avons pu constater que les fuites sont essentiellement dues à l'intrusion du mécanisme de déplacement des grilles comme le montre la Figure 3-28. C'est pourquoi le débit de fuite est comptabilisé comme air primaire.

Ouverture
dans le caisson d'air primaire 1
servant au passage
du mécanisme de déplacement
des grilles mobiles



Figure 3-28 : Vue de l'ouverture occasionnant l'essentiel des fuites.

3.3.3.1.3. Récapitulatif des apports en air comburant

Ainsi, le débit d'air comburant se répartit de la façon suivante :

$$\left. \begin{aligned} Q_{AP} &= Q_{AP_1} + Q_{AP_2} + Q_{fuites} \\ Q_{AS} &= Q_{AS_1} + Q_{AS_2} + Q_{AS_3} \end{aligned} \right\} \quad Q_{AT} = Q_{AP} + Q_{AS} \quad (\text{Eq. 3-67})$$

où : AT est l'indice de l'air total ;

AP est l'indice de l'air primaire ;

AS est l'indice de l'air secondaire.

3.3.3.2. Débit de fumées

Le débit de fumées est mesuré par le tube de Pitot relié à une sonde de pression différentielle compensée en température. La mesure que nous obtenons est directement une vitesse de gaz. Néanmoins, l'étalonnage a montré une relation légèrement plus compliquée incluant un facteur correctif et un décalage à l'origine :

$$Q_{\text{fumées.humides}} = 0,9655 \cdot S_{\text{cheminée}} \cdot (v_{\text{mesurée}} + 0,135) \cdot \frac{273}{T_{\text{fumées}} + 273} \quad (\text{Eq. 3-68})$$

où : $S_{\text{cheminée}}$ est la surface de la section droite de la cheminée, soit $89,92\text{cm}^2 = 0,009 \text{ m}^2$;

$v_{\text{mesurée}}$ est la vitesse mesurée par le tube de Pitot en m/h ;

$T_{\text{fumées}}$ est la température des fumées mesurée par le thermocouple en $^{\circ}\text{C}$;

le débit obtenu est exprimé en Nm^3/h .

Les fumées créent un milieu agressif : chaud, humide et chargé de particules solides en suspension. C'est pourquoi nous avons opté pour une mesure par tube Pitot et sonde de pression différentielle. Cette mesure de débit est d'autant plus problématique qu'elle se situe en aval de plusieurs processus physiques.

Chacun de ces processus induit des fluctuations du débit de fumées selon une caractéristique de temps différente :

- la combustion est rythmée par les alimentations en bois ;
- l'échange de chaleur est dépendant de la température des fumées et de la température de l'eau ;
- la vitesse d'extraction varie en fonction de la dépression mesurée dans le foyer.

En pratique, les informations de débits de fumées sont obtenues à partir du débit d'air total $\bar{Q}_{AT}$, de l'humidité du bois H_b et de la teneur en oxygène X_{O_2} :

$$\bar{Q}_{\text{fumées.sèches}} = \bar{Q}_{AT} \quad (\text{Eq. 3-69})$$

$$\bar{Q}_{\text{fumées.humides}} = \left(1 + \left(\frac{H_b}{1-H_b} \cdot \frac{24}{18} + \frac{1,44}{2} \right) \cdot \frac{0,208 - X_{O_2}}{1,03} \right) \cdot \bar{Q}_{AT} \quad (\text{Eq. 3-70})$$

où : les débits sont exprimés en Nm^3/h .

3.3.3.3. Débit de bois

Le débit de bois ne peut pas être évalué directement. Il peut néanmoins être approché de trois manières différentes :

- la vis d'alimentation du foyer délivre un débit volumique Φ fonction de sa vitesse de rotation moyenne. Un coefficient ζ de remplissage de la vis et la masse volumique apparente du bois anhydre ρ_{anhydre} donnent une voie d'accès à ce débit par la formulation suivante :

$$\dot{m}_{\text{bois.anhydre}} = \zeta \cdot \Phi \cdot \rho_{\text{anhydre}} \quad (\text{Eq. 3-71})$$

où : $\dot{m}_{\text{bois.anhydre}}$ est exprimé en kg de bois anhydre par heure ;

Φ est exprimé en m^3/h ;

ρ_{anhydre} est exprimé en kg de bois anhydre par MAP.

- la connaissance du débit d'air total $\bar{Q}_{AT}$ et de la teneur en oxygène dans les fumées sèches X_{O_2} donnent une seconde voie d'accès par la formulation suivante :

$$\dot{m}_{\text{bois.anhydre}} = \frac{24}{22,4} \cdot \frac{0,208 - X_{O_2}}{1,03} \cdot \bar{Q}_{AT} \quad (\text{Eq. 3-72})$$

où : $\dot{m}_{\text{bois.anhydre}}$ est exprimé en kg de bois anhydre par heure ;

$\bar{Q}_{AT}$ est exprimé en Nm^3/h .

- enfin la mesure de la puissance thermique P_{fourni} fournie par la chaudière au réseau de chauffage permet d'accéder à une troisième voie. Grâce au PCI du bois et au rendement global η_{global} de la chaudière, on obtient le débit de bois humide. Avec la mesure de l'humidité sur brut H_b , on obtient le débit de bois anhydre $\dot{m}_{\text{bois.anhydre}}$ par la formulation suivante :

$$\dot{m}_{\text{bois.anhydre}} = 3600 \cdot (1 - H_b) \cdot \frac{P_{\text{fourni}}}{\eta_{\text{global}} \cdot \text{PCI}} \quad (\text{Eq. 3-73})$$

où : $\dot{m}_{\text{bois.anhydre}}$ est exprimé en kg de bois anhydre par heure ;

P_{fourni} est exprimé en kW ;

PCI est exprimé en kJ par kg de bois humide.

Nous avons débuté notre étude avec la certitude d'exprimer le débit de bois grâce à la première méthode décrite ci-dessus. Très vite nous nous sommes aperçus qu'il existe une forte corrélation temporelle entre les débits de bois calculés à partir des deuxième et troisième méthodes. En effet, malgré une fréquence de rotation de la vis d'alimentation réglée comme un métronome, nous avons constaté des fluctuations de la puissance thermique fournie au réseau de chauffage. Avec quelques minutes de retard et un rendement global η_{global} quasi constant, le débit de bois calculé à partir de la puissance fournie au réseau suit le débit calculé à partir des informations obtenues sur le débit d'air total et le taux d'oxygène. Cette constatation revient à dire que le taux de remplissage de la vis d'alimentation ζ et/ou la masse volumique apparente anhydre du bois $\rho_{anhydre}$ ne sont pas constants au cours du temps. Nous ne pouvons donc pas estimer correctement le débit de bois à partir de la première méthode.

La troisième méthode fait apparaître une inconnue qu'est le rendement global de la chaudière η_{global} tandis que nous mesurons précisément le débit d'air total $\bar{Q}_{AT}$ et la teneur en oxygène dans les fumées sèches X_{O_2} qui interviennent dans la seconde méthode.

Nous choisissons donc de valider la seconde méthode pour obtenir une mesure indirecte du débit de bois. Ce point est particulièrement important dans l'étude car la connaissance du débit de bois est à l'origine d'un bon nombre de grandeurs déduites telles que :

- la puissance combustible P :
$$P = \frac{1}{3600} \frac{\dot{m}_{bois.anhydre}}{1 - H_b} . PCI \quad (Eq. 3-74)$$

- ou le rendement global η_{global} :
$$\eta_{global} = \frac{P_{fourni}}{P} \quad (Eq. 3-75)$$

3.3.3.4. Conclusions

Les difficultés d'obtention d'informations sur les flux de matière au sein de la chaudière ont amené à parfaire l'étalonnage des flux d'air entrants.

Les informations de composition des fumées sont doubles voire triples sur certaines expériences (2 analyseurs de gaz + 1 sonde Lambda).

Nous basons alors notre étude sur ces mesures afin d'en déduire l'ensemble des grandeurs utiles à la conduite optimale de la chaudière.

4. Résultats Expérimentaux

4.1. Essais réalisés

L'objectif de notre travail étant de caractériser et d'optimiser la combustion de différents types de bois fragmentés en chaudières automatiques. Nous effectuons une multitude d'essais dans des conditions connues et variables.

La première variable étudiée est la nature et les caractéristiques du bois : humidité, granulométrie, ...

Pour ces différents combustibles, nous suivons un planning d'expériences prenant en compte plusieurs paramètres :

- la puissance varie de 60 à 180 kW (soit de 30 à 100% de la puissance nominale de la chaudière) ;
- pour ces différentes puissances, qui fixent le débit de bois, nous faisons varier les débits d'air total de 1,5 à 3 fois le débit stœchiométrique ;
- pour ces différents débits d'air total, nous faisons varier la répartition entre air primaire et air secondaire.

Aussi, nous réalisons plusieurs campagnes d'essais dont nous décrivons le cheminement.

4.1.1. Choix des paramètres

Pour chaque type de bois étudié, 15 à 40 MAP du même bois sont livrés en une seule fois afin de limiter la variabilité du combustible bois au cours de son étude. Sur chacun des lots, les essais consistent à étudier pour un débit de bois fixé les influences des débits d'air primaire et secondaire sur l'ensemble des grandeurs mesurées. Nous décrivons donc les opérations utiles à l'obtention de ces expériences.

4.1.1.1. Description du bois

Le bois livré est caractérisé selon un protocole précis pour déterminer la granulométrie, la masse volumique, l'humidité, le taux de cendres et le pouvoir calorifique supérieur. Ces différentes mesures sont réalisées avec le matériel de caractérisation décrit au Paragraphe 3.1.1.

Le protocole de caractérisation est le suivant : à la réception du bois, nous en prélevons environ 50 litres au total en plusieurs prélèvements effectués en différents points du tas. Après homogénéisation du volume échantillon, nous mesurons la masse volumique humide en utilisant une caisse rectangulaire de volume connu. Ensuite, le bois est ré-homogénéisé. Un prélèvement d'environ 0,5 litre sert alors à la mesure d'humidité, le reste servant à la mesure de granulométrie. Le bois ayant servi à l'analyse granulométrique est évacué. Le bois anhydre obtenu en fin de mesure d'humidité est broyé pour un tiers de son volume afin d'effectuer une mesure de pouvoir calorifique et l'analyse élémentaire, les deux tiers restant sont utilisés pour réaliser la mesure de taux de cendres.

Nos analyses ont rapidement montré la très grande importance de l'humidité du bois utilisé devant toutes les autres mesures. Jointe à sa grande variabilité spatiale et temporelle pour un même tas, l'importance de l'humidité nous amène à effectuer des mesures journalières, et même davantage sur les bois très humides qui sont étudiés.

4.1.1.2. Description du paramétrage de la chaudière

Afin d'effectuer des mesures sur un état stable de fonctionnement de la chaudière, nous faisons fonctionner la chaudière durant une période minimale de deux heures avant de débiter les cycles de mesures. Ce temps de fonctionnement sans mesure permet d'ajuster les paramètres à imposer à l'automate de gestion afin d'obtenir les conditions souhaitées durant le cycle de mesures. En effet, malgré nos efforts à constituer des abaques donnant les débits d'air et les débits de bois en fonction des paramètres imposés, à chaque expérience nous devons réajuster ces paramètres pour obtenir une table d'expérience parfaite.

Durant cette phase d'ajustage, nous procédons selon le protocole suivant :

- nous déterminons a priori une fréquence de rotation de la vis d'alimentation du foyer afin d'obtenir la puissance combustible souhaitée. Ce paramètre est implémenté dans l'automate.
- nous démarrons la chaudière. Au bout d'une heure de marche, une vérification de la puissance délivrée par la chaudière permet de réajuster le paramètre de débit de bois.
- nous implémentons les valeurs extrêmes de fonctionnement des débits d'air afin de valider l'étendue de la table d'expérience. En pratique, nous faisons varier le facteur d'air de 1,5 à 3 ce qui correspond à un taux d'oxygène mesuré dans les fumées variant entre 6% et 15%.
- nous utilisons la mesure de taux d'oxygène mesurée réalisée par la sonde Lambda équipant la chaudière comme source d'information afin d'ajuster les valeurs extrêmes de fonctionnement des débits d'air.
- nous déterminons les pas d'incrémentation des paramètres permettant d'obtenir le nombre de modes souhaités. Sachant que chaque mode est maintenu durant un peu plus d'une heure, le nombre de modes étudiés est déterminé par la quantité de bois disponible.

En théorie, nous cherchons à étudier pour chaque type de bois un minimum de trois régimes de fonctionnement de la chaudière : 60kW, 120kW et 180kW. Pour chacune de ces puissances nous examinons quatre valeurs de débit d'air primaire et pour chaque débit d'air primaire quatre valeurs de débit d'air secondaire, soient un minimum de 16 valeurs de débit d'air par débit de bois.

En pratique, nous avons étendu les plages d'investigations de l'air primaire et doublé certaines expériences afin d'exploiter au maximum nos livraisons de bois. Manifestement, la vis d'alimentation, bien que fonctionnant tel un métronome, ne délivre jamais exactement la même quantité de bois si bien que doubler une expérience revient à réaliser une autre expérience de caractéristiques de puissance délivrée proches de la première. Nous verrons d'ailleurs plus loin les résultats de mesure et leurs fluctuations au cours du temps, phénomènes qui justifient le maintien du mode de fonctionnement étudié durant une heure.

4.1.2. Analyse des mesures

Dans la suite de l'étude nous travaillerons sur des valeurs moyennes calculées à partir des valeurs instantanées de chaque mode de fonctionnement. En clair, nos mesures sont acquises toutes les 20 secondes, ce qui représente 190 points de mesures pour les 3800 secondes que dure le mode étudié (dix minutes de stabilisation et une heure de fonctionnement). Pour chaque point de mesure sont enregistrées les grandeurs mesurées, ensuite les grandeurs déduites sont calculées. Les moyennes de ces grandeurs sont calculées sur un ensemble d'environ 160 points car nous abandonnons les dix premières minutes du mode de fonctionnement que nous considérons comme ne faisant pas partie du régime établi. Ces moyennes seront ensuite explicitées pour analyser l'essai de combustion.

Dans ce paragraphe nous décrivons les grandeurs instantanées mesurées et leurs fluctuations au cours du temps afin d'en déduire les grandeurs moyennes. Notons que toutes les Figures d'illustrations présentées dans ce paragraphe sont tirées du même mode d'une de nos expériences. En d'autres termes, les fluctuations visibles sur ces graphiques ne sont en aucun cas dues à des modifications des consignes de fonctionnement imposées par l'automate de gestion de la chaudière et sont celles mesurées pendant un mode de fonctionnement fixé.

4.1.2.1. Etude des flux d'air

Les mesures de vitesses et de températures d'air dans les veines d'airs primaires et secondaires permettent de calculer les débits normalisés en pression et en température.

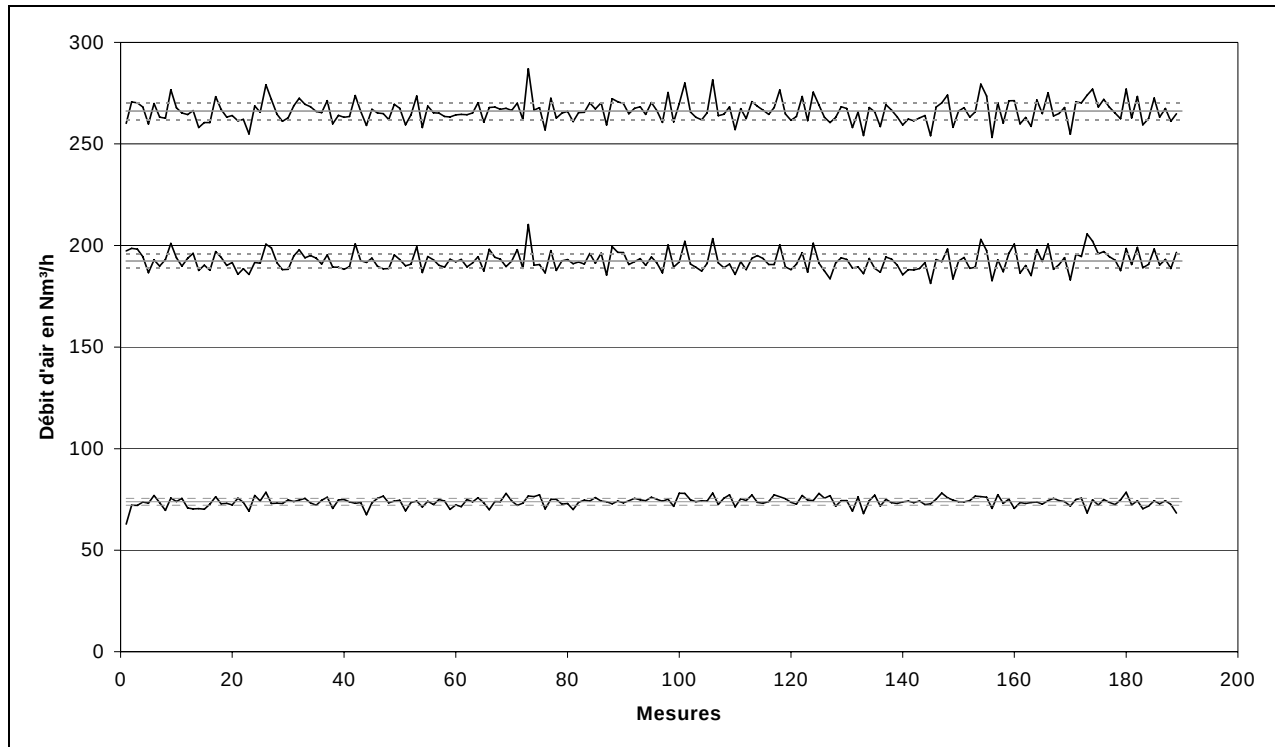


Figure 4-1 : Evolution des débits d'air secondaire (en bas), d'air primaire (au milieu) et d'air total (en haut) pendant un mode soit 190 mesures.

(noir : calcul à chaque pas de temps ; gris continu : moyenne calculée sur les points 30 à 188 ; gris pointillés : limites de l'écart moyen sur le même intervalle)

La Figure 4-1 illustre les débits d'air secondaire, primaire et total respectivement sur les courbes du bas, du milieu et du haut. Les droites continues indiquent la valeur moyenne des débits. Les moyennes sont calculées sur les points 30 à 188. Les limites d'écart moyen indiquées par les droites pointillées montrent que les écarts moyens du débit d'air total ($\pm 4,2 \text{ Nm}^3/\text{h}$) sont peu différents des écarts moyens du débit d'air primaire ($\pm 3,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$). Ces écarts ne se cumulent pas directement. En définitive, le débit d'air total connaît un taux de fluctuation plus faible que chacune des mesures le constituant comme le montre le Tableau 4-1.

Grandeurs mesurées			Grandeurs déduites		
Dénomination	Valeur moyenne	Ecart moyen	Dénomination	Valeur moyenne	Ecart moyen
AP1 v	4,8 m/s	$\pm 3,3 \%$	AP1	106,3 Nm ³ /h	$\pm 3,3 \%$
AP1 T	29,3 °C	$\pm 0,4 \%$			
AS1 v	4,2 m/s	$\pm 2,4 \%$	AS1	50,7 Nm ³ /h	$\pm 2,4 \%$
AS1 T	33,9 °C	$\pm 0,9 \%$			
AS2 v	2,0 m/s	$\pm 5,0 \%$	AS2	23,3 Nm ³ /h	$\pm 5,1 \%$
AS2 T	36,5 °C	$\pm 0,9 \%$			
Dépression	100 Pa	$\pm 0,9 \%$	Fuites	86,1 Nm ³ /h	$\pm 0,5 \%$
			Air Total	266,4 Nm ³ /h	$\pm 1,6 \%$

Tableau 4-1 : Valeurs moyennes et écarts moyens des grandeurs mesurées et déduites constituant le débit d'air total normalisé.

L'écart moyen est faible et permet de ne considérer que la valeur moyenne pour l'ensemble des calculs à venir.

4.1.2.2. Mesures d'oxygène

La mesure sur échantillon anhydre du taux d'oxygène résiduel dans les fumées est sujette à de fortes fluctuations comme l'illustre la Figure 4-2. Cette figure montre les mesures d'oxygène réalisées par l'analyseur de gaz et par la sonde Lambda simultanément aux mesures de débits d'air présentées sur la Figure 4-1.

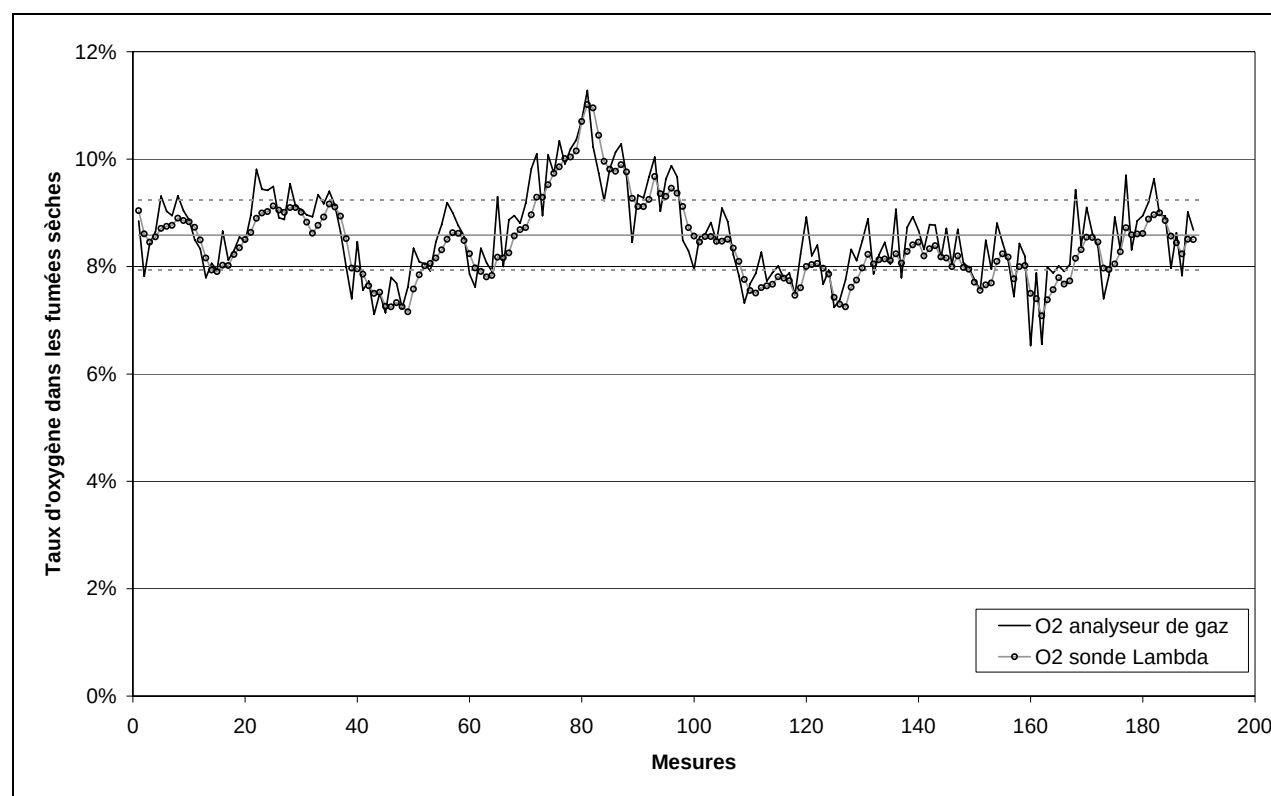


Figure 4-2 : Evolution du taux d'oxygène mesuré dans les fumées sèches mesuré par l'analyseur de gaz (ligne noire continue) et par la sonde Lambda de la chaudière (ligne grise et points noirs).

(gris continu : moyenne calculée sur les points 30 à 188 ;
gris pointillés : limites de l'écart moyen sur le même intervalle)

Les fluctuations d'oxygène ne sont manifestement pas dues aux fluctuations de débit d'air total. Ces fluctuations sont donc essentiellement dues aux variations de la quantité de bois consommé au cours du temps. C'est pourquoi tous nos calculs sont effectués à chaque pas de temps et moyennés dans un second temps. L'écart moyen sur les mesures est ici plus important mais permet tout de même de ne considérer que la valeur moyenne pour comparer les différentes conditions. Il convient également de noter que les appareils de mesures donnent les résultats tout à fait semblables, même si la sonde Lambda réagit moins rapidement que l'analyseur de gaz Testo.

4.1.2.3. Etude des flux de bois

Nous avons abordé au Paragraphe 3.3.3 les liens théoriques existants entre débit d'air, mesure de l'oxygène, et débit de bois. Ce débit de bois théorique permet de calculer, par l'intermédiaire du pouvoir calorifique, la puissance maximale délivrée par la combustion dans le foyer. Grâce à la connaissance de l'humidité du bois, il est alors possible de calculer le débit de fumées humides et leur capacité calorifique. La température

des fumées et le taux de monoxyde de carbone permettent alors de calculer les pertes énergétiques et donc la puissance maximale récupérable sur le réseau.

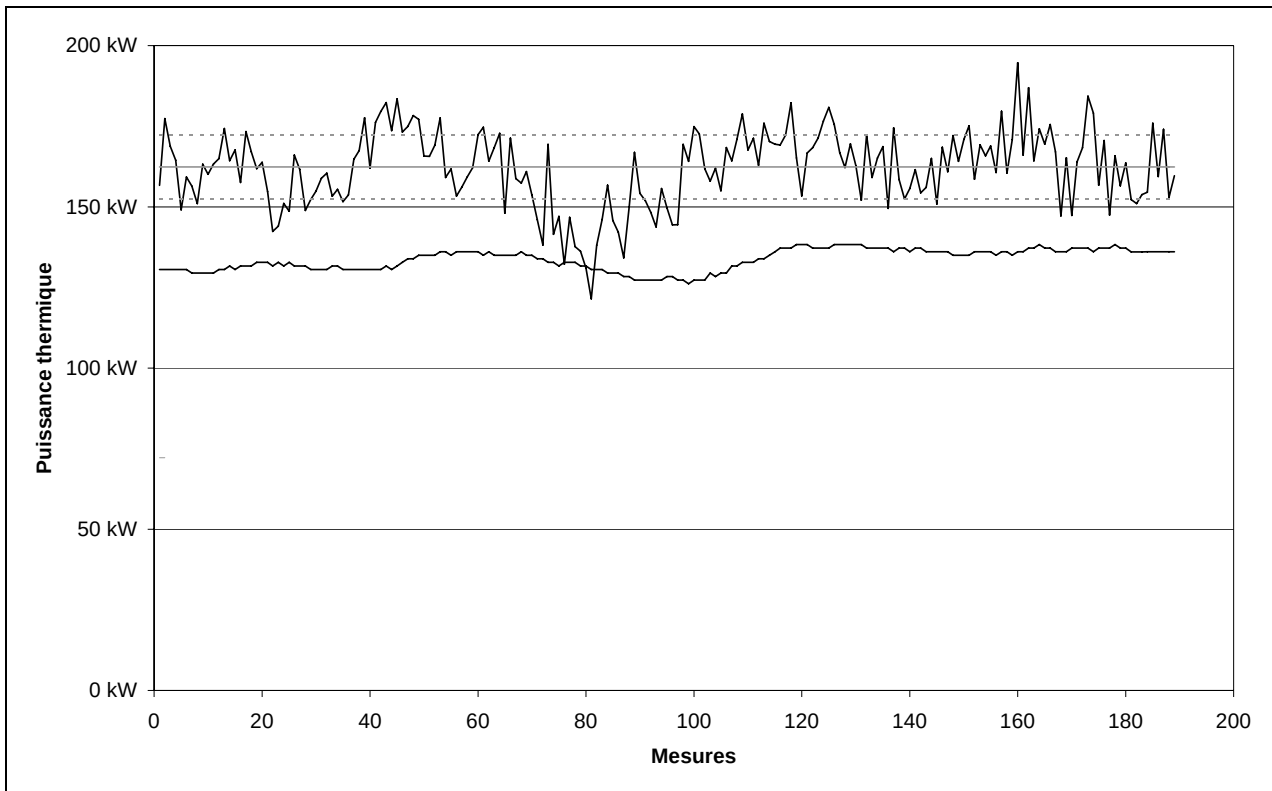


Figure 4-3 : Evolution de la puissance délivrée sur le réseau (en bas) et de la puissance maximale récupérable sur le réseau (en haut).
(noir : calcul à chaque pas de temps ; gris continu : moyenne calculée sur les points 30 à 188 ; gris pointillés : limites de l'écart moyen sur le même intervalle)

La Figure 4-3 montre l'évolution de chacune de ces puissances. La différence entre ces deux puissances est essentiellement due aux pertes par les parois du four. Les fortes fluctuations de la puissance maximale récupérable sont dues aux fluctuations de l'oxygène et du débit d'air total. Néanmoins, la cohérence temporelle entre ces deux puissances est remarquable. Moyennant un lissage et un temps de retard (environ 21 points de mesure soient 7 minutes) dû à l'inertie thermique de l'eau circulant dans l'échangeur de la chaudière, la puissance délivrée sur le réseau réagit en cohérence avec les variations de la puissance maximale récupérable.

Cette constatation valide l'affirmation que le débit de bois brûlé varie au cours du temps. Bien que la fréquence de rotation de la vis d'alimentation du foyer demeure rigoureusement identique tout au long de l'expérience, le phénomène de fluctuation du débit de bois nous amène logiquement à calculer le débit de bois à partir des mesures de débit d'air total et de taux d'oxygène. Les écarts moyens sur les débits de bois seront donc dus aux écarts moyens sur le débit d'air total et le taux d'oxygène.

4.1.2.4. Etude de la qualité de la combustion

Le dernier point important à visualiser concerne la mesure du monoxyde de carbone qui représente pour nous le traceur de la qualité de combustion. La Figure 4-4 montre l'évolution de la mesure pour le même mode que précédemment. Le monoxyde de carbone fluctue beaucoup au cours de chaque mode de l'expérience. L'écart relatif calculé ici est de 29% de la valeur moyenne.

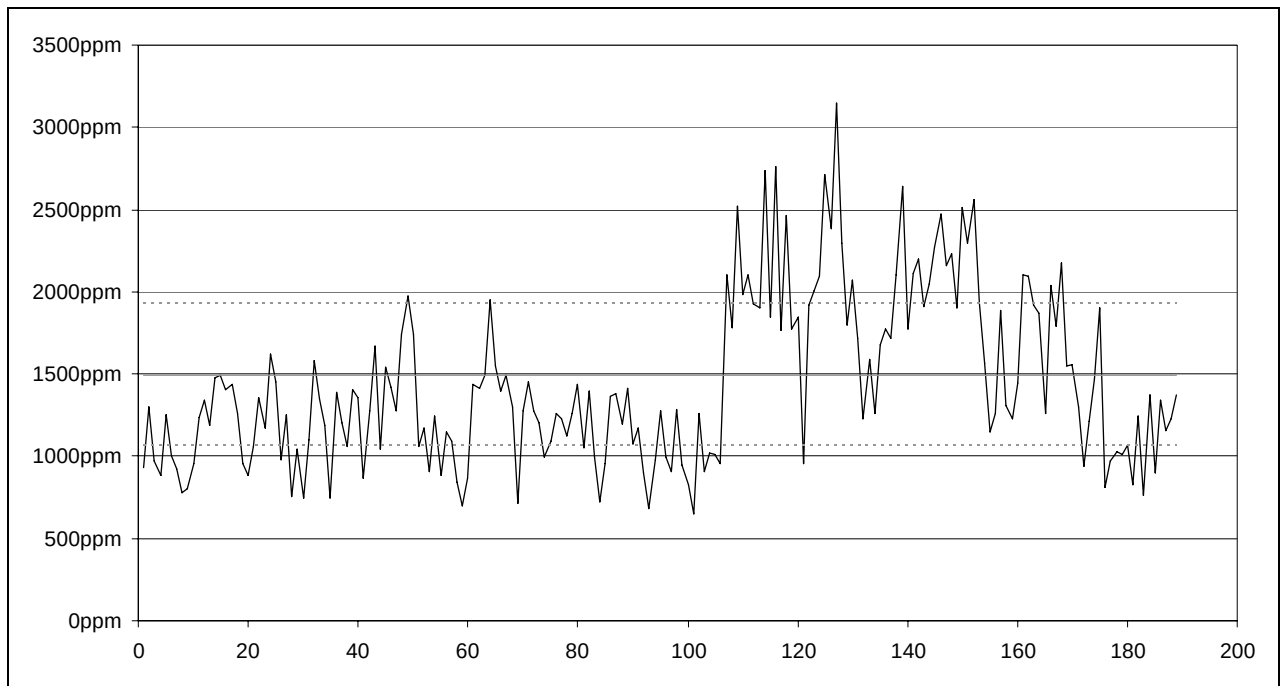


Figure 4-4 : Evolution du taux de monoxyde de carbone dans les fumées sèches en ppm corrigé à taux d'oxygène constant égal à 13%.
 (noir : calcul à chaque pas de temps ; gris continu : moyenne calculée sur les points 30 à 188 ;
 gris pointillés : limites de l'écart moyen sur le même intervalle)

Les fortes fluctuations des mesures effectuées justifient le maintien du mode fonctionnement de la chaudière durant plus d'une heure afin d'obtenir une valeur moyenne du monoxyde de carbone. C'est pourquoi l'étude que nous faisons de cette mesure ne s'appuie que sur la valeur moyenne et se borne à noter l'évolution de cette moyenne en fonction des modes étudiés.

Ainsi, chacune des moyennes de monoxyde de carbone seront reportées sur un graphique en fonction du mode étudié, et c'est seulement cette moyenne qui sera prise en compte. Nous verrons que ces expériences comportent un mode pour lequel la valeur moyenne de monoxyde de carbone est la plus faible. Une fois que ce mode « optimal » sera déterminé pour chaque expérience, notre étude consistera alors à trouver une loi reliant ces modes optimaux aux conditions d'expérience sans plus nous soucier de la valeur moyenne de monoxyde de carbone qui leur correspond.

De plus, des essais effectués sur des durées beaucoup plus longues (de l'ordre de 4 heures) ont montré que les moyennes obtenues sont très proches de celles obtenues sur une heure de fonctionnement, justifiant ainsi ce choix.

4.2. Résultats

Notre première approche consiste à expérimenter une variation granulométrique et une variation d'humidité en maintenant la qualité du bois constante. Pour cela, nous utilisons de la sciure et des plaquettes provenant d'une même scierie. Nous obtenons trois humidités et deux granulométries différentes. Les plaquettes testées sont très sèches et très humides tandis que l'humidité de la sciure testée se situe au centre de l'intervalle. Les résultats de ces premiers essais engendrent le choix des combustibles des campagnes d'essais suivantes.

Nous nous intéressons alors à des plaquettes de bois provenant directement de forêt. Nous étudions donc un combustible de granulométrie similaire aux plaquettes de scierie. C'est l'humidité de ces plaquettes que nous faisons varier en fonction des essais de combustion.

Nous allons d'abord présenter les résultats de la caractérisation des différents combustibles étudiés. Nous abordons ensuite les résultats de combustion pour ces différents coproduits de l'exploitation du bois. Ce paragraphe est naturellement hiérarchisé selon l'approche que nous avons suivie dans nos travaux.

4.2.1. Caractérisation des combustibles étudiés

Tous les bois choisis comme combustibles sont des bois « sains », n'ayant subi aucun traitement particulier, si ce n'est un déchiquetage. Deux provenances sont étudiées :

- une scierie dans laquelle nous avons prélevé de la sciure, des plaquettes et des écorces. Ces différents produits sont regroupés sous la dénomination de coproduits de la première transformation ;
- une entreprise de broyage forestier dont nous avons prélevé des plaquettes forestières de différentes humidités. Ces plaquettes proviennent du déchiquetage de bois d'éclaircies et de branchages. Ces différents produits sont regroupés sous la dénomination de coproduits de l'exploitation forestière.

Pour ces différents combustibles, nous avons effectué la caractérisation complète selon le protocole présenté au paragraphe 3.1.1. Les résultats obtenus présentés ci-dessous sont divisés en quatre groupes :

- les sciures 1 et 2 sont issues de la sciure que nous avons brûlée. Les sciures 3 et 4 proviennent de chaufferies identiques à la nôtre, et servent donc de combustible ;
- les plaquettes 1 et 2 sont celles que nous avons brûlées et nommées coproduits de l'exploitation forestière. Les plaquettes 3 et 4 sont également des plaquettes forestières mais provenant d'autres chaufferies ;
- les plaquettes 5 à 8 sont qualifiables de grosses plaquettes devant les plaquettes 1 à 4. Les plaquettes 5 et 6 sont des coproduits de la première transformation du bois. Les plaquettes 7 et 8 sont des plaquettes forestières provenant d'autres chaufferies. Les plaquettes 8 ont la spécificité d'être constituées en grande partie de bois ayant fusé (broyage de bois de tempête après plusieurs années d'abandon en forêt) ;
- les écorces proviennent de la même entreprise de première transformation du bois.

Nous ne présentons pas dans ce paragraphe les mesures d'humidité. En effet, cette caractéristique du bois fragmenté est très variable dans le temps si bien qu'éditer des résultats de mesures en dehors de leur contexte d'utilité n'est d'aucun intérêt. En revanche, à chaque essai de combustion correspond une mesure d'humidité du combustible utilisé.

Les résultats de mesures présentés ici concernent la masse volumique apparente, la répartition granulométrique, le pouvoir calorifique supérieur et le taux de cendres sur une base anhydre.

4.2.1.1. Masse volumique apparente anhydre

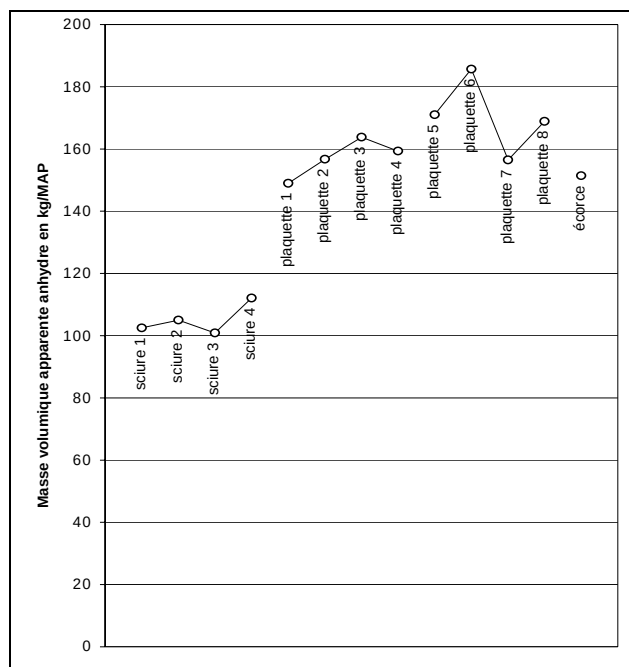


Figure 4-5 : Mesures de masse volumique apparente anhydre.

La Figure 4-5 représente les mesures de la masse volumique apparente anhydre.

La sciure donne des résultats globalement plus faibles que les plaquettes ou l'écorce avec une moyenne de 105 kg anhydre par MAP.

Le premier lot de plaquettes, plus petites d'aspect (comme le confirme l'analyse granulométrique), ont une masse volumique plus faible que le lot de *grosses* plaquettes. La moyenne est de 157 kg de bois anhydre par MAP.

Le second lot de plaquettes a une moyenne de 171 kg anhydre par MAP. Les mesures sont assez dispersées : les plaquettes n°6 font 186 kg/MAP tandis que les plaquettes n°7 font 156 kg/MAP. Cette dispersion n'obtient pas de justification directe.

Les écorces ont une masse volumique anhydre de l'ordre de celle des plaquettes avec 151 kg anhydre par MAP.

La taille des particules joue sur la masse volumique apparente. La sciure ayant un spectre de tailles de particules plus étroit que les plaquettes, le prorata de volume inoccupé est donc plus important. La masse volumique anhydre du matériau dense (le bois) est sensiblement identique dans les plaquettes ou la sciure. Il en résulte une masse volumique apparente de la sciure plus faible de celle des plaquettes.

4.2.1.2. Granulométrie

Les trois figures suivantes illustrent les résultats de mesures granulométriques effectuées sur le lot de sciures (Figure 4-6), le lot de petites plaquettes (Figure 4-7), le lot de grosses plaquettes et l'écorce (Figure 4-8).

Le classement visuel effectué précédemment est confirmé par l'analyse granulométrique.

La sciure est globalement constituée de particules traversant une grille ayant des ouvertures carrées de 2mm de côté. Pour la sciure n°2, cela représente 76% de sa masse. Pour les autres sciures, cela représente entre 90% et 93%. Enfin, aucune particule de ces sciures n'est refusée par la grille de 10 mm. Autrement dit, une sciure passe en intégralité au travers d'une grille de trous carrés de 100mm².

Les petites plaquettes sont caractérisées par un pic centré sur 100mm². Cela se traduit par les mesures suivantes : de 83% à 93% de la masse des petites plaquettes est refusé par une grille de 2mm et accepté par une grille de 15mm. Elles comportent toutes moins de 5% de particules traversant une grille carrée de 1mm² d'ouverture. Les plaquettes 3 et 4 ne comportent pas de particules refusées par la grille de 15mm, cela représente 6% des plaquettes n°2 et 11% des plaquettes n°1.

Les grosses plaquettes sont caractérisées par un pic entre 225mm² et 900mm². Toutes passent en intégralité au travers de trous carrés de 30mm de côté. Les plaquettes n°8 sont obtenues à partir de bois dégradé biologiquement. Il semble que le broyage de ce bois engendre davantage de petites particules. En effet, où les plaquettes 5 à 7 comportent au plus 2% de particules inférieures à 4mm², les plaquettes n°8 en comportent 14%.

L'écorce peut être assimilable à des grosses plaquettes hormis la présence de très grosses particules. En effet, 20% de la masse des écorces est refusée par la grille carrée de 63mm d'ouverture.

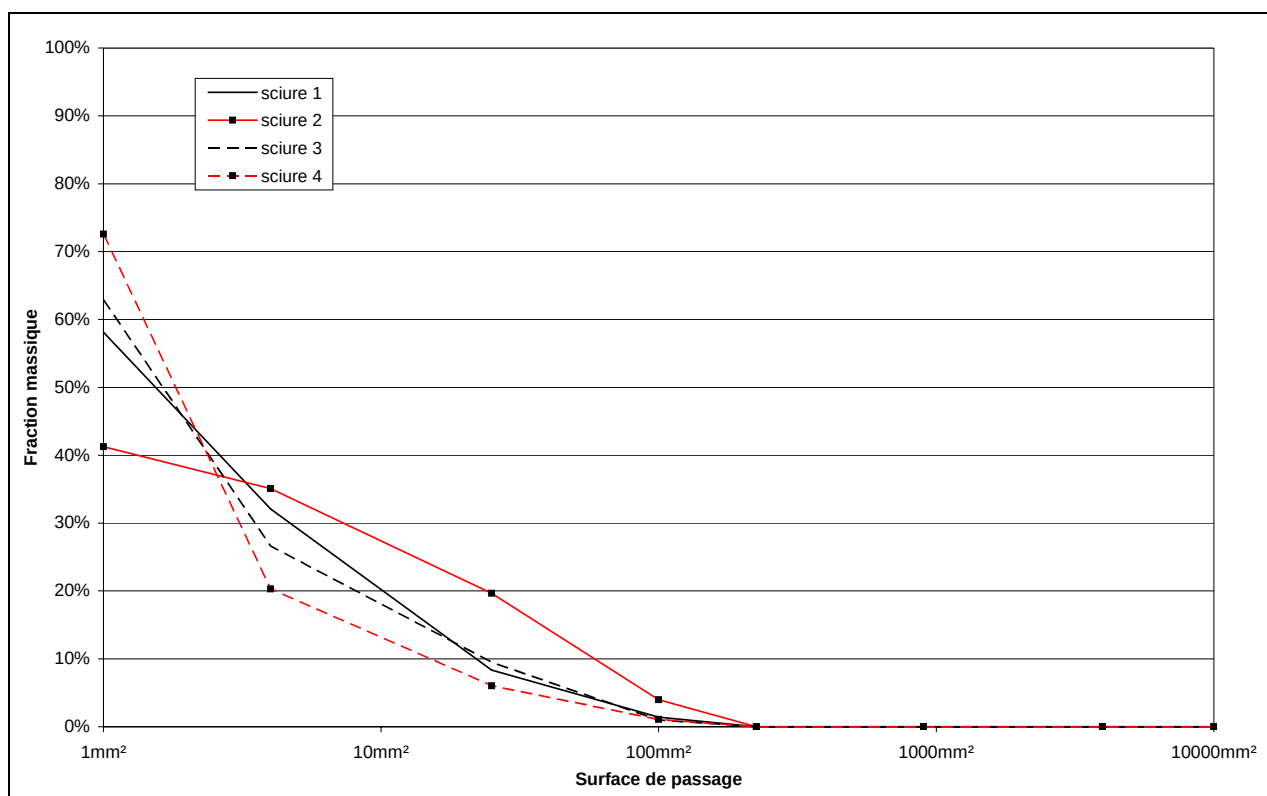


Figure 4-6 : Mesures de répartitions granulométriques des sciures.

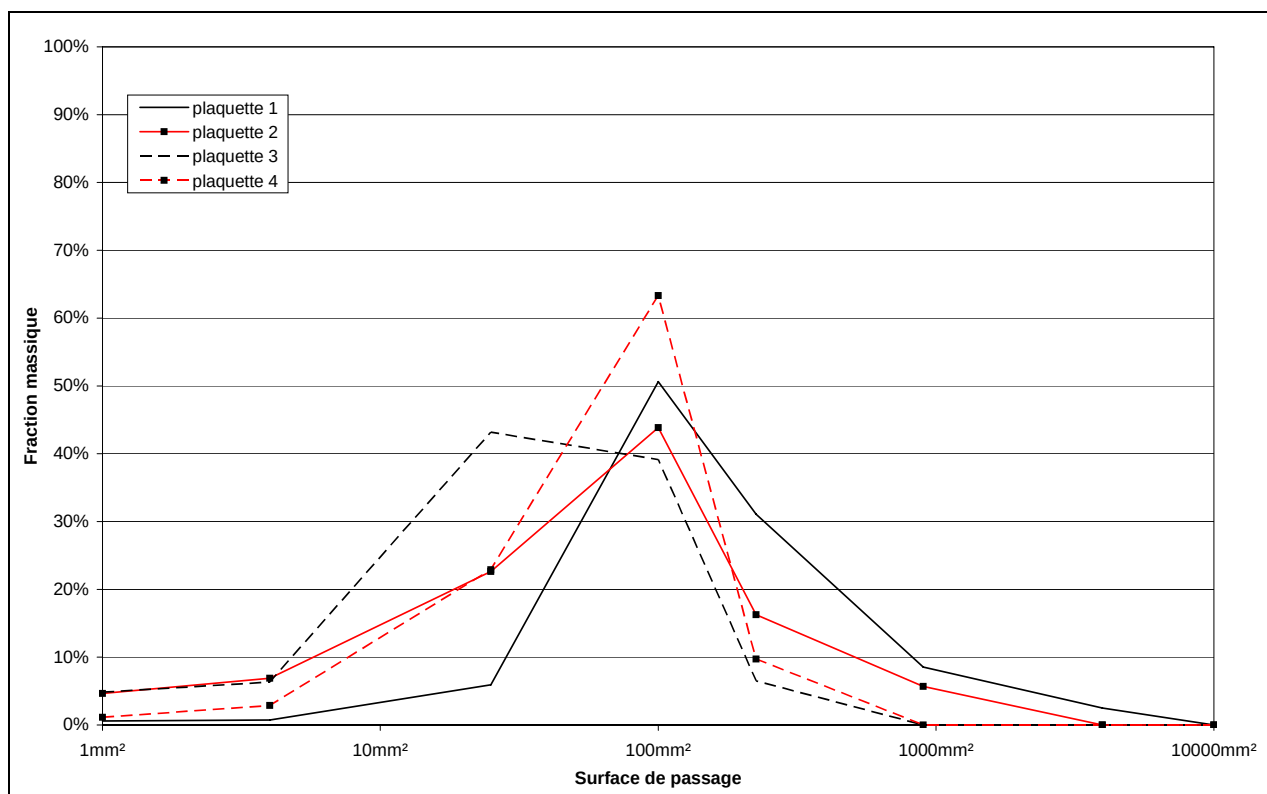


Figure 4-7 : Mesures de répartitions granulométriques des petites plaquettes.

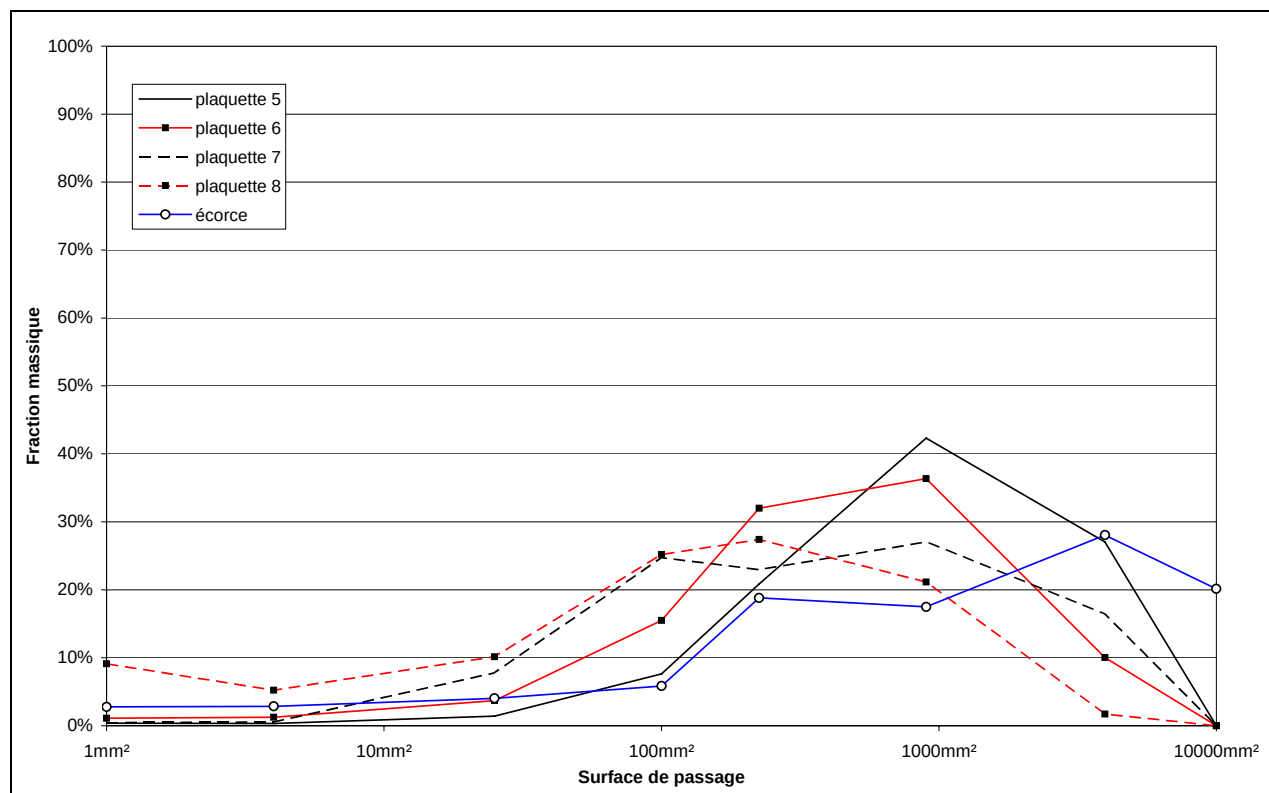


Figure 4-8 : Mesures de répartitions granulométriques des grosses plaquettes.

4.2.1.3. Pouvoir calorifique supérieur

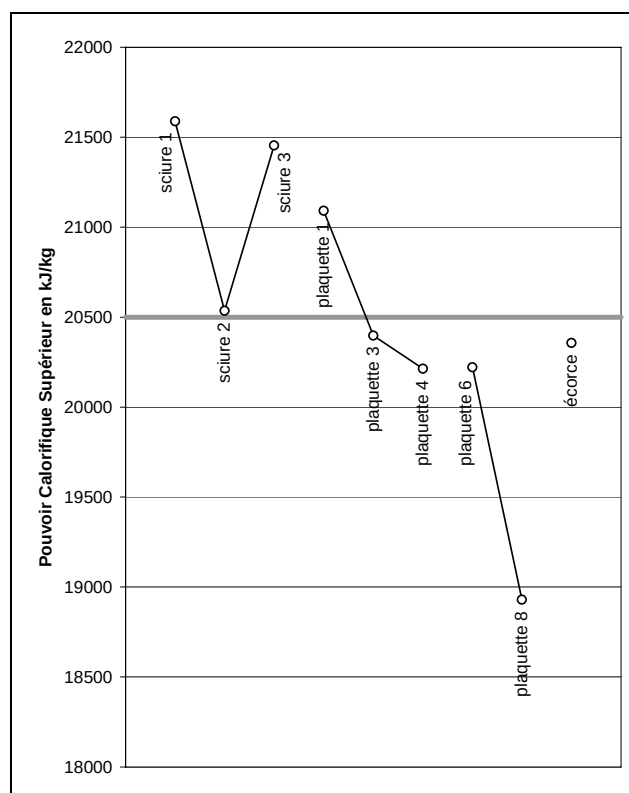


Figure 4-9 : Mesures de PCS.

La Figure 4-9 illustre les résultats de mesures de pouvoir calorifique supérieur effectuées sur les différents combustibles. La ligne grise horizontale place la valeur de PCS de 20500 kJ/kg indiquée dans les données bibliographiques (cf. 2.1.2.1).

Globalement, nos résultats de PCS sont cohérents avec la bibliographie avec une moyenne égale à 20530 kJ/kg.

Les sciures obtiennent des résultats légèrement supérieur avec une moyenne égale à 21200 kJ/kg.

Les plaquettes ont dans l'ensemble (n°8 mis à part) un PCS moyen de 20500 kJ/kg.

Le cas des plaquettes n°8 est particulier car leur bois est manifestement dégradé. Cette dégradation se traduit par une baisse significative du PCS. Avec 18900 kJ/kg, ces plaquettes ont un PCS 7,7% inférieur à la valeur moyenne de 20500 kJ/kg qui est prise en compte dans les essais de combustion.

L'écorce donne un résultat de 20400 kJ/kg très proche de la moyenne.

4.2.1.4. Taux de cendres

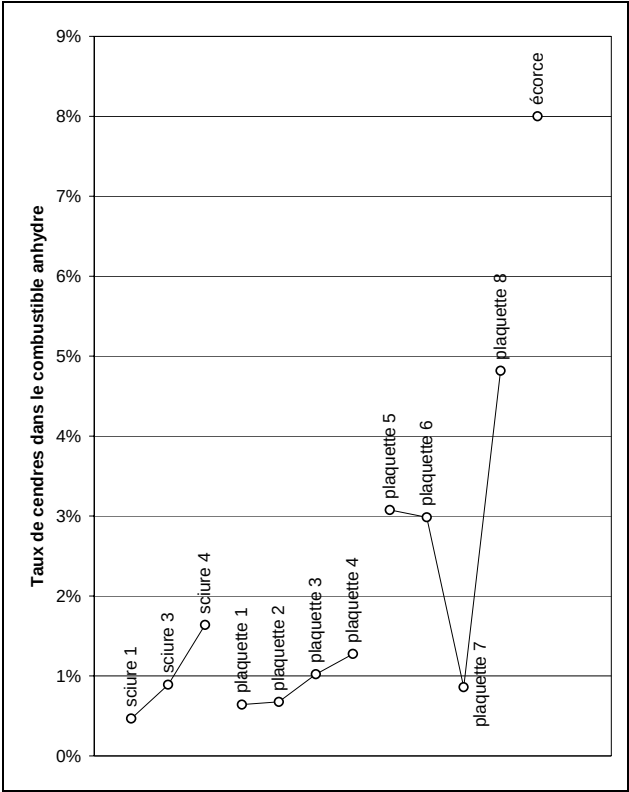


Figure 4-10 : Mesures de taux de cendres.

La Figure 4-10 illustre les résultats de mesures de taux de cendres sur masse de bois anhydre.

Les sciures comme les petites plaquettes ont un taux de cendres moyen de 1%.

Les grosses plaquettes contiennent globalement plus de minéraux. La moyenne du lot de grosses plaquettes est égale à 3%.

Relevons le cas des plaquettes n°8 qui laissent 4,8% de leur masse anhydre sous forme de cendres. Ce résultat est certainement dû aux souillures du sol (terre, sable, pierres) entraînées avec le bois au cours de son exploitation.

Les écorces contiennent plus de matières minérales que n'importe quel autre bois fragmenté. Les cendres représentent 8% de la masse initiale anhydre d'écorces. Cela est dû principalement au fait que lors de l'exploitation forestière, les bois sont trainés à même le sol. Par conséquent, l'écorce se charge de terre.

4.2.1.5. Analyse élémentaire

Les analyses élémentaires sont réalisées par le Service Central d'Analyses du CNRS au laboratoire de Vernaion. Nous avons envoyé des échantillons broyés des plaquettes n°1, de sciure n°2 et d'écorce. Les tableaux ci-dessous donnent les résultats d'analyses en carbone, hydrogène, oxygène et azote effectuées sur ces échantillons.

Le Tableau 4-2 donne les résultats bruts rendus par le laboratoire d'analyse élémentaire. Ces résultats sont exprimés en fraction massique sur les échantillons anhydres. Notons que ces résultats sous entendent que 1,4% des plaquettes, 1,5% de la sciure et 4,9% des écorces sont constitués d'autres éléments chimiques que les quatre étudiés.

Le Tableau 4-3 est une conversion des résultats du Tableau 4-2. La conversion consiste à considérer que décrire le combustible avec les quatre éléments est nécessaire et suffisant. Alors les éléments chimiques H, O et N sont exprimés en fraction atomique par rapport au carbone. Ce mode d'expression permet de comparer les résultats de mesures aux formulation données par la littérature (cf. § 2.1.1.2).

	C	H	O	N
plaquette 1	48,07%	6,10%	44,13%	0,30%
sciure 2	47,46%	6,13%	44,58%	0,30%
écorce	48,22%	5,47%	40,98%	0,40%

	C	H	O	N
plaquette 1	1	1,52	0,69	0,005
sciure 2	1	1,55	0,70	0,005
écorce	1	1,36	0,64	0,007

Tableau 4-2 : Répartitions massiques en C, H, O et N. Tableau 4-3 : Répartitions atomiques en C, H, O et N.

Les résultats obtenus sur la sciure et les plaquettes sont quasi identiques : pour un atome de carbone, on a 1,55 atome d'hydrogène, 0,7 atome d'oxygène et 0,005 atome d'azote. Le modèle donné dans l'étude bibliographique est légèrement plus riche en carbone puisqu'il donne 1,44 atome d'hydrogène et 0,66 atome d'oxygène par atome de carbone.

En revanche, l'écorce semble plus riche que le modèle puisque les rapports atomiques en hydrogène et en oxygène sont plus faibles avec respectivement 1,36 et 0,64.

4.2.1.6. Conclusions

La masse volumique apparente anhydre semble dépendante du format des particules et donc de la granulométrie. Ainsi, les lots que nous avons établis sur un critère d'aspect (sciure, petites ou grosses plaquettes, écorces) donnent des résultats bien distincts : la sciure constituée de particules de spectre de tailles étroit a une masse volumique plus faible que les plaquettes dont le spectre de tailles des particules est plus large.

Le pouvoir calorifique supérieur, donné comme globalement constant par l'étude bibliographique, est confirmé par nos mesures comme étant égal à 20500 kJ/kg $\pm 5\%$.

Le taux de cendres dépend beaucoup de la manière dont le bois est exploité. Néanmoins, dès que l'exploitation est faite dans de bonnes conditions, le combustible obtenu produit une masse de cendres selon un rapport d'environ 1% de la masse initiale de combustible anhydre.

L'analyse élémentaire confirme également les données bibliographiques. La molécule $CH_{1,44}O_{0,66}$ prise pour modéliser le bois semble ainsi tout à fait correspondre aux résultats obtenus sur les combustibles étudiés.

4.2.2. Essais de combustion

4.2.2.1. Présentation des résultats

Dans la suite de ce paragraphe, les résultats de combustion obtenus sont présentés de manière identique de façon à pouvoir être comparés aisément. Pour chaque combustible considéré nous présentons les différents résultats d'expériences menées à débit de bois constant, ceci correspondant à une puissance combustible moyenne sur l'expérience. Les expériences faites sur un même combustible sont triées par puissances croissantes. Pour chaque gamme de puissance, deux graphiques présentent les résultats obtenus selon le modèle ci-dessous. Rappelons que la vitesse de rotation de la vis d'alimentation du foyer est fixée durant toute la durée de l'expérience représentée par les graphiques. Chaque point figure le résultat de la moyenne effectuée sur un mode d'une heure de fonctionnement de la chaudière.

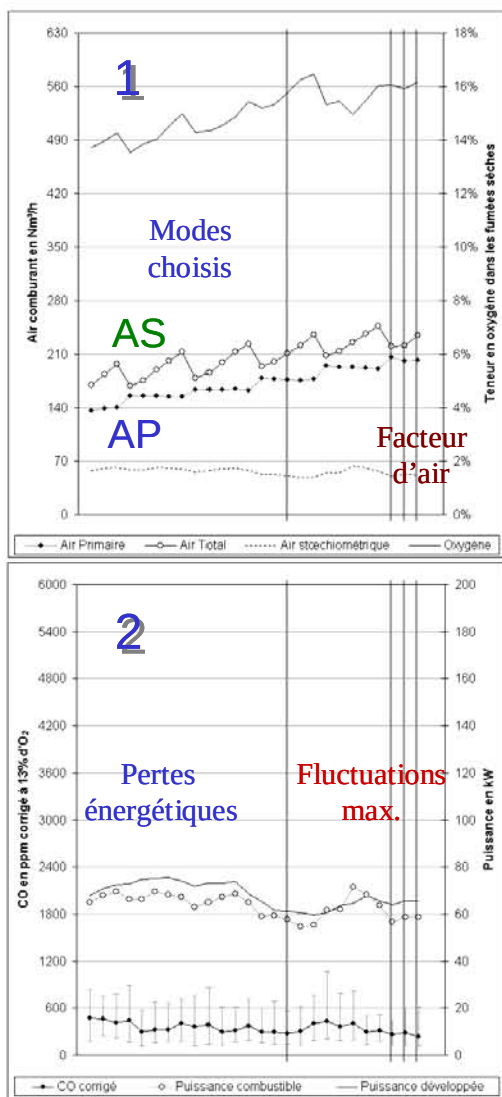


Figure 4-11 : Exemple commenté des résultats d'essai de combustion.

Les deux graphiques sont empilés si bien que les différents résultats d'un mode se correspondent sur une même verticale. Cela permet de surligner les modes les moins polluants de chaque expérience (lignes grises verticales communes aux deux graphiques). En pratique, nous sélectionnons 15% des modes de chaque expérience afin d'établir ultérieurement les tendances propres au fonctionnement peu polluant.

Les valeurs utiles de chaque mode sélectionné sont reprises dans un tableau récapitulatif.

Le graphique 1 présente les conditions d'entrées d'air primaire et secondaire. L'air primaire se lit directement (points noirs et ligne grise) sur l'échelle de gauche. L'air secondaire se déduit de l'écart entre air primaire et air total (cercles noirs et ligne noire). La ligne noire continue représente les mesures de la teneur en oxygène dans les fumées sèches. Ce résultat se lit sur l'échelle de droite. Les mesures de débit d'air et d'oxygène permettent de calculer le débit d'air stoechiométrique qui est représenté par la ligne noire pointillée. On peut donc lire sur ce graphique le facteur d'air qui est le rapport du débit d'air total par le débit d'air stoechiométrique.

Le graphique 2 présente les mesures de monoxyde de carbone corrigées à taux d'oxygène constant (13%). La valeur moyenne est représentée par un rond noir. Les valeurs minimales et maximales lues pendant le mode sont représentées par les barres d'erreurs grises liées à chaque point noir. Les résultats de monoxyde de carbone se lisent sur l'échelle de gauche. Les cercles noirs liés par une ligne grise représentent les mesures de puissance fournie au réseau de chauffage. Cette mesure peut alors être comparée à la puissance combustible (ligne noire continue) calculée à partir des mesures d'air total et d'oxygène représentée sur le graphique 1. On peut donc lire sur ce graphique le rendement global de la chaudière qui est le rapport de la puissance fournie au réseau par la puissance combustible. La puissance fournie au réseau et la puissance combustible se lisent sur l'échelle de droite.

4.2.2.2. Coproduits de première transformation

4.2.2.2.1. Plaquette à 15%

Nous présentons trois essais de combustion réalisés sur des plaquettes de scierie dont l'humidité sur brut est de 15%.

Ces essais sont réalisés avec une puissance combustible moyenne de 65 kW, 110 kW et 150 kW.

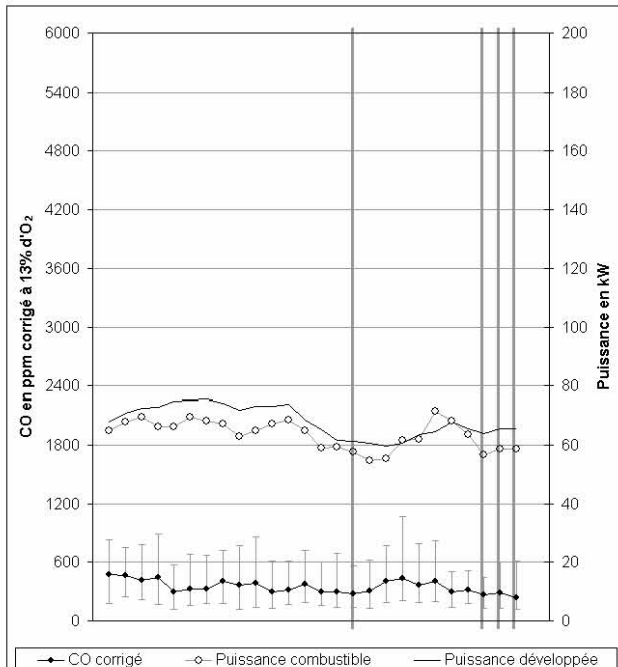
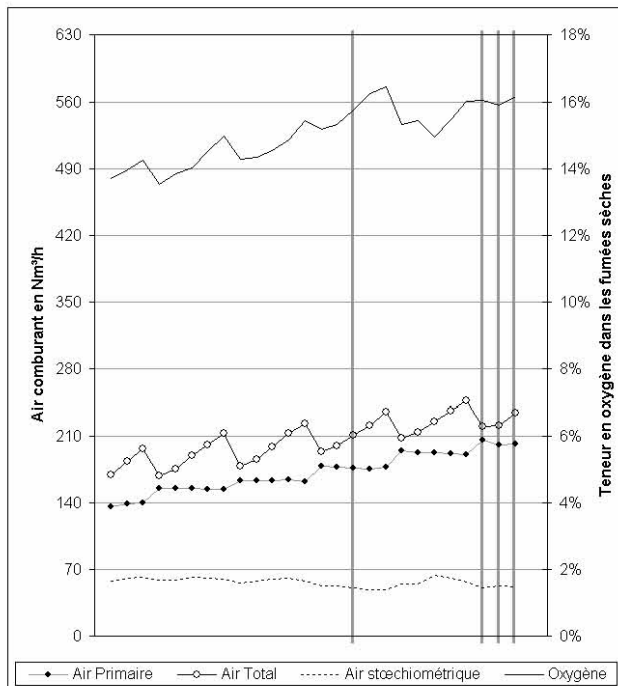


Figure 4-12 : Expérience n°8 à 65 kW

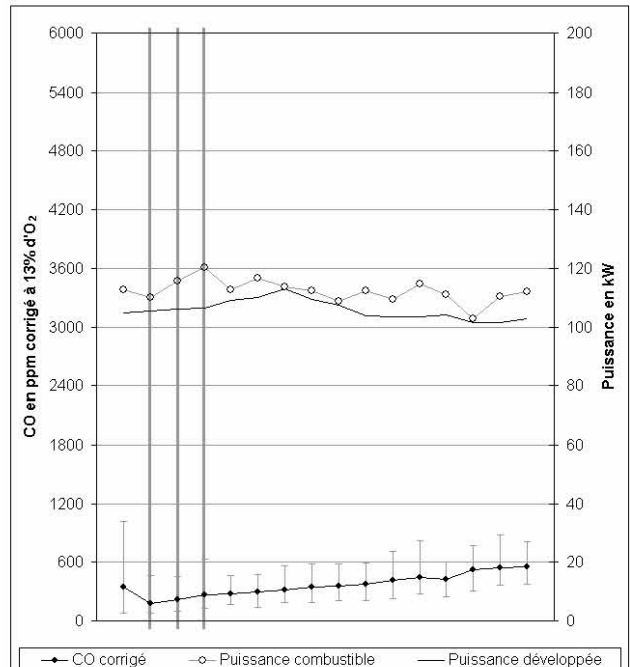
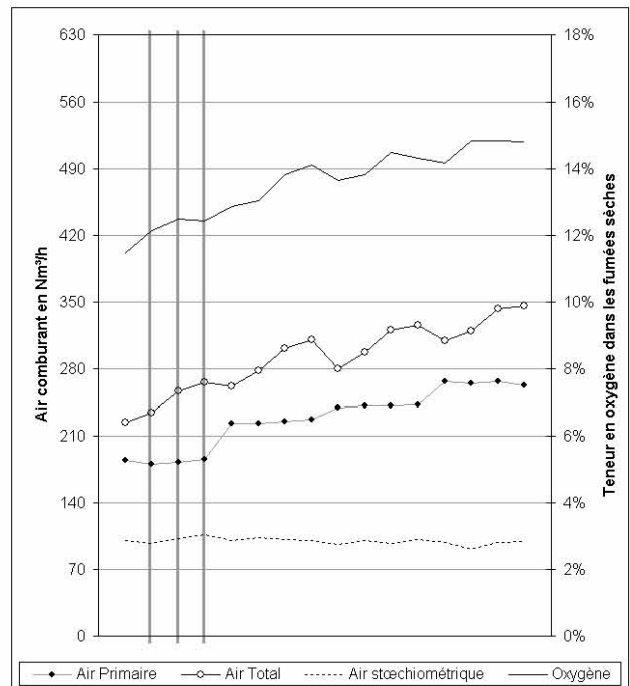


Figure 4-13 : Expérience n°6 à 110 kW

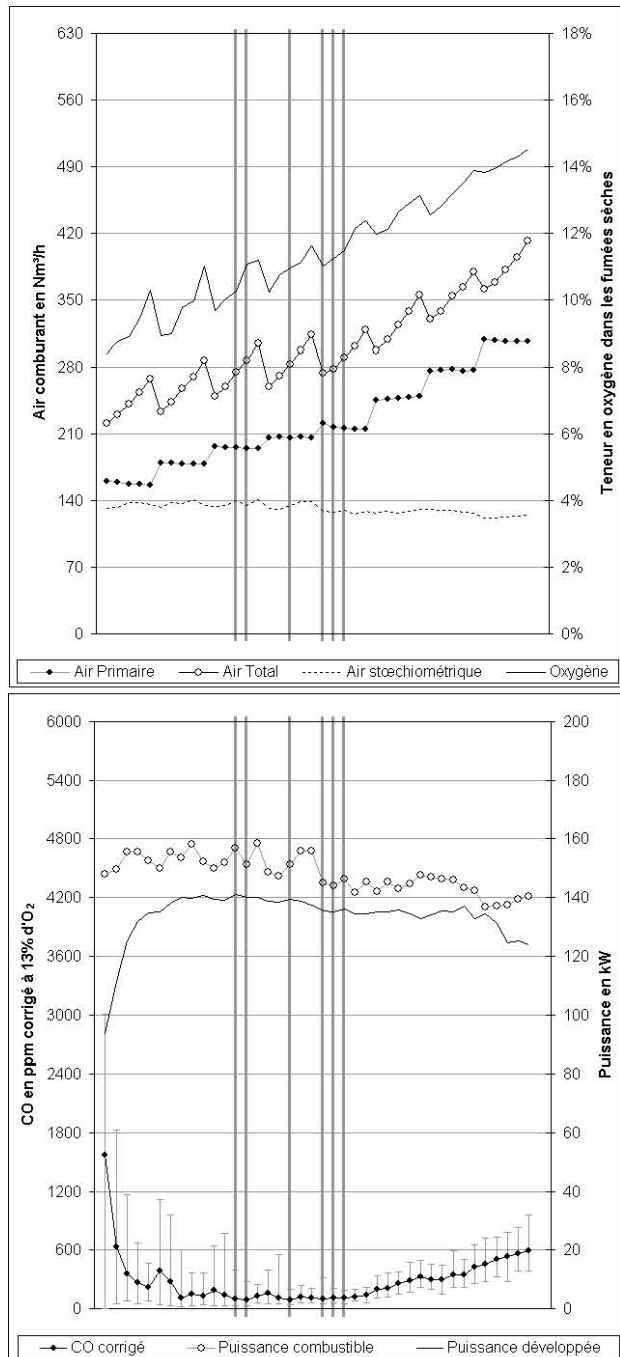


Figure 4-14 : Expérience n°7 à 150 kW

Durant l'expérience n°8 (Figure 4-12), le débit de bois engendre une puissance combustible moyenne de l'ordre de 65 kW. Nous faisons varier le débit d'air primaire selon 7 paliers de 140 Nm³/h à 200 Nm³/h. Durant chaque palier d'air primaire, nous faisons varier l'air secondaire selon 5 paliers de 13 Nm³/h à 60 Nm³/h. Cela représente un facteur d'air total variant de 2,9 à 4,8 et une teneur en oxygène variant entre 13,5% et 16,5%.

Les 26 modes étudiés impliquent que l'on en choisisse 4 : les 4 modes les moins émetteurs de CO. Ils sont obtenus pour un taux d'oxygène proche de 16% ce qui équivaut à un facteur d'air de l'ordre de 4,3.

L'expérience n°6 (Figure 4-13) est l'objet d'une puissance combustible moyenne de 110 kW. Expérience de quatre fois quatre modes, l'air primaire varie de 180 à 270 Nm³/h, l'air secondaire varie de 39 à 84 Nm³/h.

Les 3 modes sélectionnés sont obtenus pour un facteur d'air total de l'ordre de 3,0 correspondant à un taux d'oxygène de 13,8%.

L'expérience n°7 (Figure 4-14) donne une puissance combustible moyenne de 150 kW. Nous faisons varier les débits d'air selon huit paliers d'air primaire et cinq paliers d'air secondaire. L'air primaire évolue entre 150 et 310 Nm³/h, l'air secondaire entre 52 et 102 Nm³/h, le facteur d'air total entre 1,7 et 3,3, l'oxygène entre 8,4% et 14,5%.

Vu l'importance de l'expérience, nous en tirons 6 modes dont les caractéristiques moyennes sont un facteur d'air de 2,1 et un taux d'oxygène de 11%.

Le Tableau 4-4 récapitule les caractéristiques précises de chacun des points sélectionnés.

Le Tableau 4-4 récapitule les caractéristiques précises de chacun des points sélectionnés pour les trois expériences de combustion de plaquettes de scierie à 15% d'humidité sur brut.

Expérience n°	Mode n°	Puissance combustible kW	Air primaire Nm³/h	Air secondaire Nm³/h	Air total Nm³/h	Air stoechio Nm³/h	Facteur d'air	Oxygène	CO ppm @ 13% O ₂	Rendement global
8	33	58,7	202,0	32,0	234,1	52,2	448%	16,2%	234	86,6%
	31	56,8	206,3	14,0	220,4	50,5	436%	16,0%	264	87,0%
	23	57,5	176,6	34,1	210,8	51,2	412%	15,8%	277	89,2%
	32	58,8	201,2	20,1	221,2	52,3	423%	15,9%	284	87,3%
6	7	110,0	180,7	53,7	234,4	97,9	239%	12,1%	173	92,5%
	8	115,5	182,6	74,5	257,0	102,8	250%	12,5%	216	91,8%
	9	120,2	185,7	79,9	265,6	106,9	248%	12,4%	263	91,7%
7	18	151,2	206,2	77,1	283,3	134,5	211%	11,0%	92	90,9%
	14	151,2	195,0	91,9	286,9	134,5	213%	11,1%	92	90,9%
	13	156,9	196,2	78,8	274,9	139,6	197%	10,3%	97	91,9%
	21	144,9	221,6	51,9	273,4	128,9	212%	11,0%	103	90,9%
	23	146,2	216,0	73,6	289,6	130,1	223%	11,5%	104	90,0%
	22	143,9	217,6	60,7	278,3	128,0	217%	11,3%	108	90,6%

Tableau 4-4 : Récapitulatif des résultats sélectionnés lors des essais sur les plaquettes à 15%.

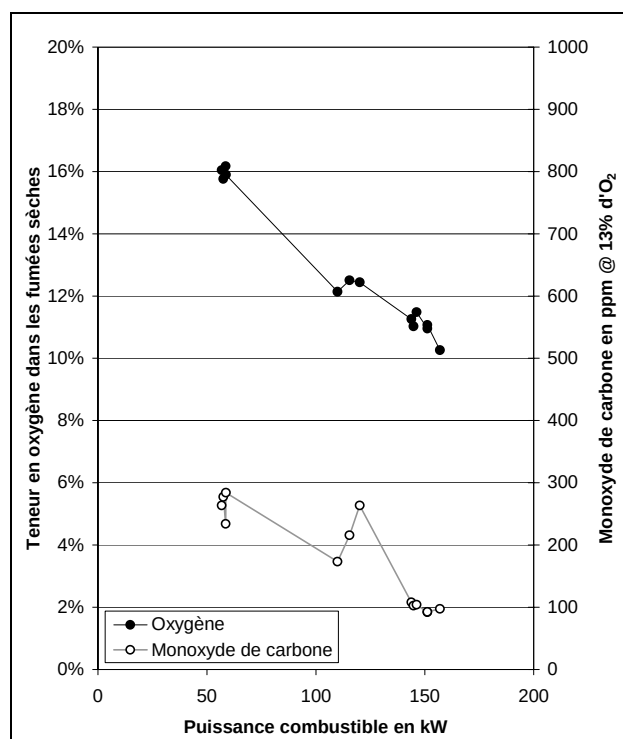


Figure 4-15 : Oxygène et CO des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

Si l'on représente sur un même graphique l'ensemble des points optimaux en fonction de la puissance combustible, on obtient la Figure 4-15 ci-contre.

On note alors que :

- le taux d'oxygène optimal diminue en fonction de la puissance ;
- les émissions de monoxyde de carbone tendent à baisser également lorsque la puissance combustible augmente.

Où un taux d'oxygène d'environ 16% semble requis pour une puissance combustible de l'ordre de 60 kW, il semble falloir 12,5% pour 115 kW et 11% pour 150 kW.

Ce premier résultat est en accord avec les données bibliographiques. De surcroît, il confirme l'importance de notre étude car les régulations de chaudières actuelles n'indexent pas la consigne d'oxygène sur la puissance délivrée, cette consigne est maintenue constante quelle que soit la puissance.

4.2.2.2.2. Sciure à 42%

Coproduit de la première transformation du bois, la sciure représente une large ressource répartie sur tout le territoire. De plus, ce combustible permet de tester l'influence de la granulométrie, si différente de celle des plaquettes, sur les équilibres de la combustion.

Pour ces essais, la sciure est recueillie dans la même scierie que les plaquettes testées dans ce paragraphe. Ainsi, les influences potentielles dues à la composition du mélange de bois peuvent être négligées. Des plaquettes à la sciure ne changent que l'humidité et la granulométrie.

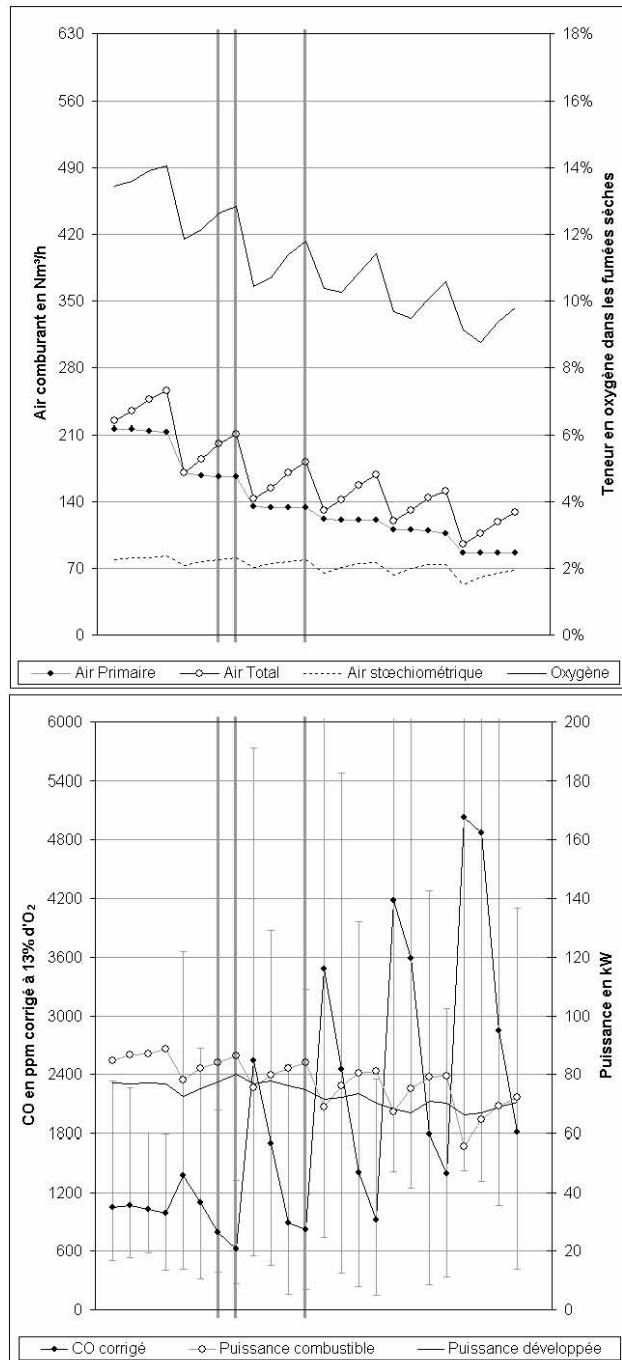


Figure 4-16 : Expérience à 80 kW

Trois expériences sont effectuées pour des puissances combustibles de 80 kW, 130 kW et 190 kW. La sciure utilisée à une humidité sur brut moyenne de 42%.

Durant les essais suivants, nous avons pris le parti de décrémer les débits d'air primaire au cours de l'expérience afin d'installer plus rapidement le régime continu de fonctionnement de la chaudière en début d'expérience et de croiser plus facilement le point d'équilibre.

L'expérience n°19 (Figure 4-16) donne une puissance combustible moyenne de 80 kW. Elle est constituée de six paliers d'air primaire et quatre paliers d'air secondaire. L'air primaire varie entre 214 Nm³/h et 86 Nm³/h, l'air secondaire entre 0 et 45 Nm³/h. Cela représente un facteur d'air total variant entre 1,7 et 3,1 équivalant à un taux d'oxygène variant entre 8,8% et 14%.

Nous retenons trois modes de cette expérience. Les deux meilleurs d'entre eux ont un facteur d'air de 2,6 équivalant à un taux d'oxygène de 12,6%. Le troisième à un taux d'oxygène de 11,8% soit un facteur d'air de 2,3.

L'expérience n°18 (Figure 4-17) d'une puissance moyenne de 130 kW est formée de six fois cinq modes d'air. L'air primaire varie entre 370 Nm³/h et 120 Nm³/h, l'air secondaire entre 10 et 80 Nm³/h. Cela représente un facteur d'air total variant entre 1,7 et 3,1 équivalant à un taux d'oxygène variant entre 8,8% et 14%.

Les quatre modes sélectionnés ont, pour trois d'entre eux un facteur d'air de 2,1 soit un taux d'oxygène de 11%, pour le quatrième un facteur d'air de 1,9 soit 9,8% d'oxygène.

L'expérience n°17 (Figure 4-18) donne une puissance combustible fluctuant entre 180 kW et 200 kW. Elle fait l'objet de cinq paliers d'air primaire variant entre 480 Nm³/h et 190 Nm³/h et cinq paliers d'air secondaire qui varie entre 20 et 85 Nm³/h. Le facteur d'air total varie entre 1,3 et 3,3 soit un taux d'oxygène évoluant entre 4,8% et 14,4%.

Nous retenons de cette expérience trois modes dont le facteur d'air moyen est de 1,8 soit un taux d'oxygène moyen de 9,5%.

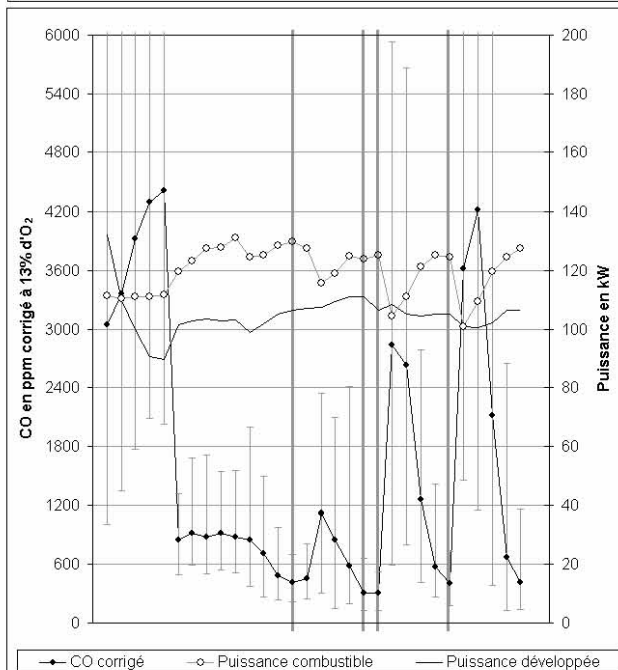
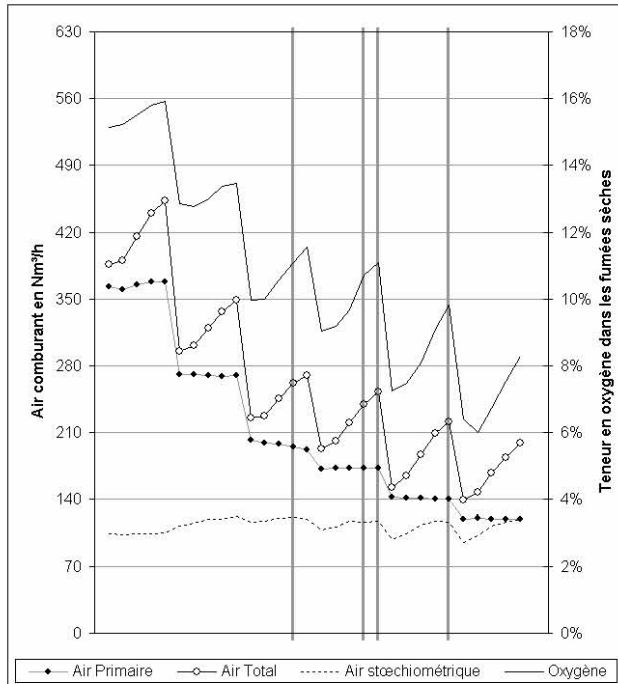


Figure 4-17 : Expérience à 130 kW

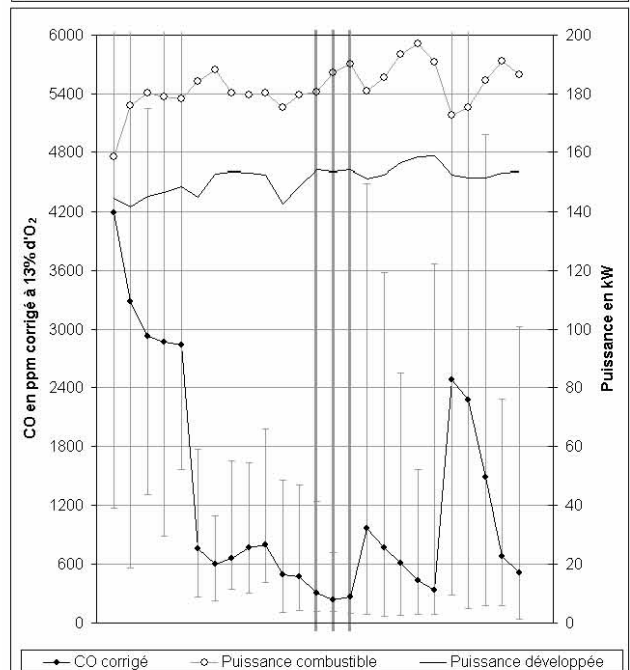
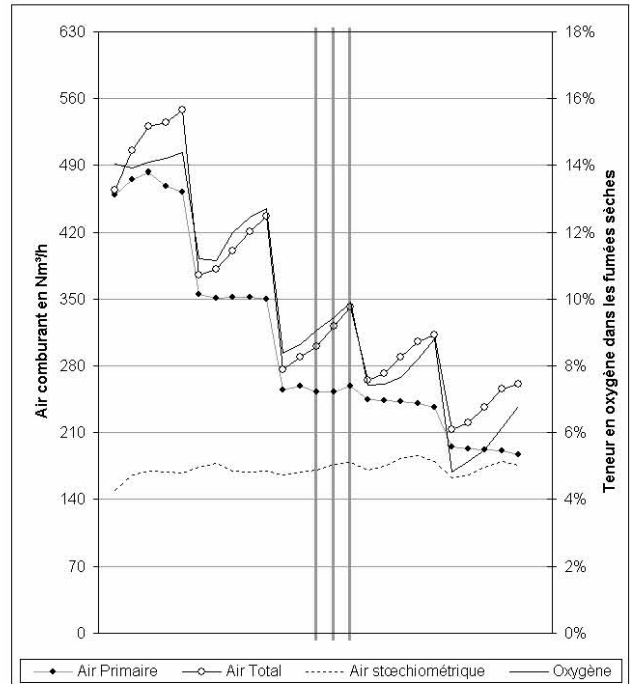


Figure 4-18 : Expérience à 190 kW

L'ensemble des caractéristiques des modes sélectionnés est regroupé dans le Tableau 4-5.

Le Tableau 4-5 récapitule les caractéristiques des modes sélectionnés durant les essais de combustion de la sciure à 42% d'humidité sur brut.

Expérience n°	Mode n°	Puissance combustible kW	Air primaire Nm³/h	Air secondaire Nm³/h	Air total Nm³/h	Air stoechio Nm³/h	Facteur d'air	Oxygène	CO ppm @ 13% O ₂	Rendement global
19	8	86,2	165,9	45,3	211,2	80,8	262%	12,9%	620	91,1%
	7	84,0	165,9	34,6	200,5	78,7	255%	12,6%	790	91,6%
	12	84,0	133,9	48,0	181,9	78,7	231%	11,8%	816	93,4%
18	19	124,0	172,1	67,8	239,9	116,5	206%	10,7%	303	91,3%
	20	125,3	172,8	79,5	252,3	117,7	214%	11,1%	310	90,6%
	25	124,4	140,0	81,4	221,4	116,9	189%	9,8%	401	92,4%
	14	129,9	195,1	66,4	261,5	122,0	214%	11,1%	411	90,8%
17	14	187,3	252,6	69,3	321,9	176,3	183%	9,4%	234	91,3%
	15	190,2	258,5	83,4	341,9	179,0	191%	9,9%	264	90,7%
	13	180,6	252,4	48,4	300,8	169,9	177%	9,1%	309	91,9%

Tableau 4-5 : Récapitulatif des résultats sélectionnés lors des essais sur la sciure à 42%.

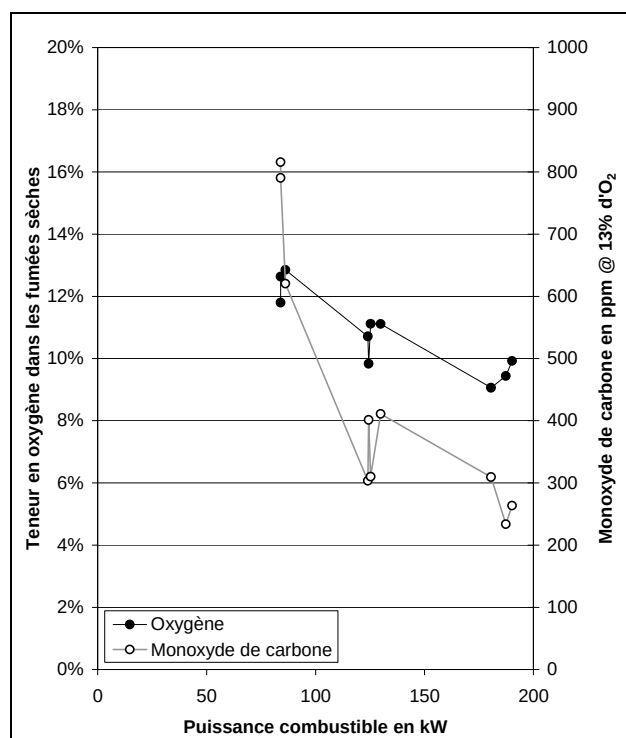


Figure 4-19 : Oxygène et CO des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

Comme dans le cas précédent des plaquettes à 15% d'humidité, le taux d'oxygène optimal et les valeurs d'émissions de CO diminuent lorsque la puissance combustible augmente.

En revanche, l'ordre de grandeur des émissions de CO est multiplié par 3 dans le cas présent de la sciure. Où ces émissions sont d'environ 200 ppm à 100 kW dans le cas des plaquettes à 15% d'humidité sur brut, nous obtenons ici plus de 300 ppm à la même puissance.

Concernant le taux d'oxygène, il semble que celui-ci soit légèrement inférieur à celui demandé pour la plaquette précédente.

4.2.2.2.3. Plaquettes à 51%

Nous cherchons à obtenir un point supplémentaire sur l'échelle des humidités ainsi qu'une redondance sur l'axe granulométrique. Nous optons donc pour un essai sur une plaquette fournie par le même scieur que les deux premiers combustibles testés et dont l'humidité s'avère très élevée avec 51% d'humidité sur brut. Notons qu'une telle valeur de l'humidité correspond à ce que plus de la moitié de la masse du bois utilisé comme combustible soit constituée d'eau.

Dans un souci de clarté et de concision nous avons rejeté les résultats des expériences suivantes en annexe. Les résultats d'expériences réalisées sur ce bois sont accessibles au Paragraphe 7.1.1.1. Nous ne présentons ici que le tableau des points choisis dans chaque expérience.

Le Tableau 4-6 ci-dessous présente les résultats des modes sélectionnés sur quatre expériences effectuées à des puissances combustibles moyennes de 70, 80, 130 et 160 kW. Nous retenons respectivement de ces essais de combustion 3, 4, 3 et 1 modes correspondant à 15% du total des modes de chacun des essais. Les plaquettes utilisées lors de ces essais ont une humidité sur brut moyenne de 51%.

Expérience n°	Mode n°	Puissance combustible kW	Air primaire Nm³/h	Air secondaire Nm³/h	Air total Nm³/h	Air stoechio Nm³/h	Facteur d'air	Oxygène	CO ppm @ 13% O ₂	Rendement global
13	12	67,0	133,8	46,3	180,2	67,4	267%	13,0%	689	93,3%
	7	64,2	173,4	38,0	211,4	64,6	327%	14,4%	715	91,4%
	24	58,8	86,0	46,8	132,8	59,2	224%	11,5%	718	95,1%
10	16	91,5	209,8	23,7	233,6	92,0	254%	12,6%	644	91,6%
	13	98,7	176,3	51,0	227,3	99,3	229%	11,7%	747	92,8%
	3	94,3	116,7	53,8	170,5	94,9	180%	9,2%	787	95,0%
	2	87,1	116,5	36,6	153,1	87,6	175%	8,9%	790	95,3%
11	21	136,2	244,6	35,3	279,9	137,0	204%	10,6%	511	89,5%
	16	144,2	221,3	38,9	260,1	145,0	179%	9,2%	592	91,3%
	18	147,2	219,0	59,5	278,6	148,0	188%	9,7%	660	90,6%
15	4	187,0	287,6	68,6	356,1	188,1	189%	9,8%	128	91,1%

Tableau 4-6 : Récapitulatif des résultats sélectionnés lors des essais sur les plaquettes à 51%.

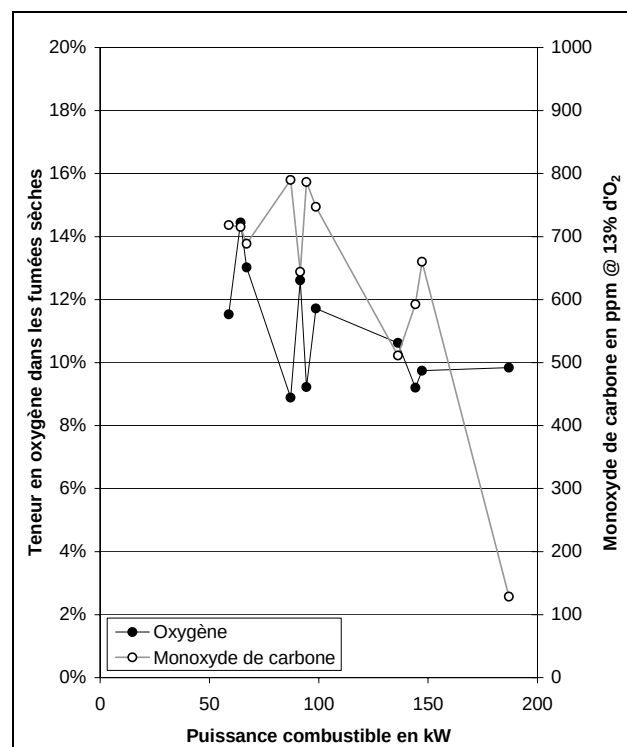


Figure 4-20 : Oxygène et CO des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

La Figure 4-20 représente les résultats d'oxygène et d'émissions de CO des modes sélectionnés des quatre essais de combustion effectués sur les plaquettes à 51% d'humidité sur brut.

Les résultats obtenus fluctuent beaucoup tant pour le taux d'oxygène que pour les émissions de CO.

On note une augmentation des émissions de CO de l'ordre de 50% par rapport aux émissions obtenues avec la sciure, lesquelles émissions sont trois fois plus élevées qu'avec les plaquettes à 15%.

Malgré les fortes fluctuations, on retrouve la diminution du CO et de l'oxygène avec l'augmentation de la puissance.

4.2.2.2.4. Discussion

Nous opérons la synthèse des essais de combustion réalisés sur ces trois premiers combustibles. Nous représentons sur une même figure les résultats des modes sélectionnés de toutes les expériences. Cela revient à confronter des différences de granulométrie et d'humidité du combustible.

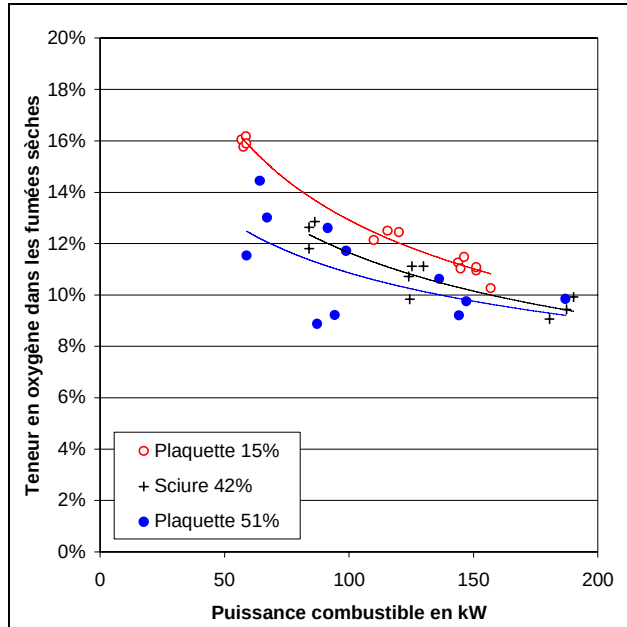


Figure 4-21 : Oxygène des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

La Figure 4-21 représente la teneur en oxygène en fonction de la puissance. Des courbes de tendances de la forme :

$$y = A.x^B$$

sont calculées automatiquement par la méthode des moindres carrés.

Les tendances se stratifient selon l'humidité du combustible : à puissance combustible donnée, un combustible humide requiert un facteur d'air plus faible qu'un combustible sec.

Ce phénomène semble être d'autant plus marqué que la puissance est faible.

La granulométrie ne semble pas avoir d'influence sur cet équilibre air-combustible car la sciure est encadrée par des plaquettes.

Ce premier résultat nous mènerait à penser que la taille des particules de bois a peu d'influence sur les équilibres de la combustion.

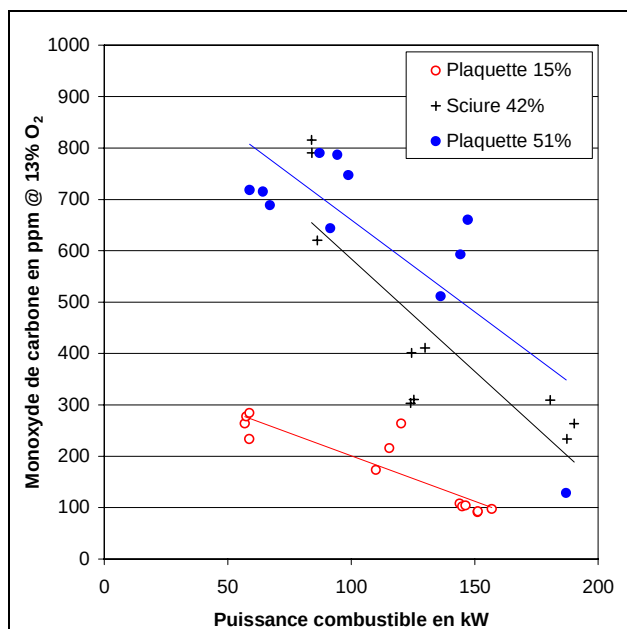


Figure 4-22 : Emissions de monoxyde de carbone en fonction de la puissance.

La Figure 4-22 représente les émissions de monoxyde de carbone en fonction de la puissance combustible. Les courbes de tendance sont ici des droites. La tendance globale traduit une diminution des émissions de monoxyde de carbone lorsque la puissance combustible augmente.

Manifestement, l'humidité du bois favorise la production de monoxyde de carbone.

Un facteur quatre existe entre le monoxyde de carbone émis par un bois à 15% et un bois à 51%.

Ces résultats ne semblent pas faire de distinctions particulières pour la sciure par rapport aux plaquettes.

Le paramètre d'influence demeure la seule humidité du bois.

Concernant la granulométrie, ces résultats ne sont pas surprenants. Que la particule de bois ait quelques centimètres ou quelques millimètres de dimension caractéristique, celle-ci est petite devant la taille du

foyer. De plus, le flux de particule, de l'ordre de quelques dizaines de kilogrammes par heure, fait que, sous forme de plaquettes ou de sciure, les particules sont toujours nombreuses à brûler simultanément dans le foyer. On peut donc avancer que, dans notre cadre d'étude, la granulométrie n'est pas un facteur influent sur les conditions de la combustion.

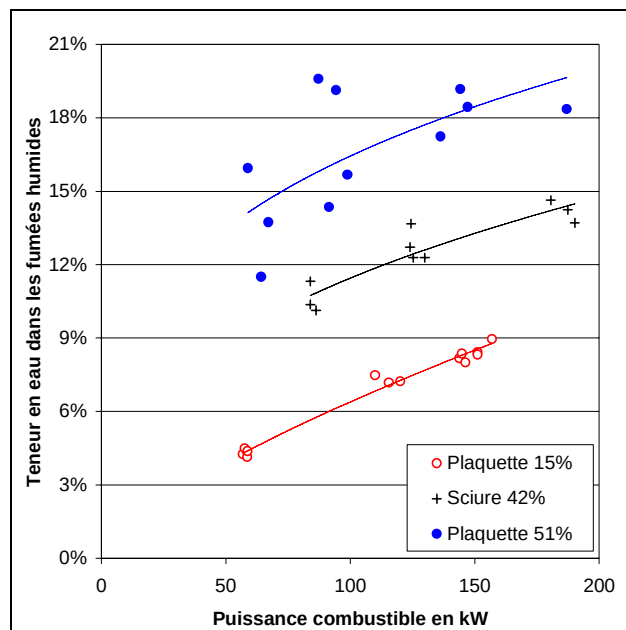


Figure 4-23 : Teneur en eau dans les fumées humides en fonction de la puissance.

En revanche, l'humidité du bois semble avoir une influence sensible sur la combustion.

La Figure 4-23 représente la fraction volumique (égale à la fraction molaire pour un gaz) occupée par l'eau dans les fumées humides en fonction de la puissance combustible. Les courbes de tendance sont de la forme :

$$y = A.x^B$$

La quantité d'eau apportée par le bois fait varier la composition des fumées comme en témoigne la Figure 4-23. L'eau représente entre 4% et 9% des fumées humides pour un bois à 15% d'humidité sur brut et représente 14% à 20% des fumées pour un bois à 51% d'humidité.

Cette augmentation de la quantité d'eau dans les fumées augmente le débit de celles-ci et joue donc sur la température, ce qui peut avoir un rôle sur la cinétique des réactions d'oxydation.

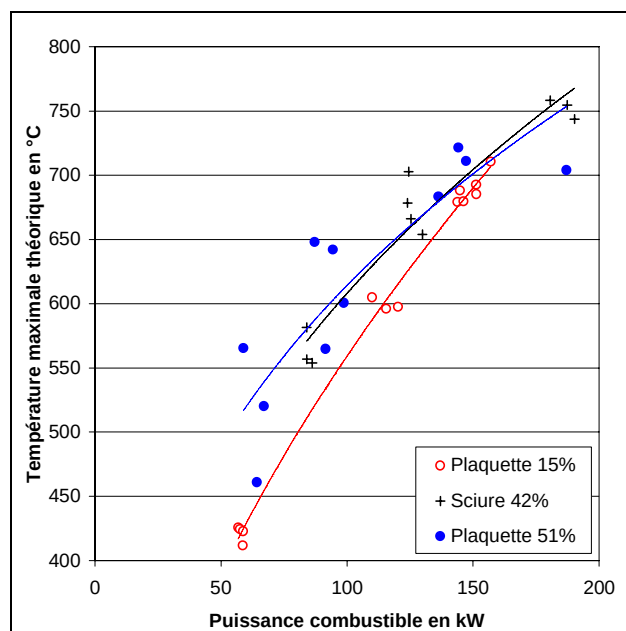


Figure 4-24 : Température des fumées en sortie du foyer en fonction de la puissance.

L'humidité du bois absorbe une partie de l'énergie de combustion pour se vaporiser. Ce phénomène devrait, en plus de l'augmentation de la quantité de fumées, en baisser la température.

La Figure 4-24 représente la température des fumées mesurée en sortie de foyer en fonction de la puissance.

Or, les mesures de la température en sortie de foyer ne révèlent qu'un très faible écart entre les essais. Les tendances contredisent même nos prévisions : la température de sortie de foyer lors de la combustion d'un bois sec est plus faible que dans le cas d'un bois plus humide.

Autrement dit, si l'humidité du combustible augmente, alors le facteur d'air diminue afin de maintenir une température des gaz suffisante à l'oxydation des gaz.

Pour mieux comprendre et appréhender le rôle de l'humidité sur les émissions de monoxyde de carbone, nous choisissons de réaliser des essais avec d'autres valeurs de l'humidité.

Résultats expérimentaux

4.2.2.3. Coproduits d'exploitation forestière

Les conclusions issues des essais précédents nous amènent à étendre la gamme d'humidité des combustibles, et ce, tout en maintenant autant que possible une granulométrie et une composition d'essences constante. La meilleure ressource est, par conséquent, une entreprise locale de broyage dont le gisement est constitué essentiellement de résineux. Cette entreprise exploite un unique broyeur qui permet d'obtenir des plaquettes d'une très bonne régularité granulométrique.

Nous faisons des essais sur des plaquettes forestières d'humidité variant de 28% à 63%.

Nous ne présentons aucun résultat d'essai de combustion de plaquettes forestières à 63% d'humidité sur brut car la combustion n'est pas entretenue dans ces conditions. Les essais présentés sont réalisés sur des bois à 28%, 30%, 36% et 51% d'humidité sur brut.

Notons que les expériences effectuées sur la plaquette à 30% présentent une redondance de modes déjà étudiés. Ceci est dû au fait qu'à chaque mode d'air étudié, nous faisons varier la vitesse moyenne des grilles mobiles de la chaudière. Dans ce cas d'étude, il semble que cette vitesse de déplacement des grilles n'influence pas les équilibres de combustion.

Vu l'importance particulière apportée à l'humidité du bois utilisé, celle-ci est mesurée régulièrement au cours de l'essai plutôt qu'une unique fois comme durant les premiers essais. Nous présentons donc l'évolution de l'humidité de chacun des bois testés au cours de leur utilisation.

4.2.2.3.1. Plaquette à 28%

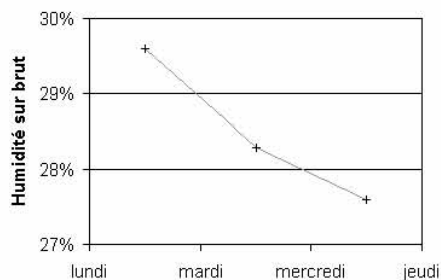


Figure 4-25 : Evolution de l'humidité du combustible au cours des expériences.

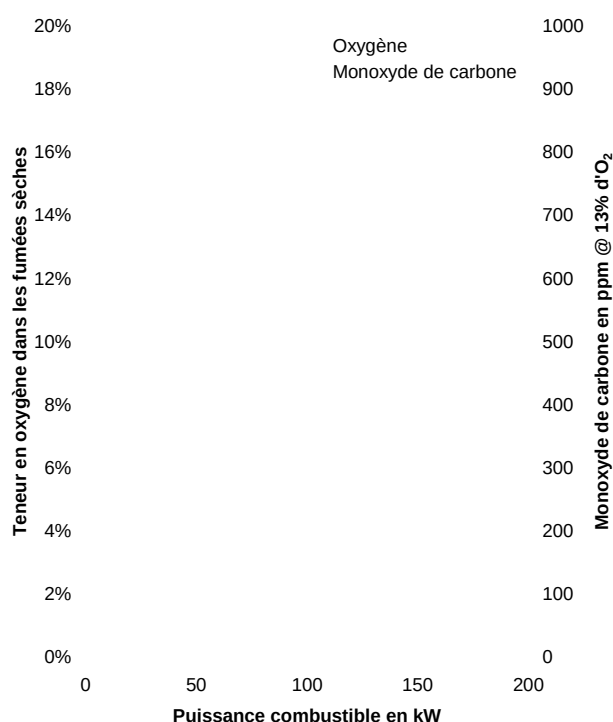
La Figure 4-25 représente l'évolution de l'humidité sur brut du bois au cours de son utilisation.

Ces plaquettes présentent une humidité sur brut approximativement égale à une moyenne 28%. En réalité l'humidité a légèrement décru durant l'essai de 29,7% à 27,7% trois jours plus tard, ce qui n'est pas vraiment significatif.

De cet essai nous retenons quatre expériences à 90, 100, 120 et 170 kW dont les caractéristiques des points optimaux sont relevés dans le tableau ci-dessous.

Expérience	Mode	Puissance combustible	Air primaire	Air secondaire	Air total	Air stoechio	Facteur d'air	Oxygène	CO	Rendement global
n°	n°	kW	Nm³/h	Nm³/h	Nm³/h	Nm³/h			ppm @ 13% O ₂	
4	28	91,3	120,4	46,7	167,1	83,3	201%	10,5%	94	93,2%
4	24	88,6	134,9	46,0	181,0	80,9	224%	11,5%	112	91,8%
4	23	87,6	134,6	34,6	169,2	80,0	212%	11,0%	175	92,6%
4	20	86,1	147,6	49,0	196,7	78,6	250%	12,5%	193	90,3%
1	1	100,7	206,3	0,0	206,3	92,6	223%	11,5%	142	91,2%
1	26	89,4	142,6	41,7	184,2	82,2	224%	11,5%	206	93,0%
1	22	89,4	155,5	42,3	197,8	82,2	241%	12,2%	277	92,2%
1	18	87,5	176,8	44,3	221,1	80,4	275%	13,2%	299	90,7%
5	24	107,0	167,6	54,9	222,4	97,7	228%	11,7%	90	89,2%
5	20	104,8	193,5	53,9	247,4	95,7	259%	12,8%	132	87,4%
5	23	104,2	169,0	34,1	203,2	95,2	213%	11,1%	197	90,3%
2	28	114,2	149,5	94,2	243,7	104,5	233%	11,9%	31	90,8%
2	27	111,7	146,0	67,5	213,5	102,2	209%	10,9%	86	92,4%
2	26	107,3	145,2	37,3	182,5	98,1	186%	9,6%	98	93,7%
2	24	107,4	171,4	92,5	263,8	98,2	269%	13,1%	144	88,7%
3	28	175,2	162,7	83,9	246,6	160,0	154%	7,3%	0,7	90,8%
3	24	173,4	183,7	86,7	270,4	158,3	171%	8,6%	0,9	89,3%
3	19	166,2	199,4	65,1	264,4	151,7	174%	8,9%	2,0	89,3%
3	20	169,2	200,7	92,2	292,9	154,5	190%	9,9%	2,1	87,9%

Tableau 4-7 : Récapitulatif des résultats sélectionnés lors des essais sur les plaquettes à 28%.



La Figure 4-26 représente les résultats d'oxygène et d'émissions de CO des modes sélectionnés des cinq essais de combustion effectués sur les plaquettes à 28% d'humidité sur brut.

Relevons le résultat remarquable de l'expérience à 170 kW durant laquelle le seuil de détection de notre analyseur de gaz est dépassé si bien que la moyenne de CO calculée durant ce mode vaut 0,7 ppm.

Une vérification de calibration de l'appareil a permis de valider ces mesures.

Les résultats fluctuent beaucoup mais la tendance déjà remarquée dans les premiers essais de combustion est respectée : le taux d'oxygène et les émissions de monoxyde de carbone diminuent lorsque la puissance augmente

Figure 4-26 : Oxygène et CO des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

4.2.2.3.2. Plaquette à 30%

Cet essai, en plus d'étudier les équilibres air-combustible, nous a permis d'étudier l'influence de la vitesse des grilles mobiles sur la combustion. Nous souhaitons voir une différence de qualité de la combustion due à un étalement différent du lit combustible engendré par l'action des grilles mobiles.

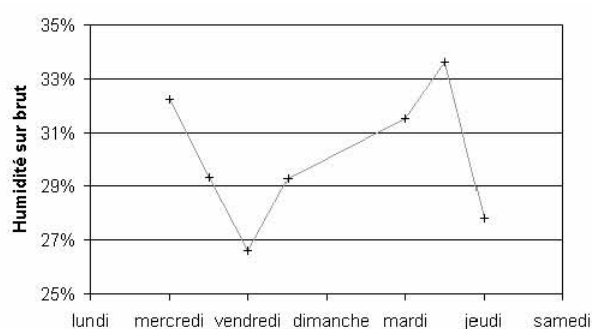


Figure 4-27 : Evolution de l'humidité du combustible au cours des expériences.

La Figure 4-27 représente l'évolution de l'humidité sur brut du bois au cours de son utilisation.

L'humidité du bois varie durant l'essai à cause d'une hétérogénéité d'humidité du bois livré. L'humidité sur brut moyenne est de 30%.

Cette étude de la vitesse des grilles nous a permis, entr'autres résultats, d'obtenir une redondance de modes de mesure à paramétrage d'air identique.

Nous retenons de ces essais quatre expériences à 100, 120 et 180 kW. Notons les résultats remarquables que nous avons obtenus à 180 kW pour lesquels notre analyseur de gaz n'a presque plus détecté de CO pendant plusieurs heures. Le Tableau 4-8 ci-dessous regroupe les caractéristiques des modes optimaux de chacune des expériences retenues.

Expérience n°	Mode n°	Puissance combustible kW	Air primaire Nm³/h	Air secondaire Nm³/h	Air total Nm³/h	Air stoechio Nm³/h	Facteur d'air	Oxygène	CO ppm @ 13% O ₂	Rendement global
23	17	91,1	221,5	31,3	252,9	84,4	300%	13,9%	187	89,6%
	13	95,3	189,7	74,4	264,1	88,3	299%	13,9%	218	90,1%
26	57	113,3	136,3	55,8	192,2	104,0	185%	9,6%	30	92,1%
	37	113,8	162,2	47,2	209,4	104,4	201%	10,5%	34	91,1%
	41	117,2	167,2	58,9	226,1	107,5	210%	10,9%	40	90,5%
	45	120,1	164,6	66,7	231,3	110,3	210%	10,9%	42	90,6%
	39	118,3	163,4	46,7	210,0	108,6	193%	10,1%	42	91,5%
	42	119,2	164,2	55,6	219,8	109,4	201%	10,5%	43	91,1%
	40	119,1	165,2	47,7	213,0	109,4	195%	10,1%	43	91,5%
	58	104,9	137,9	57,1	195,0	96,3	203%	10,6%	45	91,3%
24	3	169,3	237,7	33,1	270,8	154,5	175%	9,0%	0,1	91,3%
	4	167,5	238,3	34,3	272,5	152,8	178%	9,2%	1,1	91,1%
25	19	159,4	235,3	31,4	266,7	147,4	181%	9,3%	0,0	91,3%
	25	172,6	240,4	43,2	283,6	159,5	178%	9,1%	0,0	90,9%
	26	170,9	240,8	42,8	283,5	158,0	179%	9,2%	0,0	90,8%
	27	171,7	238,6	41,9	280,6	158,7	177%	9,1%	0,0	90,9%
	28	172,6	235,1	42,1	277,1	159,5	174%	8,9%	0,0	91,1%
	21	163,9	241,0	40,7	281,7	151,5	186%	9,6%	0,0	90,9%

Tableau 4-8 : Récapitulatif des résultats sélectionnés lors des essais sur les plaquettes à 30%.

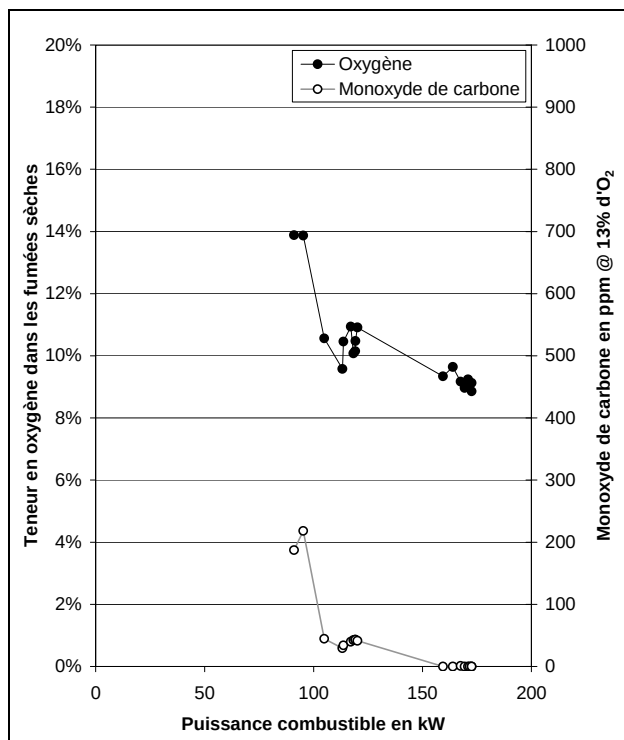


Figure 4-28 : Oxygène et CO des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

La Figure 4-28 représente les résultats d'oxygène et d'émissions de CO des modes sélectionnés des quatre essais de combustion effectués sur les plaquettes à 30% d'humidité sur brut.

Sans surprise, ces résultats d'essais de combustion révèlent une baisse du taux d'oxygène optimal en fonction d'une puissance combustible croissante.

Les émissions de CO suivent ce qui semble devenir une règle : plus la puissance combustible augmente et plus les émissions minimales de CO baissent.

Comme dans le cas précédent de combustion de plaquettes à 28%, les émissions de monoxyde de carbone descendent en dessous du seuil de détection de l'analyseur de gaz. Ce phénomène a également lieu pour une puissance combustible avoisinant 180 kW.

Notons l'absence totale d'influence de la vitesse de déplacement des grilles sur les conditions de combustion.

4.2.2.3.3. Plaquette à 36%

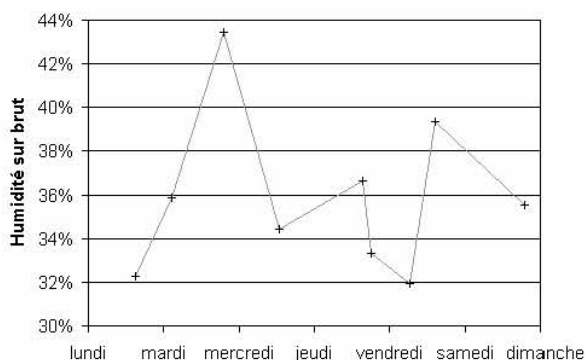


Figure 4-29 : Evolution de l'humidité du combustible au cours des expériences.

La Figure 4-29 représente l'évolution de l'humidité sur brut du bois au cours de son utilisation.

Pour cet essai et le suivant nous avons reçu le bois dans des grands sacs à gravats d'environ 1,5 MAP. Ce format d'approvisionnement nous a facilité la manipulation mais n'a pas permis une homogénéisation globale du bois livré. Cela a induit des disparités de l'humidité comme en témoignent nos mesures reportées dans le graphique ci-contre.

Comprenons alors que pour obtenir un bois d'une telle humidité, ce dernier doit être stocké quelques semaines sous abri.

C'est donc lors de l'ensachage que notre fournisseur a tiré du bois d'humidité différente. Néanmoins, ces variations n'ont pas de conséquences directes sur nos calculs car ceux-ci prennent en compte l'humidité courante du bois utilisé.

De cet essai, nous retenons sept expériences réalisées à 90, 100, 140, 150, 175 et 180 kW dont les modes liés à un minimum d'émissions de CO sont relevés dans le tableau ci-dessous.

Les essais réalisés sont beaucoup plus courts. C'est pourquoi, suivant notre règle de sélectionner 15% des modes les moins émetteurs de monoxyde de carbone dans chaque essai, ne sont sélectionnés qu'un ou deux modes par essai de combustion.

Expérience	Mode	Puissance combustible	Air primaire	Air secondaire	Air total	Air stoechio	Facteur d'air	Oxygène	CO	Rendement global
n°	n°	kW	Nm³/h	Nm³/h	Nm³/h	Nm³/h			ppm @ 13% O ₂	
28	4	94,6	168,7	65,8	234,5	88,7	264%	13,0%	186	88,5%
28	3	92,2	167,6	46,1	213,6	86,4	247%	12,4%	194	89,7%
31	6	98,1	133,6	62,8	196,4	91,7	214%	11,1%	97	90,8%
31	5	94,7	132,7	43,8	176,5	88,5	199%	10,4%	144	91,8%
29	4	130,8	180,4	63,3	243,7	122,3	199%	10,4%	53	89,2%
29	3	131,6	180,2	44,9	225,1	123,0	183%	9,5%	58	90,3%
32	4	138,5	164,0	69,8	233,8	129,4	181%	9,3%	48	89,6%
32	8	136,2	183,1	68,9	252,0	127,3	198%	10,3%	58	87,7%
27	8	153,5	182,4	64,2	246,6	142,2	173%	8,8%	1,1	90,8%
27	11	141,2	210,5	42,5	253,0	130,8	193%	10,1%	1,7	89,3%
30	8	175,1	228,8	59,4	288,2	163,7	176%	9,0%	15	87,5%
30	7	167,8	228,6	41,3	269,8	156,8	172%	8,7%	29	88,1%
33	8	167,2	231,1	64,0	295,1	156,2	189%	9,8%	14	85,5%

Tableau 4-9 : Récapitulatif des résultats sélectionnés lors des essais sur les plaquettes à 36%.

Résultats expérimentaux

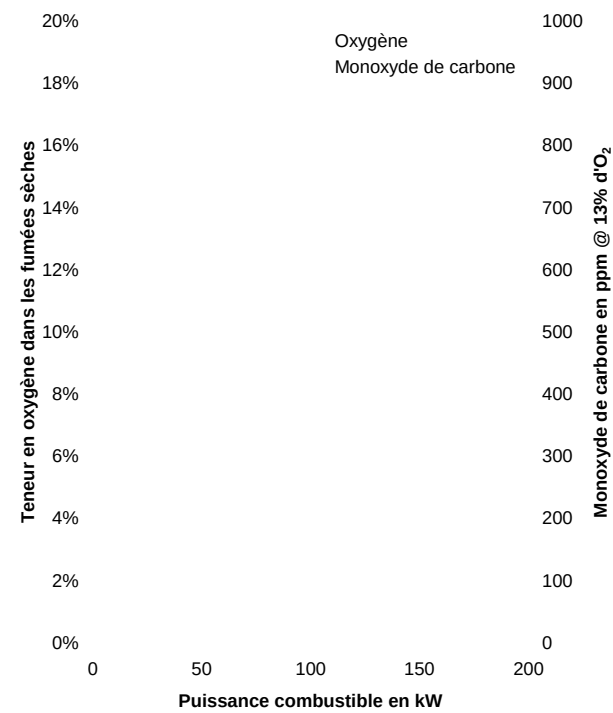


Figure 4-30 : Oxygène et CO des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

La Figure 4-30 représente les résultats d’oxygène et d’émissions de CO des modes sélectionnés des sept essais de combustion effectués sur les plaquettes à 36% d’humidité moyenne.

Malgré la multitude d’essais de combustion différents à l’origine de ces résultats Figure 4-30, la dispersion des points est très faible. Ce constat valide une relative reproductibilité de nos essais de combustion.

Notons que nous obtenons de meilleurs résultats de monoxyde de carbone durant l’expérience n°27 pour une puissance avoisinant 150 kW que durant les expériences n°30 et n°33 bien que leur puissance soit supérieure à 150 kW. Ce phénomène peut être dû à une humidité du bois plus élevée. L’expérience n°27 est réalisée avec du bois à 32% alors que les expériences n°30 et n°33 sont réalisées avec du bois à 36%. Il est tout de même étonnant qu’une si faible différence d’humidité puisse avoir des conséquences visibles.

4.2.2.3.4. Plaquette à 51%

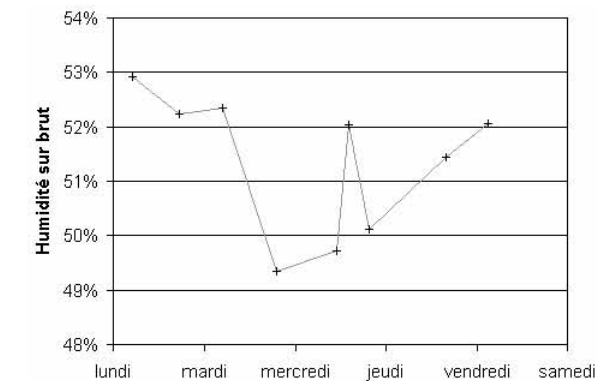


Figure 4-31 : Evolution de l’humidité du combustible au cours des expériences.

La Figure 4-31 représente l’évolution de l’humidité sur brut du bois au cours de son utilisation.

Selon le même type d’approvisionnement que l’expérience précédente, nous recevons le bois dans des sacs. Aux mêmes causes, les mêmes conséquences : l’humidité du bois utilisé varie au cours des expériences. De surcroît, quelles que soient les conditions climatiques, un bois à plus de 50% d’humidité fermente, donc monte en température, et sèche spontanément. Malgré tout, l’emploi de sacs et la rapidité d’utilisation nous permettent de maintenir l’humidité à la valeur que nous souhaitons.

De cet essai, nous retenons quatre expériences à 110, 150 et 190 kW. Le tableau ci-dessous reprend les caractéristiques des modes les moins émetteurs de CO de chacune des expériences.

Expérience	Mode	Puissance combustible	Air primaire	Air secondaire	Air total	Air stoechio	Facteur d'air	Oxygène	CO	Rendement global
n°	n°	kW	Nm³/h	Nm³/h	Nm³/h	Nm³/h			ppm @ 13% O ₂	
36	4	93,4	131,6	62,8	194,3	94,5	206%	10,7%	918	92,6%
36	15	89,9	173,9	49,3	223,1	91,0	245%	12,3%	938	89,8%
37	5	92,7	140,5	45,9	186,4	93,6	199%	10,4%	488	92,1%
35	16	123,3	243,8	58,7	302,5	122,9	246%	12,4%	430	87,5%
35	12	131,5	210,2	64,8	275,1	131,0	210%	10,9%	500	89,8%
34	7	165,7	227,8	44,4	272,2	168,3	162%	8,0%	99	91,9%

Tableau 4-10 : Récapitulatif des résultats sélectionnés lors des essais sur les plaquettes à 51%.

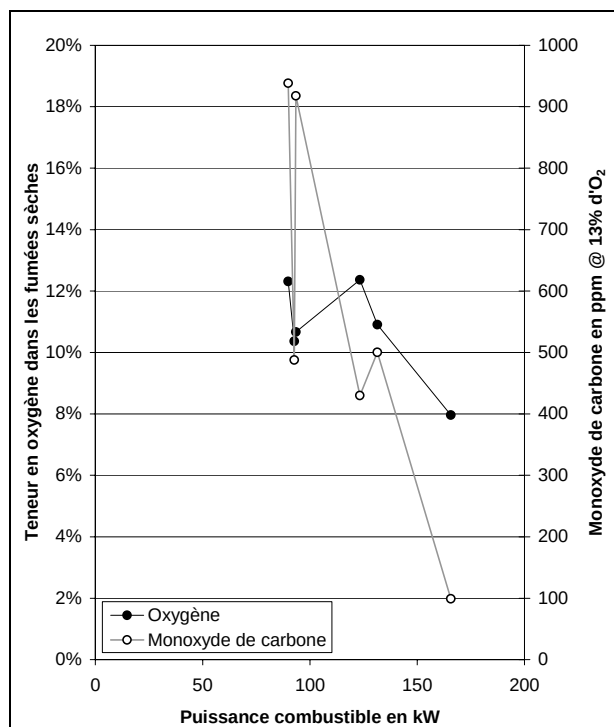


Figure 4-32 : Oxygène et CO des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

La Figure 4-32 représente les résultats d'oxygène et d'émissions de CO des modes sélectionnés des quatre essais de combustion effectués sur les plaquettes à 51 % d'humidité moyenne.

Les expériences n°36 et n°37 ont des résultats surprenants : leurs puissances sont très proches aux environ de 90 kW, malgré cela les émissions de CO sont très différentes avec 930 ppm pour l'expérience n°36 et 490 ppm pour l'expérience n°37.

En revanche, les variations du taux d'oxygène dans l'expérience n°36 ne sont pas étonnantes car les essais de combustion réalisés avec du bois très humide ont déjà donné de fortes variations.

Notons les faibles émissions de CO obtenues lors de l'expérience n°34 dont la puissance est de 166 kW.

4.2.2.3.5. Plaquette à 63%

Rappelons que nous devons présenter ici des résultats sur un bois d'humidité supérieure à celles présentées jusqu'alors. Seulement, le bois qui nous a été livré, d'une humidité sur brut égale à 63%, n'a jamais voulu brûler même lorsque nous l'avons introduit dans la chaudière après que celle-ci ait fonctionné plusieurs heures à plein régime avec du bois plus sec. Thermiquement parlant, ce bois à 63% d'humidité dépassait une limite pour laquelle les flux d'énergies utiles à la dégradation du bois solide et à l'évaporation de l'eau liquide sont trop élevés pour entretenir la combustion avec des températures suffisantes.

L'étude de ces flux d'énergie serait intéressante mais elle dépasse le cadre de la présente étude des équilibres air-combustible.

4.2.2.4. Discussion

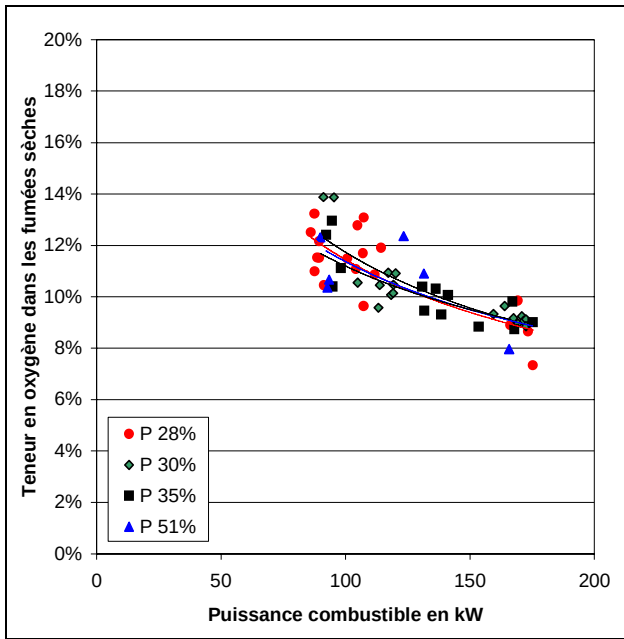


Figure 4-33 : Oxygène des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

Si nous reportons sur un même graphique, en fonction de la puissance combustible, l'ensemble des taux d'oxygène optimaux de chacune des expériences menées sur des plaquettes forestières d'humidité différentes, nous obtenons la Figure 4-33 ci-contre.

La tendance précédente se retrouve ici : lorsque la puissance augmente le taux d'oxygène optimum baisse.

Concernant l'humidité, contrairement aux tendances obtenues précédemment, les différences de taux d'oxygène optimal entre les expériences sont invisibles. Les évolutions de l'oxygène en fonction de la puissance sont mêlées alors que, d'une expérience à l'autre, l'humidité varie nettement.

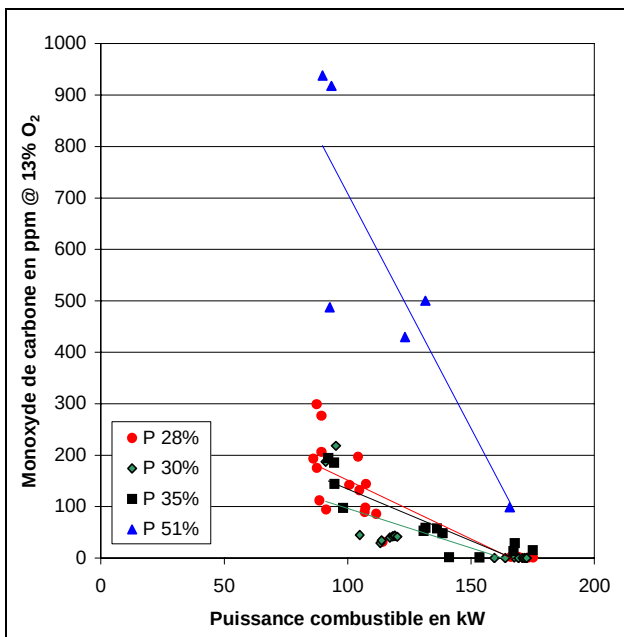


Figure 4-34 : Emissions de monoxyde de carbone en fonction de la puissance.

La Figure 4-34 représente les plus faibles émissions de monoxyde de carbone des essais de combustion réalisés sur des bois d'humidités variables.

Les résultats obtenus sur les plaquettes à 51% d'humidité sur brut moyenne se distinguent clairement des autres résultats. Les plaquettes à 51% produisent près de quatre fois plus de monoxyde de carbone que les plaquettes d'humidité avoisinant 30%.

Les trois plaquettes d'humidités inférieures ou égales à 35% n'engendrent pas de résultats distincts qui permettraient de visualiser une influence de l'humidité.

Il apparaît aussi clairement que les émissions de monoxyde de carbone baissent fortement avec la puissance. De plus, il convient de noter qu'à forte puissance (à partir de 150 kW), plusieurs expériences ont montré des émissions nulles.

Notons également l'antinomie suivante : l'humidité semble être importante au regard de l'équilibre air-combustible mais elle ne figure pas dans l'évolution du taux d'oxygène qui traduit pourtant directement cet équilibre air-combustible. Nous devons par conséquent explorer d'autres pistes caractérisant cet équilibre air-combustible.

4.2.3. Synthèse des essais

Après avoir décrit nos essais et les premières conclusions déduites, nous pouvons joindre l'ensemble des résultats afin de raisonner globalement.

Nous ferons la synthèse des expériences en visualisant l'évolution des différents paramètres, mesurés ou calculés, en fonction de la puissance combustible délivrée par le foyer. Nous distinguons dans notre approche les paramètres aval à la zone de combustion des paramètres amonts.

4.2.3.1. Paramètres aval à la zone de combustion

4.2.3.1.1. Teneur en oxygène dans les fumées sèches

La Figure 4-35 représente l'ensemble des teneurs en oxygène optimales de chaque expérience présentée. Les résultats d'expériences sont distingués le mode de représentation suivant :

- les symboles pleins représentent les résultats d'essais effectués sur le bois coproduit d'exploitation forestière, les symboles évidés concernent les coproduits de première transformation ;
- les courbes de tendances continues correspondent aux symboles pleins, et les courbes de tendances pointillées aux symboles évidés ;
- la couleur de la courbe de tendance est cohérente avec celle des points sur lesquels elle est calculée.

Ce mode de représentation est identique sur les toutes les figures de ce Paragraphe 4.2.3.

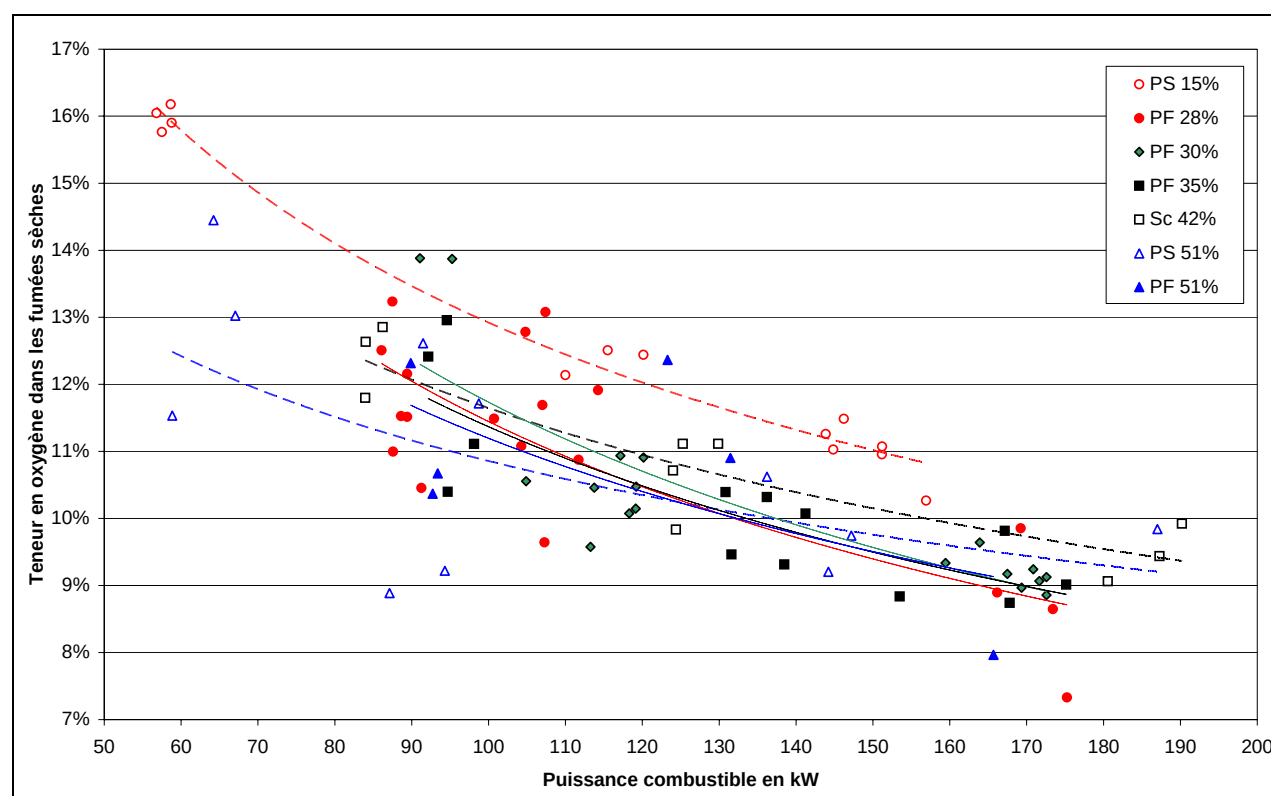


Figure 4-35 : Oxygène des modes sélectionnés en fonction de la puissance combustible.

Rappelons l'étude effectuée par Lundgren et al. [23] où le taux d'oxygène optimal diminue lorsque la puissance augmente (cf. Figure 2-27). Ces résultats donnent un taux d'oxygène optimal d'environ 11,5% pour une puissance de 50 kW qui diminue jusqu'à 8,5% pour 150kW.

Outre les résultats des essais de combustion effectués sur les plaquettes de scierie à 15%, les autres sont très cohérents entre eux et ne font pas apparaître de distinction due à l'humidité du bois. Les valeurs de taux d'oxygène sont légèrement plus importantes que celles de Lundgren et al. Mais suivent la même tendance avec 12% d'oxygène pour une puissance de 90 kW qui diminue jusqu'à 9% pour 170 kW.

Globalement, les résultats obtenus sur du bois de première transformation se distinguent légèrement de ceux obtenus ultérieurement sur de la plaquette forestière : les pentes des courbes de tendances pointillées sont différentes des courbes de tendances continues.

4.2.3.1.2. Evolution du monoxyde de carbone

La Figure 4-36 représente l'ensemble des émissions de monoxyde de carbone optimales de toutes les expériences. Le mode de représentation est identique à celui de la Figure 4-35.

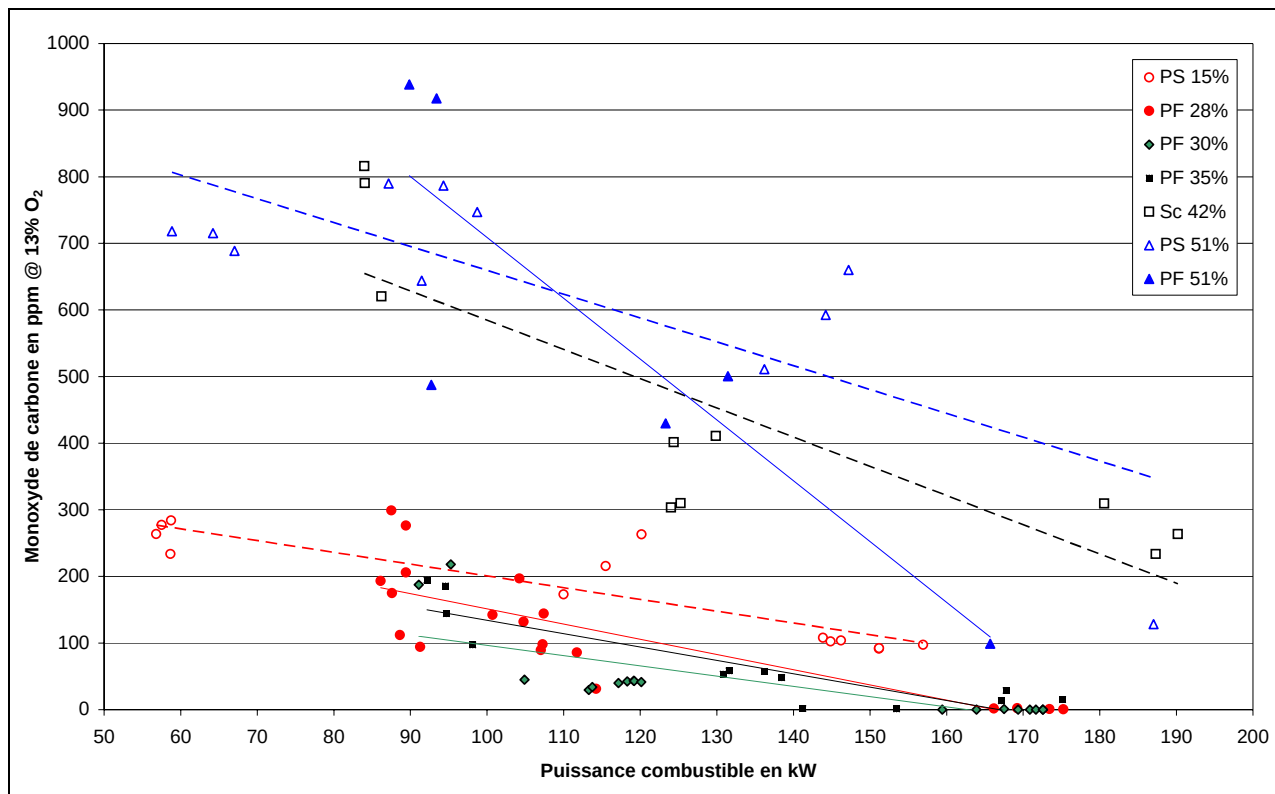


Figure 4-36 : Emissions de monoxyde de carbone en fonction de la puissance combustible.

Cette Figure 4-36 montre nettement de meilleurs résultats pour des plaquettes d'humidité inférieure à 40% d'humidité sur brut.

Dans la même gamme d'humidité sur brut, la combustion de sciure est émettrice de 4 fois plus de monoxyde de carbone à 90 kW. A 170 kW, les trois essais effectués sur des plaquettes à 28%, 30% et 35% donnent des résultats d'émissions de monoxyde de carbone inférieurs à 10ppm tandis que la sciure produit plus de 260 ppm.

La combustion de bois d'humidité sur brut supérieure à 40% est fortement émettrice de monoxyde de carbone à faible puissance : à 90 kW, les deux essais de combustion donnent une moyenne de 700 ppm.

Ce bois très humide mérite manifestement d'être brûlé à pleine charge de la chaudière car nous obtenons deux points à 165 kW pour les plaquettes forestières et à 185 kW pour les plaquettes de scierie dont les

émissions de monoxyde de carbone sont inférieures à 150 ppm. Ce phénomène s'explique par les échanges thermiques : à forte puissance, malgré l'humidité du bois, les températures sont suffisantes à l'obtention d'une combustion complète ; dès lors que la puissance baisse, le flux de chaleur au travers des parois du foyer abaisse suffisamment la température du foyer pour ralentir les réactions de combustion et engendrer des imbrûlés dont le monoxyde de carbone.

Les résultats obtenus des plaquettes de scierie à 15% d'humidité sur brut sont étonnants : ces plaquettes très sèches engendrent davantage de monoxyde de carbone que des plaquettes plus humides. Les phénomènes thermiques ne peuvent pas être évoqués pour justifier de telles mesures. En revanche, la bibliographie relève l'importance de l'eau sur la vitesse d'oxydation du monoxyde de carbone. Ainsi, la combustion d'un bois trop sec peut manquer de radicaux hydroxyles et engendrer une surproduction de monoxyde de carbone. Cette voie d'explication justifie simplement les résultats de mesures : les plaquettes à 15% d'humidité ne fournissent pas suffisamment d'eau à la combustion pour que le tout monoxyde de carbone réagisse correctement.

4.2.3.1.3. Evolution de la température dans le foyer

La Figure 4-37 représente l'ensemble des températures des fumées mesurées en sortie du foyer.

Le mode de représentation est identique à celui de la Figure 4-35.

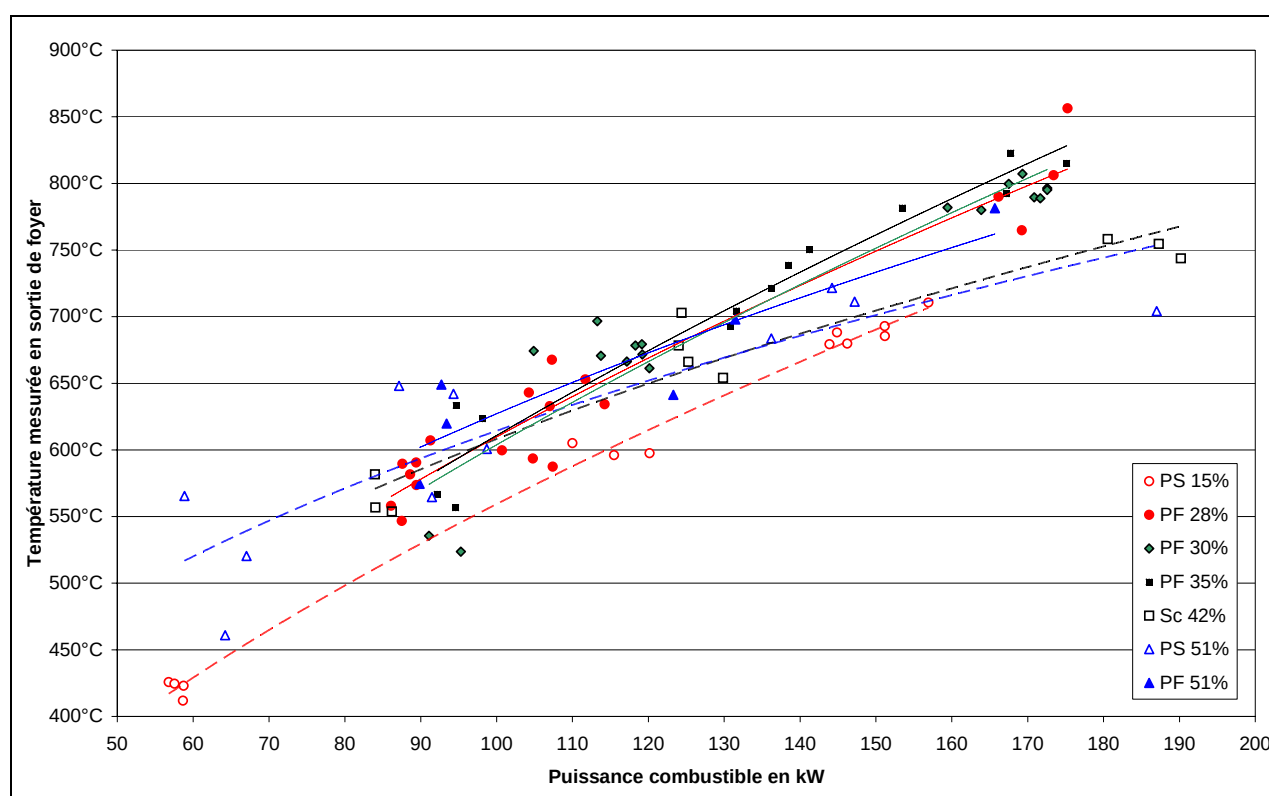


Figure 4-37 : Température mesurée en sortie du foyer en fonction de la puissance combustible.

La Figure 4-37 montre des températures de fumées en sortie de foyer qui ne sont pas modifiées par l'humidité du bois. Hormis l'essai effectué sur les plaquettes à 15% d'humidité sur brut, tous les essais se confondent donnant une température de sortie de foyer moyenne de 600°C pour 100 kW qui croît linéairement avec la puissance et donne 800°C pour 170 kW.

Ce résultat est étonnant : pour une puissance combustible donnée, plus le combustible est humide, plus le volume de fumées augmente pour une quantité d'énergie constante. La température des fumées devrait donc diminuer alors que nous n'en constatons aucune variation sensible. L'explication est en partie liée à la variation de la capacité calorifique des fumées due à la présence d'eau. A 700°C, la capacité calorifique de l'eau est de 35% plus faible que celle du dioxyde de carbone. L'élévation d'humidité du bois dilue davantage les fumées dont la capacité calorifique baisse par conséquent (cf. Figure 4-42). Ainsi, à puissance constante, lorsque l'humidité du bois augmente, la baisse de la capacité calorifique des fumées tend à compenser leur augmentation de débit massique afin de limiter la baisse de température des fumées.

A ce stade, il semble nécessaire de comparer la température mesurée en sortie du foyer à la température théorique calculée comme si le milieu était adiabatique. La Figure 4-38 représente l'ensemble des températures maximales théoriques calculées. Cette figure illustre clairement ces variations de températures dues aux modifications de mélange gazeux engendrées par la présence d'eau issue de l'humidité du combustible. Ces valeurs théoriques sont calculées à partir de la composition des fumées et de l'énergie libérée par la combustion.

Ces deux figures permettent d'appréhender le fait qu'environ un tiers de la puissance délivrée par la combustion est absorbée par l'eau de la chaudière avant que les gaz de combustion ne soient sortis du foyer. En effet, à 100 kW l'énergie délivrée par la combustion élève les gaz produits de 20°C à 950°C. Ceux-ci sortent du foyer à 600°C. Autrement dit, sur 930°C d'écart de température initiale par la combustion, les gaz perdent 350°C avant de sortir du foyer : cela représente plus du tiers de la puissance fournie. A 170 kW, les gaz perdent environ 350°C dans le foyer alors que l'énergie initiale délivrée par la combustion les élève d'environ 1100°C : ce qui représente légèrement moins du tiers de la puissance fournie.

Ce flux d'énergie dépend de nombreuses conditions si bien que la température de sortie des gaz est globalement insensible aux variations d'humidité du combustible utilisé.

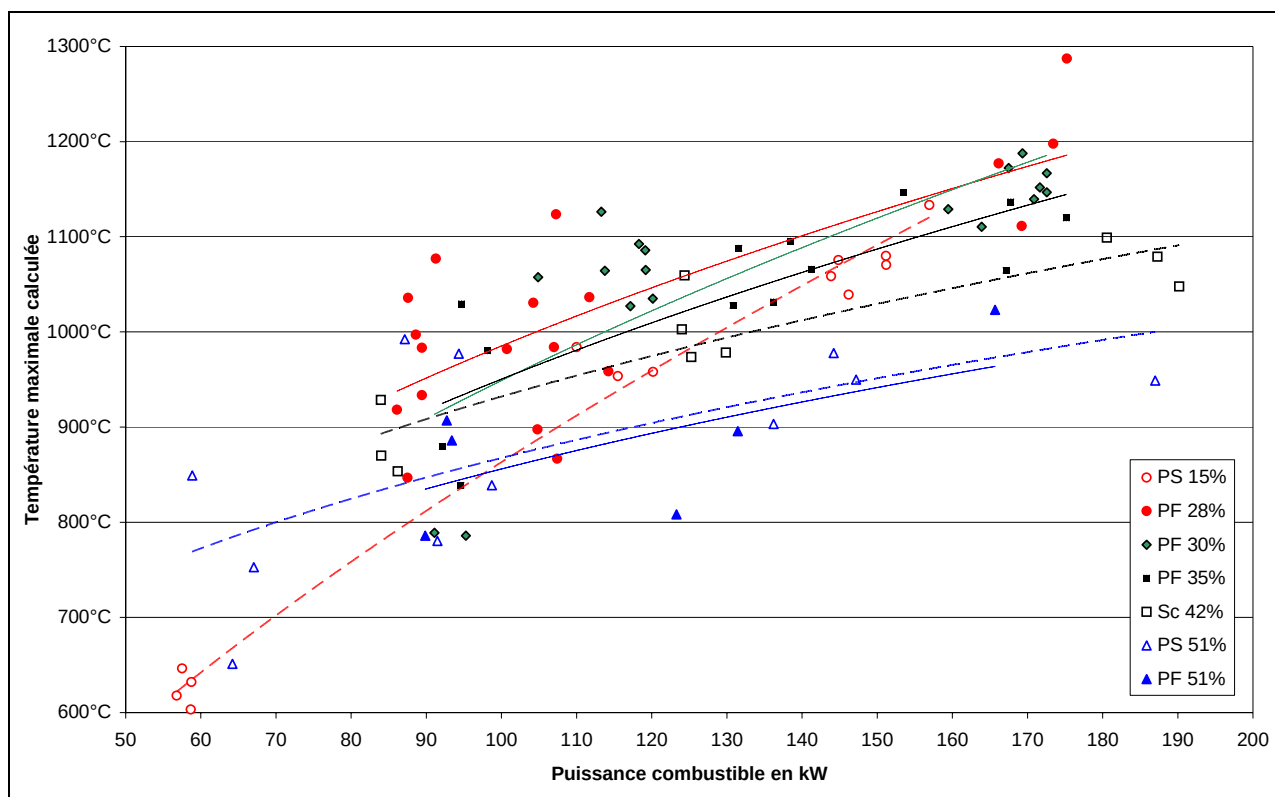


Figure 4-38 : Température maximale calculée en fonction de la puissance combustible.

4.2.3.1.4. Evolution du débit de fumées humides

La Figure 4-39 représente l'ensemble des débits de fumées humides.

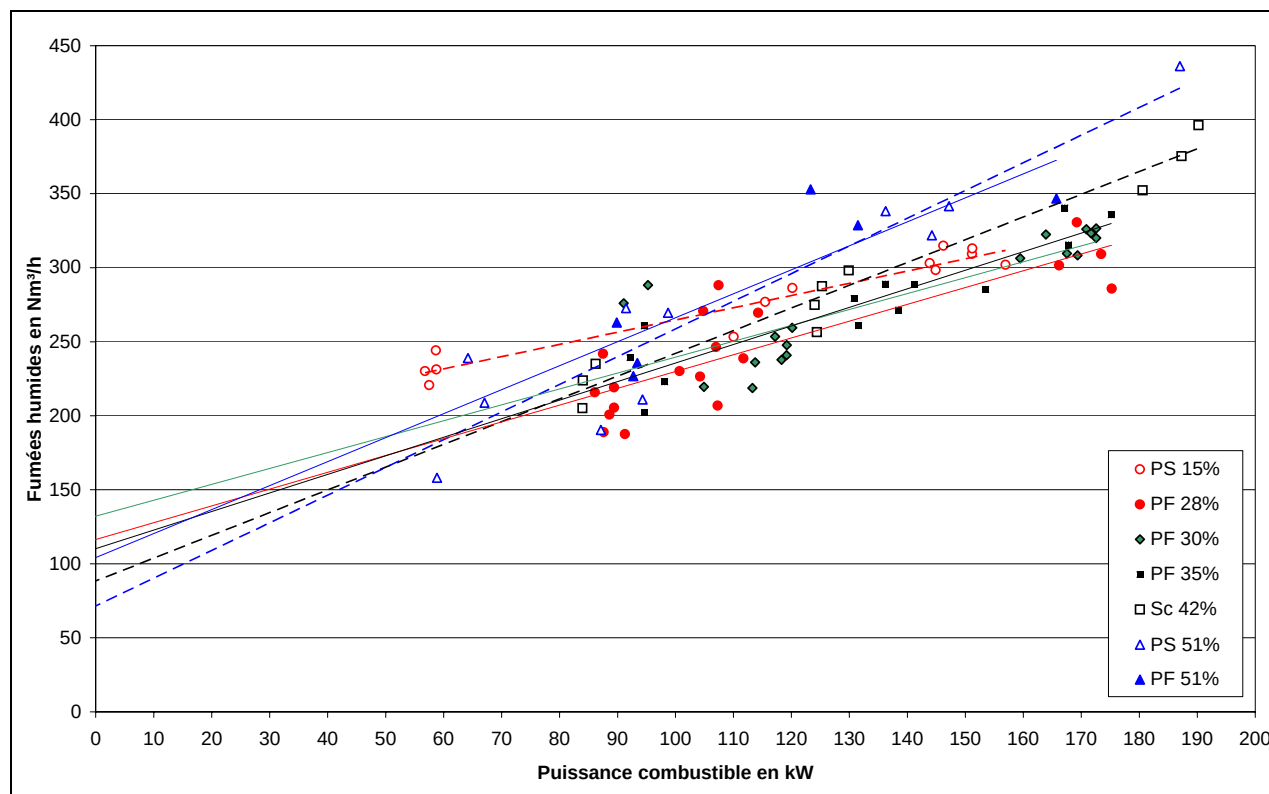


Figure 4-39 : Débit de fumées humides en fonction de la puissance combustible.

La Figure 4-39 représente le débit de fumées humides calculées à partir des mesures du débit d'air, du taux d'oxygène et de l'humidité du bois. Les régressions linéaires sur chacun des nuages de points de résultats convergent pour une puissance nulle vers un débit de fumées humides non nul inscrit dans un intervalle entre 75 et 135 Nm³/h. Vue la disparité des résultats, cette extrapolation est remarquable sous deux aspects :

- En traduisant physiquement ce résultat géométrique, cela signifie qu'en l'absence totale de bois alimentant le foyer, la tendance générale voudrait qu'un débit de gaz subsiste. Le facteur d'air doit donc diverger vers l'infini lorsque la puissance tend vers zéro. Notons que ce résultat est parfaitement cohérent avec la baisse du taux d'oxygène optimum avec l'augmentation de la puissance maintes fois remarquée jusqu'ici.
- De surcroît, l'intervalle de débit de fumées humides (entre 75 et 135 Nm³/h) est très restreint malgré une extrapolation sur un intervalle presque aussi grand que celui étudié. Cela révèle un phénomène global assimilable à une loi que l'on pourrait alors approcher par un modèle empirique.

Notons également que l'humidité du combustible semble avoir une influence marquée. Dans le domaine d'interpolation, autrement dit entre 80 et 170 kW, l'ensemble des droites sont globalement classées par ordre d'humidité du bois : à puissance donnée, plus le bois est humide, plus le débit de fumées est grand. Ce résultat est cohérent avec l'oxygène optimum dans les fumées sèches dont la tendance générale se révèle plutôt indépendante de l'humidité du combustible.

La Figure 4-40 représente l'oxygène optimum dans les fumées humides de toutes les expériences. Dans cette représentation les résultats des essais de combustion sur les plaquettes à 15% d'humidité sur brut semblent retrouver une place cohérente parmi les autres résultats alors nous les avons exclus de nos réflexions précédentes.

En effet, si l'on calcule la teneur effective des fumées en oxygène et non la teneur en oxygène dans la partie anhydre des fumées, on obtient des tendances de l'oxygène optimum bien distinctes et stratifiées en fonction de l'humidité du combustible : à puissance donnée, plus l'humidité du bois augmente, plus la teneur optimale en oxygène diminue.

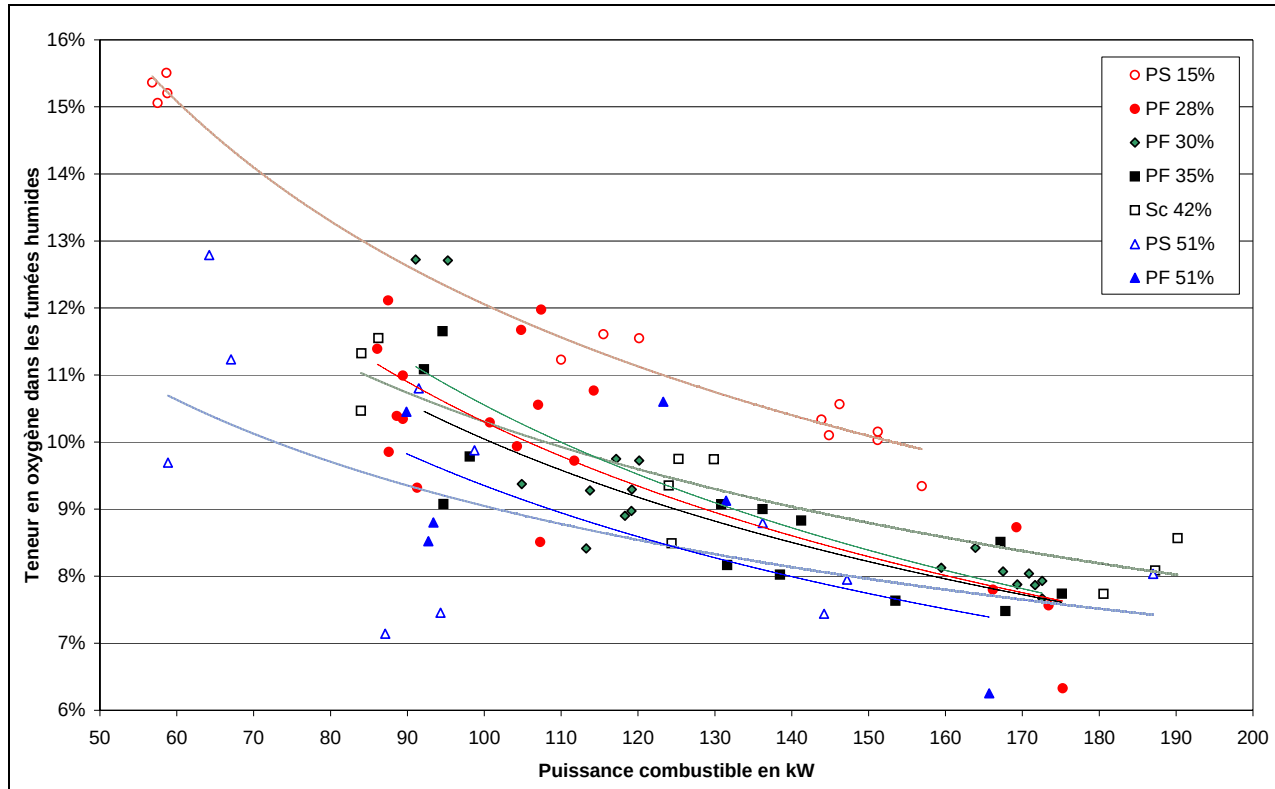


Figure 4-40 : Oxygène dans les fumées humides en fonction de la puissance combustible.

4.2.3.1.5. Evolution du temps de séjour

A partir du débit de fumées humides (cf. Figure 4-39) et de la température maximale des produits de combustion (cf. Figure 4-38), il est possible de calculer le débit volumique théorique maximal des fumées.. En imaginant que les fumées transitent dans le foyer de la chaudière, à température homogène et en occupant tout le volume du foyer, on peut définir un temps de séjour théorique des fumées dans le foyer. Ce temps de séjour est alors calculé par la formulation suivante :

$$Tps = \frac{V_{\text{foyer}}}{\dot{Q}_{\text{fumées.humides}}} \cdot \frac{T_0}{T_{\text{max}}} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

Où : $\dot{Q}_{\text{fumées.humides}}$ est le débit volumique normalisé de fumées humides exprimé en Nm^3/s ;

V_{foyer} est le volume du foyer exprimé en m^3 , soit $0,62 \text{ m}^3$;

T_0 est la température de référence exprimée en K ($T_0 = 0^\circ\text{C} \cong 273\text{K}$) ;

T_{max} est la température maximale théorique exprimée en K.

La Figure 4-41 représente l'ensemble des temps de séjour théoriques de toutes les expériences.

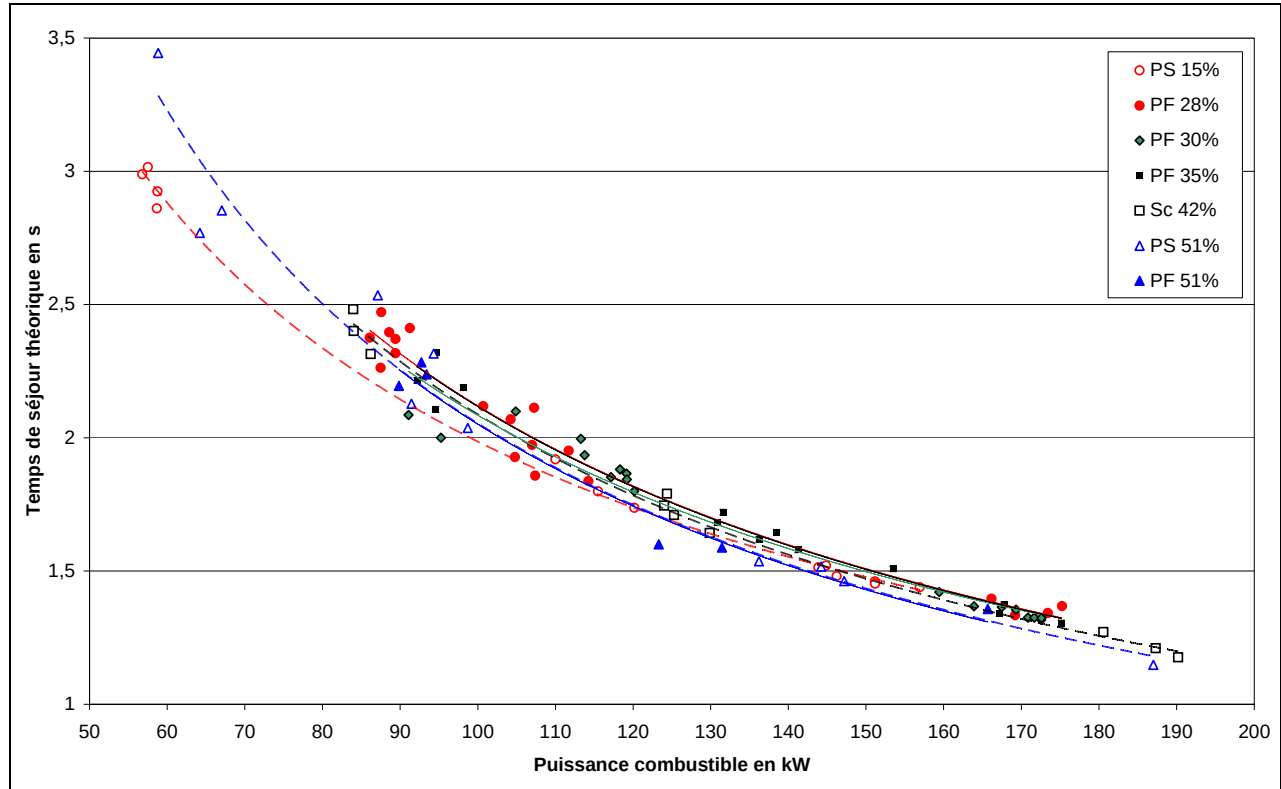


Figure 4-41 : Temps de séjour théorique des fumées humides en fonction de la puissance combustible.

La relation du temps de séjour théorique à la puissance combustible est remarquable quelles que soient l'humidité du combustible utilisé ou le taux d'oxygène dans les fumées. Seuls les résultats des essais de combustion sur les plaquettes à 15% d'humidité sont légèrement différents de la tendance générale à basse puissance.

Cette relation entre temps de séjour et puissance combustible est intrinsèque. La Figure 4-41 révèle seulement la cohérence de nos mesures. En effet, si l'on exprime la température maximale utilisée, celle-ci est donnée par la formulation suivante :

$$P = \dot{Q}_{\text{fumées.humides}} \cdot C_{p_{\text{fumées.humides}}} (T_{\text{max}} - T_0) \quad (\text{Eq. 4-2})$$

Où : P est la puissance combustible en kW ;

$\dot{Q}_{\text{fumées.humides}}$ est le débit volumique normalisé de fumées humides exprimé en Nm^3/s ;

$C_{p_{\text{fumées.humides}}}$ est la capacité calorifique des fumées humides en $\text{kJ}/(\text{Nm}^3.\text{K})$.

Le temps de séjour s'exprime alors par la formulation suivante :

$$T_{ps} = \frac{V_{\text{foyer}} \cdot C_{p_{\text{fumées.humides}}} \cdot T_0}{P + \dot{Q}_{\text{fumées.humides}} \cdot C_{p_{\text{fumées.humides}}} \cdot T_0} \quad (\text{Eq. 4-3})$$

Or, la Figure 4-42 nous informe de la relative constance de la capacité calorifique des fumées en fonction de la puissance ou de l'humidité, soit $1,8 \text{ kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot \text{K}) \pm 5\%$ dans nos conditions d'étude.

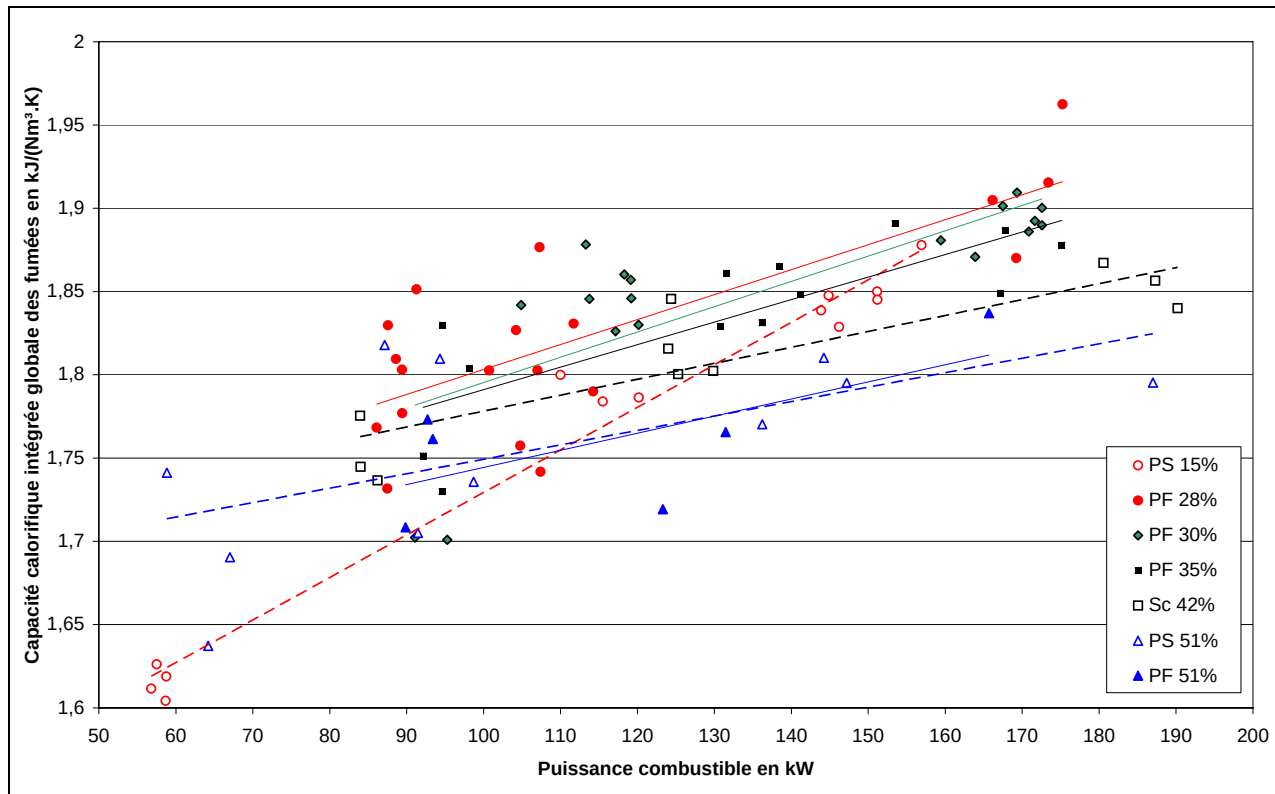


Figure 4-42 : Capacité calorifique intégrée des fumées humides en fonction de la puissance combustible.

De surcroît, la Figure 4-39 indique que le débit de fumées humides peut être approché par une fonction linéaire de la puissance. D'où la forme globale du temps de séjour constatée sur la Figure 4-41 que l'on peut réduire à l'expression suivante :

$$T_{ps} \cong \frac{a}{P + b} \quad (\text{Eq. 4-4})$$

Où : a et b sont des constantes indépendantes de la puissance et de l'humidité.

On obtient alors une expression du temps de séjour qui théoriquement ne dépend que très peu de l'humidité du combustible. La Figure 4-41 confirme la théorie à partir des mesures. Si l'on intègre ce résultat dans le sens inverse : la Figure 4-41 valide nos mesures qui se révèlent être conforme à la théorie. Ce résultat permet également de douter de l'entière validité des mesures effectuées durant les essais de combustion à basse puissance ($\sim 60 \text{ kW}$) menés sur les plaquettes à 15% d'humidité sur brut.

4.2.3.2. Paramètres amonts à la zone de combustion

L'ensemble des paramètres vus jusqu'ici sont mesurables ou calculables à partir de données avalées à la zone de combustion. Or la combustion est fluctuante au cours du temps si bien qu'il est intéressant d'étudier les paramètres amonts à la zone de combustion, soient les débits d'air comburant et les débits de bois. Le débit de bois étant intrinsèque à la puissance combustible (i.e. notre principale variable d'entrée), ce paragraphe traite de chaque forme du débit d'air : le débit d'air total, le facteur d'air et la répartition de l'air total entre l'air primaire et l'air secondaire.

4.2.3.2.1. Evolution du débit d'air total

La Figure 4-43 représente les résultats de débit d'air total en fonction de la puissance combustible. Le mode de représentation est identique à celui de la Figure 4-35.

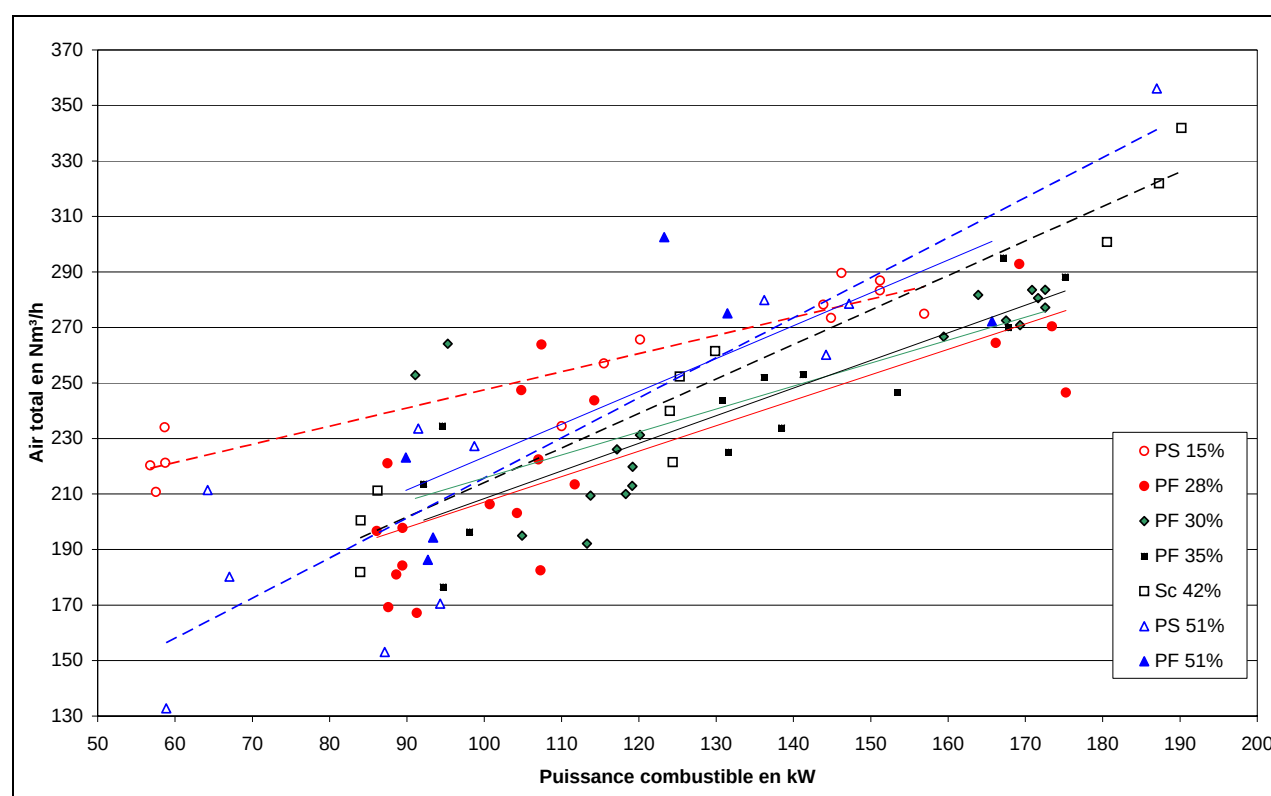


Figure 4-43 : Débit d'air total en fonction de la puissance combustible.

Il apparaît tout d'abord une évolution relativement linéaire de l'augmentation du débit d'air total en fonction de la puissance. Quelle que soit l'humidité du combustible, l'évolution suit pratiquement la même pente. Cependant, on note une stratification des courbes de tendance en fonction de l'humidité.

Ce résultat semble tout à fait logique : à puissance combustible constante, plus l'humidité du combustible augmente, plus le débit de bois anhydre augmente afin de compenser la perte d'énergie due à l'évaporation de l'eau. Cette augmentation du débit de bois anhydre nécessite, par conséquent, une augmentation du débit d'air stœchiométrique.

Or, le facteur d'air représente le rapport du débit d'air total sur le débit d'air stœchiométrique : l'étude de l'évolution de ce paramètre devrait donc se révéler intéressante. En effet, comme nous l'avons vu, l'augmentation de l'humidité du combustible entraîne l'augmentation du débit d'air total et du débit d'air stœchiométrique. En définitive, ces variations devraient se compenser dans l'expression du facteur d'air.

4.2.3.2.2. Evolution du facteur d'air

La Figure 4-44 représente les résultats de facteurs d'air optimums de l'ensemble des expériences. Le mode de représentation est identique à celui de la Figure 4-35.

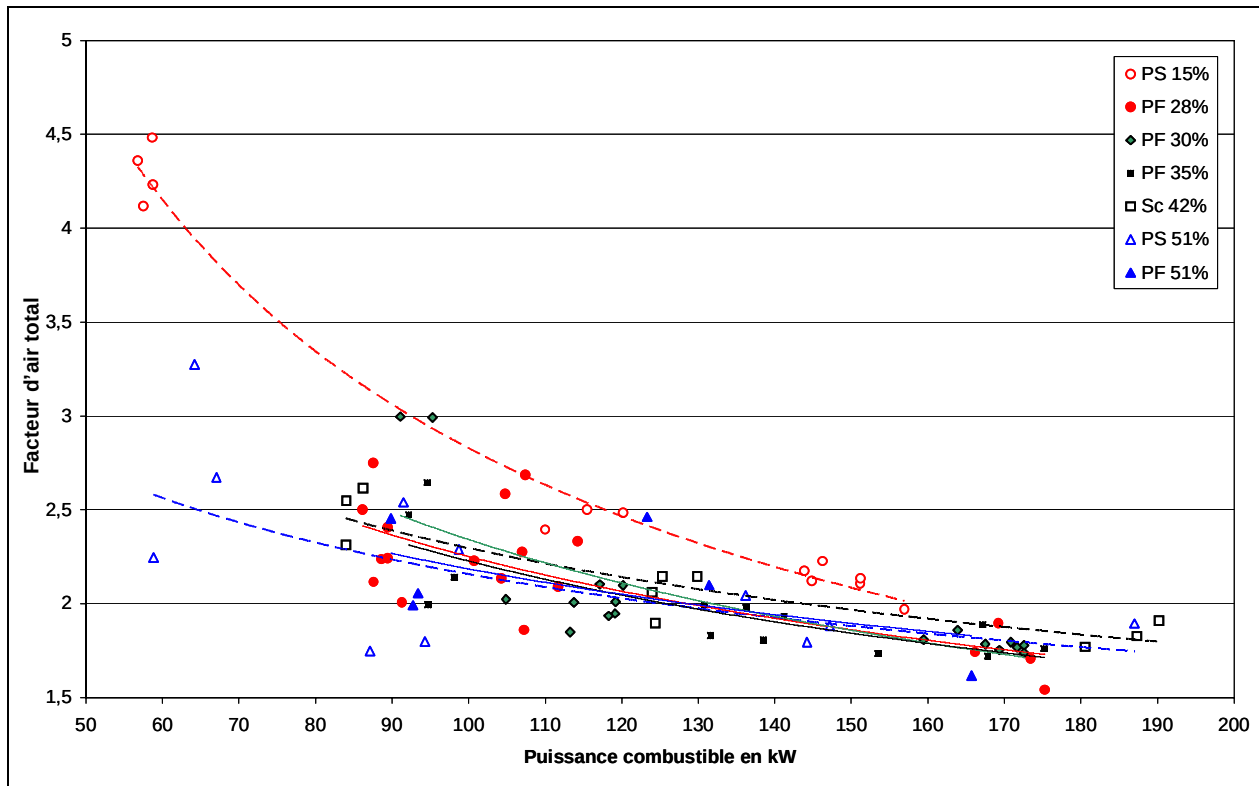


Figure 4-44 : Facteur d'air total en fonction de la puissance combustible.

En dehors des résultats des essais de combustion obtenus sur les plaquettes à 15% d'humidité, les résultats sont très proches les uns des autres et manifestement indépendants de l'humidité du combustible.

Ainsi, le facteur d'air optimum moyen est de :

- 2,4 à 90 kW ;
- 2 à 130 kW ;
- 1,75 à 175 kW.

Conformément aux attentes formulées précédemment le facteur d'air est indépendant de l'humidité du combustible. Autrement dit, lorsque l'humidité du combustible augmente, le débit d'air total augmente de façon strictement proportionnelle à l'augmentation du débit d'air stœchiométrique. En conséquence, il paraît nécessaire de prendre en compte l'humidité du bois comme paramètre de régulation de la combustion.

La cohérence de ces résultats permet d'imaginer une régulation du fonctionnement de la chaudière basée sur ce paramètre. Seulement, le facteur d'air n'est pas mesurable directement. Mais ce paramètre est directement lié au taux d'oxygène. La mesure de la teneur en oxygène étant réalisée en continu, la régulation de fonctionnement de la chaudière pourra certainement être effectuée à partir de cette mesure.

Ces résultats peuvent être complétés par la répartition de l'injection de l'air total au sein de la chaudière sous forme d'air primaire et d'air secondaire.

4.2.3.2.3. Répartition de l'air total

La Figure 4-45 représente la proportion de l'air total injecté en air secondaire.

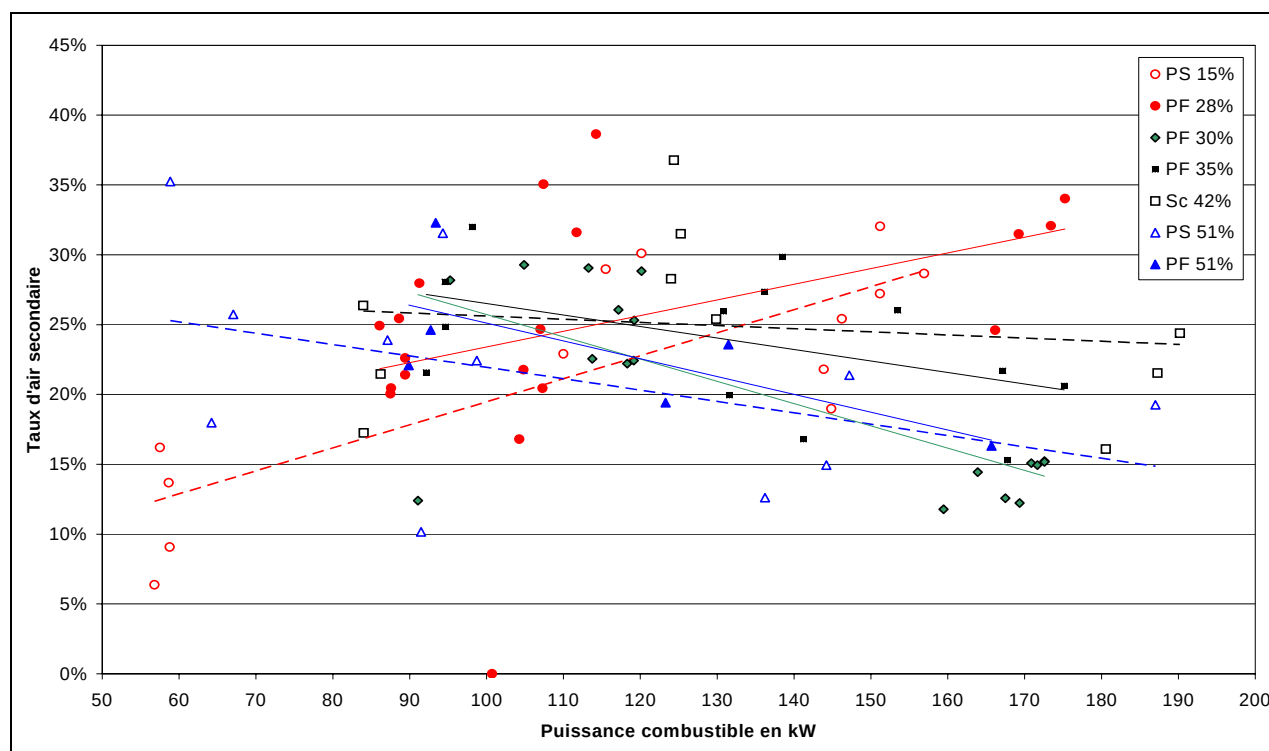


Figure 4-45 : Répartition de l'air total en air secondaire en fonction de la puissance combustible.

Les résultats représentés sur la Figure 4-45 sont assez dispersés et s'étendent de 0% à 40% de l'air total injecté en air secondaire.

Les tendances tracées parmi les résultats de chaque expérience tendent à s'inverser avec l'humidité :

- un bois sec requerrait davantage d'air secondaire au fur et à mesure que la puissance augmente ;
- un bois humide requerrait moins d'air secondaire avec l'augmentation de la puissance.

Il apparaît cependant qu'une moyenne de 20% à 25% de l'air total injecté en air secondaire semble utile pour obtenir une bonne combustion.

Rappelons que nous n'avons techniquement pas pu faire varier le débit d'air secondaire de 0% à 100% du débit d'air total. Il semble donc nécessaire de comparer le spectre des taux d'air secondaire correspondant aux conditions optimales au spectre de l'ensemble des conditions étudiées.

Cette représentation (cf. Figure 4-46) permet principalement de visualiser les modes étudiées qui ne figurent pas parmi les modes sélectionnés comme optimaux. Elle permet également d'éviter d'extrapoler un résultat à partir de trop peu d'expériences.

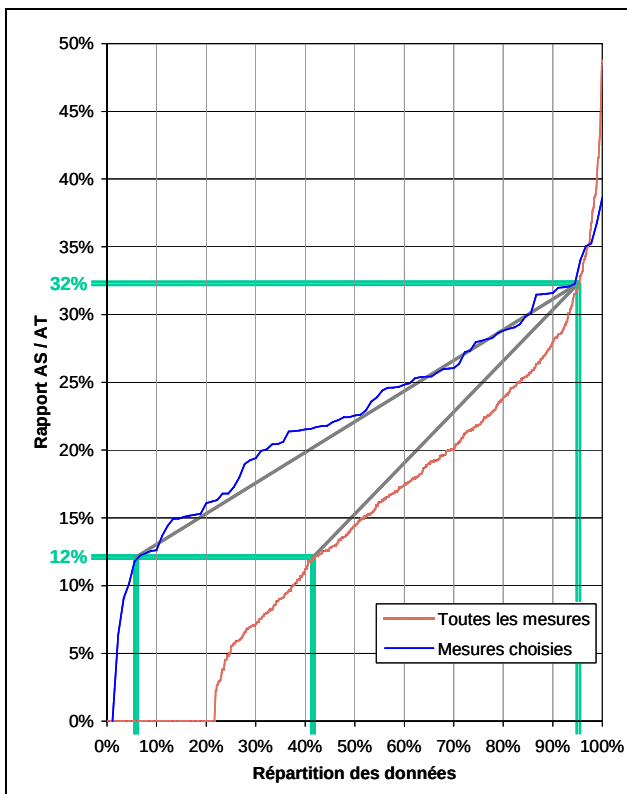


Figure 4-46 : Comparaison des répartitions d'air secondaire choisies et étudiées.

La Figure 4-46 représente la répartition des rapports air secondaire sur air total parmi l'ensemble des mesures et parmi les mesures optimales choisies.

Pour un rapport air secondaire sur air total inférieur à 12%, les mesures effectuées dans cet intervalle représentent plus de 40% de l'ensemble des mesures effectuées (334 mesures) et moins de 5% des mesures choisies (4 mesures).

Ce seul résultat indique qu'une combustion optimisée requiert au moins 12% de l'air total injecté en tant qu'air secondaire.

Une proportion d'air secondaire supérieure à 32% représente moins de 5% de toutes les mesures (40 points) comme des mesures sélectionnées (4 points).

Cet ensemble de données n'est pas suffisamment vaste pour pouvoir en tirer un résultat fiable. Nous manquons manifestement d'information sur des répartitions plus fortes en air secondaire.

Pour une proportion d'air secondaire entre 12% et 32%, l'ensemble des mesures sélectionnées varie linéairement avec la répartition d'air tandis que l'ensemble des mesures effectuées privilégie légèrement les rapports d'air secondaire plus faible : géométriquement, la courbe bleue suit la droite grise tandis que la courbe rouge s'en écarte vers le bas.

Ce constat traduit que davantage de cas de combustion optimale sont trouvés parmi des mesures où la répartition d'air secondaire est de $25\% \pm 0,03$.

En associant ce résultat à celui tiré de la Figure 4-45, on peut affirmer qu'une combustion optimisée requiert un débit d'air total réparti selon 75% en air primaire et 25% en secondaire.

Cette répartition de l'air comburant mérite peut être d'être ajustée en fonction de la puissance et de l'humidité du combustible, mais les résultats ne sont pas suffisamment clairs pour conclure. Une répartition 25-75 forme donc un premier résultat qui pourra faire l'objet d'une optimisation ultérieure.

4.3. Conclusion

Les résultats présentés dans ce Chapitre sont obtenus à partir d'une réflexion menée sur un échantillon de cas sélectionnés parmi l'ensemble des cas étudiés expérimentalement. La sélection effectuée est basée sur un tri des cas prenant comme critère les émissions de monoxyde de carbone. Un quota de cas est déterminé pour chaque expérience, ceux sélectionnés sont ceux présentant un minimum d'émissions de monoxyde de carbone. Les différentes expériences menées se distinguent par leur puissance (i.e. le débit de bois anhydre) et l'humidité du bois utilisé comme combustible. Les résultats présentés consistent donc à lier les conditions optimales de combustion (i.e. production minimale de monoxyde de carbone) aux paramètres d'entrée que sont les caractéristiques du bois (essentiellement l'humidité du bois), les débits de bois, et les débits d'air primaire et secondaire.

Les résultats obtenus montrent que :

- la granulométrie du bois employé joue peu sur les équilibres entre débit de bois et débit d'air. Ce paramètre ne sera donc pas pris en considération dans la suite du travail ;
- l'humidité du bois intervient fortement sur les émissions de monoxyde de carbone : la combustion d'un bois à environ 30% d'humidité sur brut produit 3 à 4 fois moins de monoxyde de carbone qu'un bois à environ 50% d'humidité sur brut. Il semble qu'un bois à 15% d'humidité sur brut produise davantage de monoxyde de carbone qu'un bois à 30% d'humidité sur brut ;
- l'humidité du bois joue faiblement sur l'équilibre entre débit de bois anhydre et débit d'air : la teneur en oxygène dans les fumées sèches est peu sensible aux variations d'humidité. En revanche, le débit de fumées humides augmente nettement avec l'humidité ;
- la puissance, directement liée au débit de bois anhydre, intervient sur les émissions de monoxyde de carbone : les émissions diminuent quand la puissance augmente, et ce quelle que soit l'humidité du bois ;
- la puissance entraîne une variation de la teneur en oxygène dans les fumées sèches : la teneur en oxygène doit diminuer quand la puissance augmente, et ce quelle que soit l'humidité du bois ;
- l'air total injecté doit être réparti entre l'air primaire et l'air secondaire. Une première approximation donne cette répartition comme indépendante de la puissance et de l'humidité et valant 75% du débit total injecté comme air primaire et 25% comme air secondaire ;
- le débit d'air total est lié à la puissance par une loi dont l'expression la plus simple est décrite par le facteur d'air.

En effet, le facteur d'air varie et diminue en fonction de la puissance, sans distinction due à l'humidité du bois. Ce facteur, qui exprime le rapport entre le débit d'air total et le débit d'air stœchiométrique, peut ainsi permettre d'édifier une règle liant la puissance au débit d'air total nécessaire à une bonne combustion.

Cependant, le facteur d'air n'est pas mesurable directement. Connaissant la puissance, il doit être évalué à partir du débit d'air total (ou de la teneur en oxygène) et de l'humidité du combustible. Néanmoins, l'établissement d'une règle sur le facteur d'air permettrait de réguler une chaudière afin que cette dernière fonctionne dans des conditions optimales quels que soient le combustible et l'énergie à fournir.

Le Chapitre suivant est consacré à ce travail avec pour objectif de déterminer, si possible, une technique de régulation de fonctionnement permettant de réduire les émissions polluantes quels que soient la qualité du bois et les besoins en puissance.

5. Optimisation de la Régulation

5.1. Introduction

Dans le déroulement du chapitre précédent, nous nous sommes attachés aux seules conditions de production minimale de monoxyde de carbone. Cette démarche a permis :

- d’estimer l’influence de l’humidité du combustible et de la puissance sur l’équilibre entre combustible et comburant ;
- de déterminer le paramètre relatant le mieux cet équilibre en fonction de la puissance et de l’humidité : a priori, il s’agit du facteur d’air.

Ce résultat indique la voie d’optimisation à suivre pour répondre à l’objectif de notre travail et mettre en place sur les chaudières existantes une régulation optimisée. Dans un second temps, nous chercherons également à quantifier le gain pouvant être obtenu grâce à cette amélioration.

Pour ce faire, nous proposons d’évaluer la quantité de monoxyde de carbone émise selon les conditions d’utilisation de la chaudière : puissance demandée, facteur d’air imposé, humidité du bois utilisé.

L’évolution du monoxyde de carbone en fonction de chacun de ces paramètres permet alors de simuler un fonctionnement type de la chaudière et donc de quantifier les améliorations susceptibles d’être obtenues grâce à une régulation optimisée qui modifierait les équilibres entre combustible et comburant en fonction de la puissance demandée et de la qualité du combustible employé.

Dans cette optique, ce chapitre traite de :

- la détermination des paramètres influents sur les émissions de monoxyde de carbone ;
- la modélisation du monoxyde de carbone en fonction de la puissance, du facteur d’air et de l’humidité du bois ;
- la conversion du paramètre calculé qu’est le facteur d’air en un paramètre mesurable qu’est le taux d’oxygène afin de proposer une logique de régulation optimisée ;
- la simulation de la quantité de monoxyde de carbone émise sur une journée de fonctionnement type en fonction de la régulation choisie.

Ces évaluations permettent enfin de justifier les valeurs utilisées dans les régulations actuelles et de quantifier les améliorations possibles grâce aux résultats de cette étude.

5.2. Emissions de monoxyde de carbone

5.2.1. Analyse des résultats

Afin de modéliser l'évolution du monoxyde de carbone en fonction des données d'entrée, nous utilisons l'intégralité des mesures effectuées durant les essais de combustion. Seuls les résultats obtenus avec les plaquettes à 15% d'humidité sur brut sont exclus car ils manquent de redondance et n'ont pas pu être validés de façon définitive.

5.2.1.1. Comparaison aux données bibliographiques

En premier lieu, nous visualisons la concentration en monoxyde de carbone mesurée dans les fumées sèches en fonction du facteur d'air. Ce mode de représentation est identique à la Figure 2-23 (page 2-38) issue de la littérature.

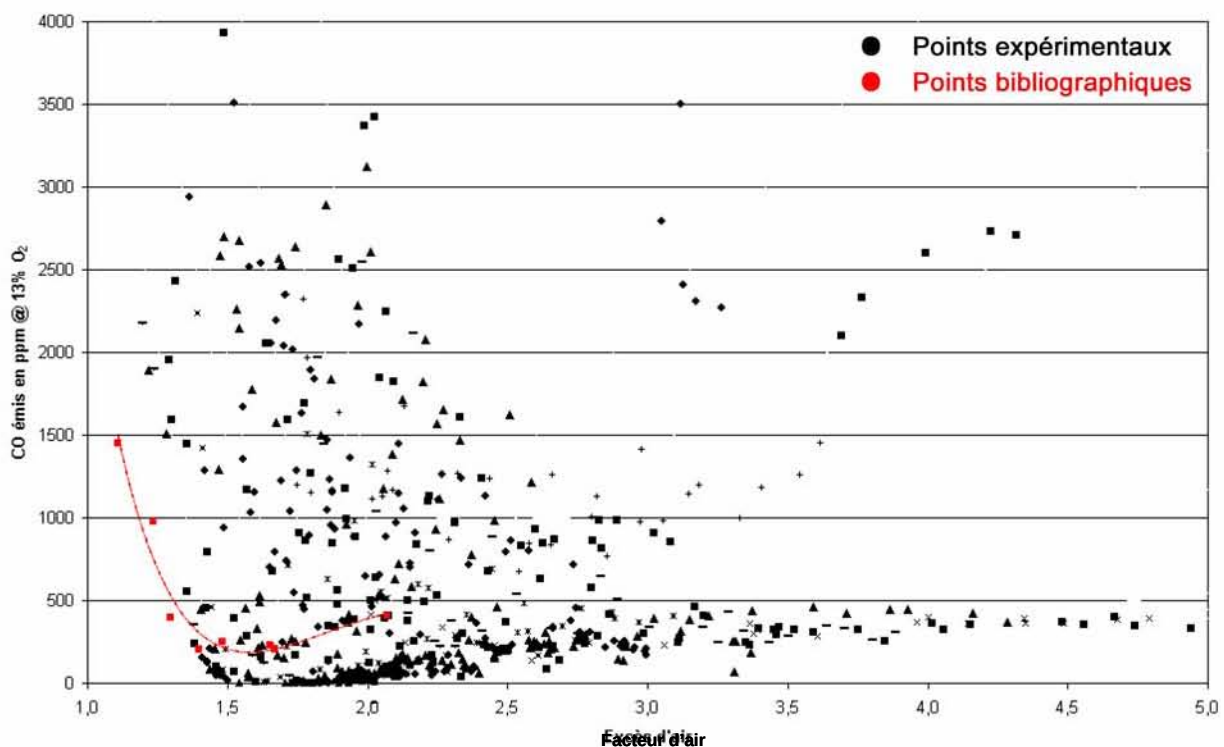


Figure 5-1 : Représentation des données bibliographiques parmi les mesures d'émissions de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air.

La Figure 5-1 permet de vérifier que les résultats obtenus au cours de cette étude sont semblables à ceux issus de la littérature : la forme générale de l'évolution est conservée. Cependant, il apparaît une dispersion non négligeable des points de mesures autour de la courbe :

- les valeurs de facteurs d'air étudiées expérimentalement sont comprises dans une gamme beaucoup plus large, avec notamment des valeurs beaucoup plus élevées ;
- de fortes émissions de monoxyde de carbone sont mesurées pour de fortes valeurs du facteur d'air, ainsi que pour un facteur d'air trop faible.

Afin de mieux appréhender les résultats présentés sur la Figure 5-1, nous essayons, tout en conservant ce mode de représentation, de visualiser l'impact des paramètres de puissance et d'humidité sur la représentation de cette courbe.

5.2.1.2. Classement des données

Afin de rendre plus lisible l'ensemble des résultats, les points de mesures sont classés selon six catégories qui partagent de manière équitable les différents essais de combustion effectués. On obtient :

- trois gammes de puissance : 100 kW, 135 kW et 185 kW ;
- et deux gammes d'humidité (plutôt sec : < 35% ; et plutôt humide : >35%).

En appliquant ce tri aux résultats de la Figure 5-1, on obtient la Figure 5-2 :

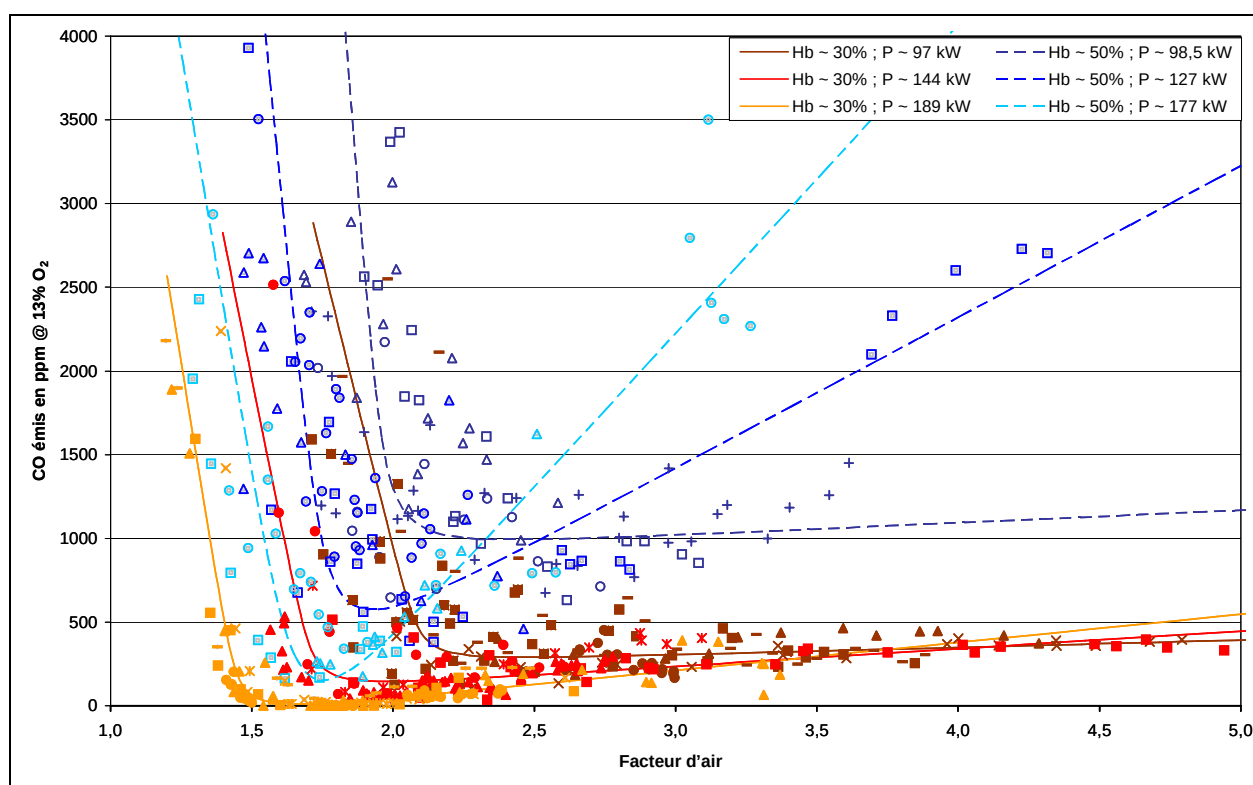


Figure 5-2 : Emissions de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air.
Données triées selon deux gammes d'humidité et trois gammes de puissance.

Les courbes montrent plusieurs résultats :

- D'une part, il apparaît clairement une stratification en fonction de la puissance : lorsque la puissance augmente, les émissions de monoxyde de carbone ont tendance à baisser et le minimum est obtenu pour des valeurs du facteur d'air de plus en plus faibles. Ce premier résultat a déjà été montré dans le Chapitre 4.
- D'autre part, lorsque l'humidité augmente, les courbes deviennent de plus en plus obtuses. Cela signifie que l'optimisation est plus pointue et précise en présence de bois humide qu'avec du bois plus sec. En revanche, le facteur d'air correspondant aux émissions minimales ne semble pas dépendre beaucoup de l'humidité, même si les valeurs de monoxyde de carbone sont plus importantes lorsque l'humidité augmente. Ce second résultat a également été formulé au Chapitre 4 : le facteur d'air optimal semble relativement indépendant de l'humidité.

Selon ces résultats, pour optimiser la combustion dans une chaudière industrielle, il convient de déterminer un facteur d'air qui dépend principalement de la puissance fournie par la chaudière et, dans une moindre mesure, de l'humidité du combustible.

5.2.1.3. Formulation du comportement

Afin de modéliser correctement l'évolution du monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air, de l'humidité et de la puissance, il est indispensable d'appréhender la forme de cette évolution. Alors seulement, il est possible de déterminer l'équation mathématique la plus à même de représenter ce comportement.

Le classement précédent a permis de révéler l'influence de la puissance et de l'humidité sur l'évolution du monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air. A ce stade, il est nécessaire d'éclater les résultats de la Figure 5-2 afin de permettre à l'œil d'appréhender la forme que doit suivre le modèle.

Dans ce but, les Figure 5-3 reprennent les points de mesures de la Figure 5-2, chacune de ces figures se limite à une gamme de puissance :

- celle du haut représente les résultats à faible puissance : une moyenne de 97 kW pour le bois sec et 98,5 kW pour le bois humide ;
- celle du centre représente les résultats à puissance intermédiaire : une moyenne de 144 kW pour le bois sec et 127 kW pour le bois humide ;
- celle du bas représente les résultats à forte puissance : une moyenne de 189 kW pour le bois sec et 177 kW pour le bois humide.

Dans chacun des graphiques les résultats sont distingués par couleur en fonction de l'humidité du combustible selon deux classes :

- en bleu (symboles évidés), les résultats obtenus sur un combustible d'humidité supérieure à 35% sur brut ;
- en rouge (symboles pleins), les résultats obtenus sur un bois à moins de 35% d'humidité sur brut.

Au sein de chaque figure, les différents essais de combustion détaillés au Chapitre 4 sont montrés en fonction de la forme du point de résultat.

Dans chacune de ces trois figures, il apparaît un comportement global de la combustion dont certains termes varient en fonction de l'humidité ou de la puissance mais qui peut s'énoncer de la façon suivante :

- Pour un facteur d'air inférieur à un certain seuil, la production de monoxyde de carbone augmente très fortement sans distinction marquée selon la puissance ou l'humidité.
- Pour un facteur d'air supérieur au même seuil, la production de monoxyde de carbone augmente. Si le bois est humide, cette augmentation est d'autant plus forte que la puissance augmente.

Ces deux modes de fonctionnement déterminent un seuil marqué du facteur d'air pour lequel la production de monoxyde de carbone est minimale. Ce seuil est dépendant de la puissance : plus la puissance augmente et plus la valeur de ce seuil de facteur d'air diminue.

Si l'on considère la courbe issue de la bibliographie illustrée sur la Figure 5-2, on distingue qu'elle est formée par un polynôme de degré environ égal à 6. Or, un polynôme peine à représenter un comportement aussi tranché par un seuil comme ces figures le font apparaître.

La visualisation des points expérimentaux, plus denses et davantage prolongés sur chacune des échelles de facteur d'air ou de monoxyde de carbone, inspire plutôt une modélisation effectuée par deux droites se coupant au niveau du seuil. Chacune de ces droites représente la relation entre CO et facteur d'air durant un fonctionnement en deçà ou au-delà de ce seuil. Ce mode de représentation est en accord avec l'explication des phénomènes de production du CO effectués sur la Figure 2-24.

Nous choisissons donc de modéliser l'évolution du monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air par une représentation linéaire intégrant un seuil.

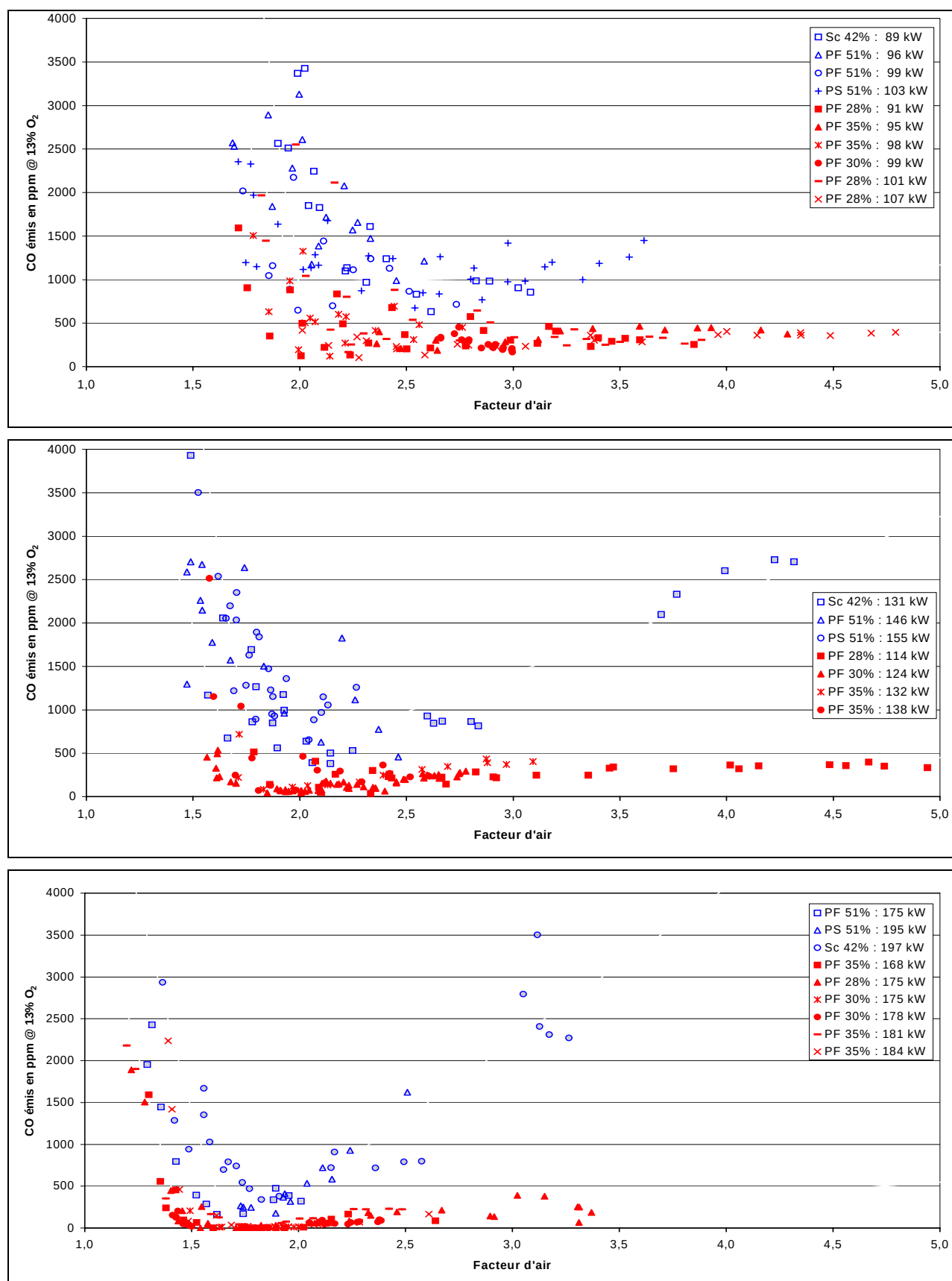


Figure 5-3 : Représentations des mesures de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air calculé. Les graphiques représentent de bas en haut les trois classes de puissance combustible.

5.2.2. Elaboration du modèle

La modélisation du monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air est ainsi basée sur le calcul de deux droites passant parmi les points de résultats pour chaque partie du nuage de points.

Nous obtenons ainsi une représentation du type de celle présentée sur la Figure 5-4.

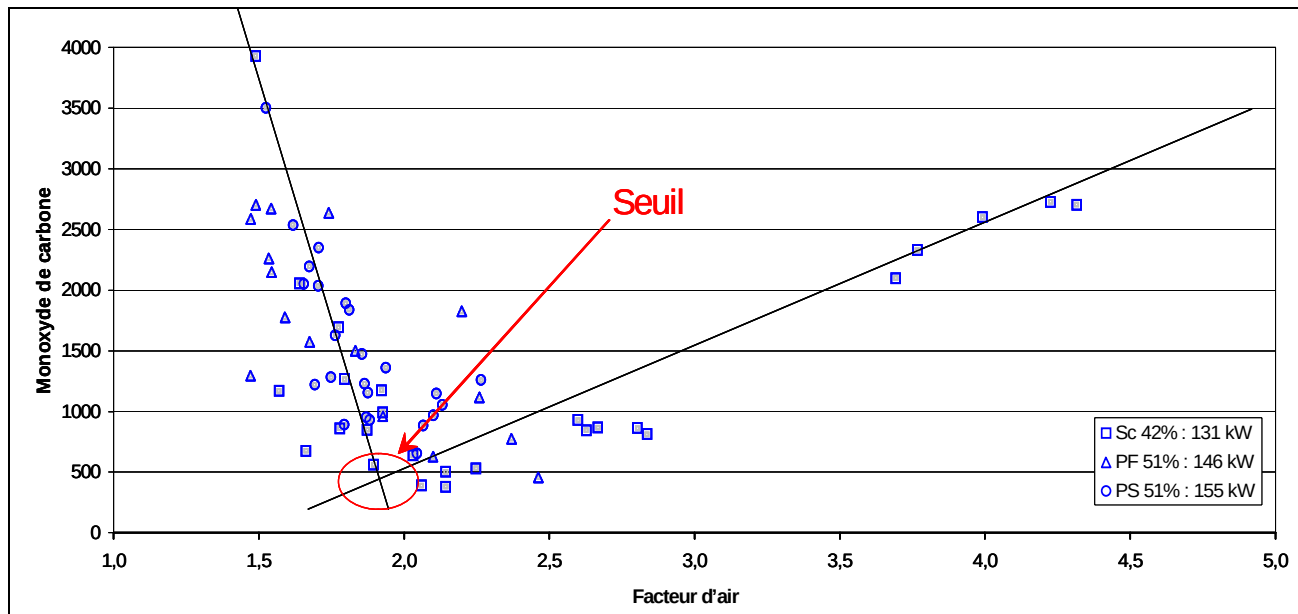


Figure 5-4 : Visualisation des deux droites sécantes susceptibles de représenter l'évolution du CO en fonction du facteur d'air.

L'objectif de cette modélisation est double :

- Il s'agit d'abord de déterminer pour chaque condition opératoire (puissance, facteur d'air, humidité) les émissions de monoxyde de carbone dans les fumées.
- Dans un second temps, il s'agit de déterminer pour chaque condition d'entrée (puissance, humidité) la valeur du facteur d'air optimale permettant de réduire le plus possible les émissions de monoxyde de carbone.

La représentation de ces deux droites est finalement assez simple à mettre en place du point de vue mathématique, mais pose un problème de continuité au niveau du seuil. Afin de régler cette difficulté, nous avons choisi d'utiliser une fonction du type arc tangente qui permet de relier les deux droites en une unique fonction continue.

La suite de ce paragraphe est consacrée à l'explication de la méthode choisie.

5.2.2.1. Formalisation mathématique

Afin d'optimiser la modélisation, la représentation est limitée à 4 paramètres (ou 4 degrés de liberté). Les quatre paramètres scalaires ont les fonctions suivantes :

- une translation sur l'axe du facteur d'air (n°1 sur la Figure 5-5) ;
- une translation sur l'axe du monoxyde de carbone (n°2) ;
- une rotation du plan autour de son origine des échelles (n°4) ;
- une pente de droite (n°5).

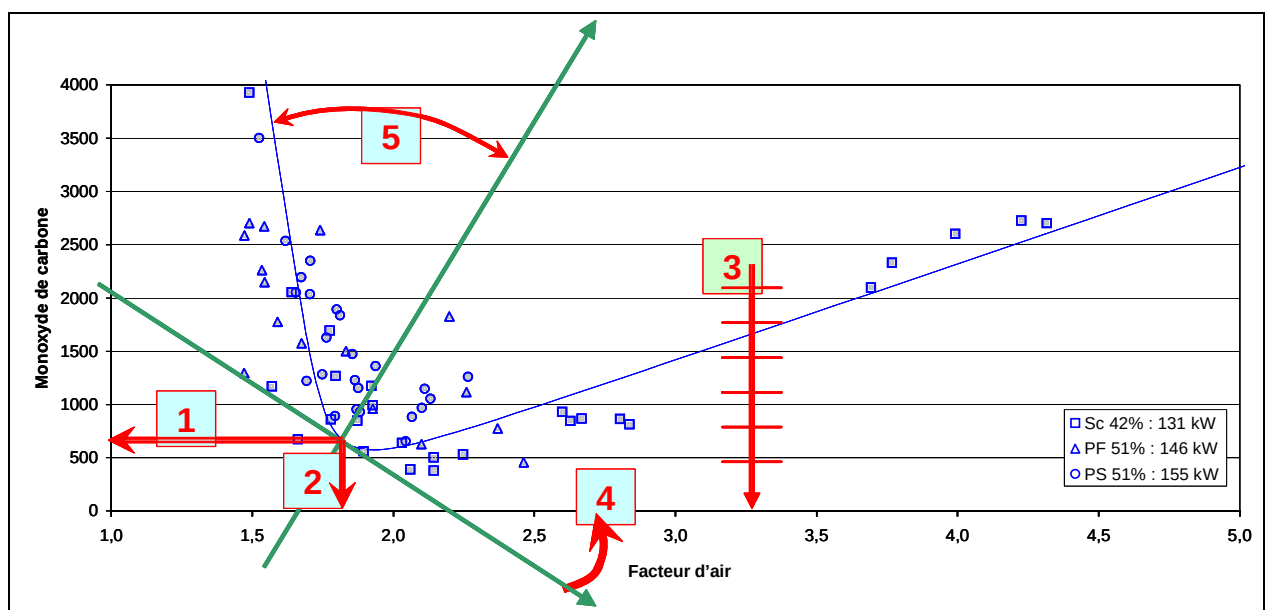


Figure 5-5 : Représentation de l'action de chaque paramètre sur l'exemple des points de forte humidité et puissance moyenne, et de la courbe modélisant ces points.

Un cinquième paramètre (n°3 sur la Figure 5-5) est liée au groupe de points traités. Ce paramètre sert à effectuer une affinité du plan selon l'axe des ordonnées afin de normaliser les points dans un intervalle plan carré. Cette transformation réversible du plan est effectuée après les translations et avant la rotation.

L'espace des points de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air est modifié. Les points exemples de la Figure 5-5 sont représentés sur la Figure 5-6.

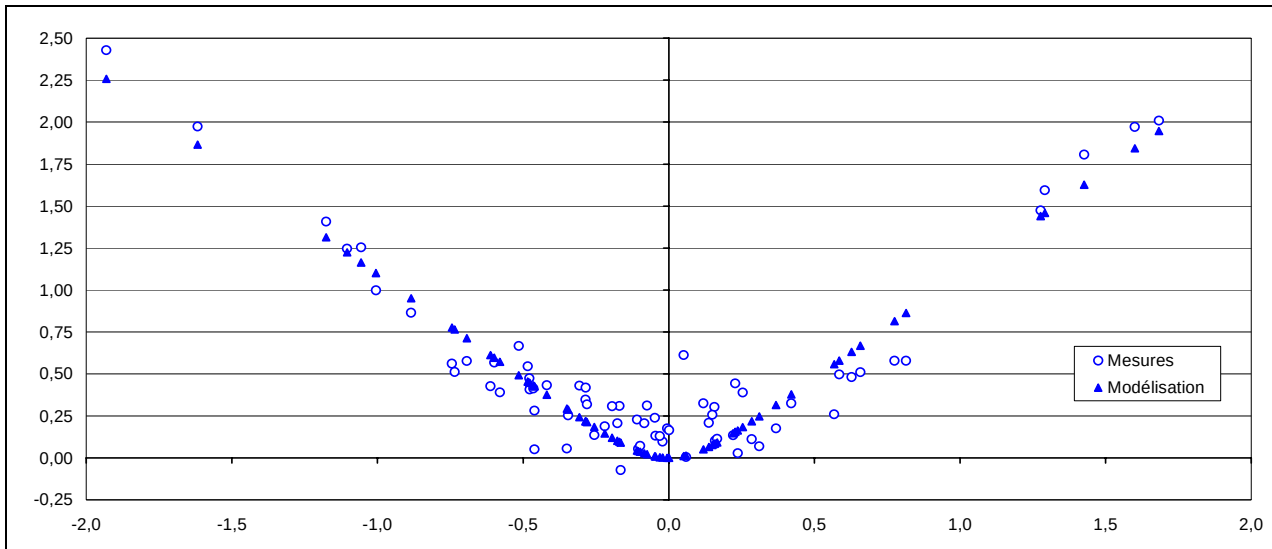


Figure 5-6 : Représentation de la configuration des données de la Figure 5-5 dans le plan lorsque le modèle $y = k \cdot |x \cdot \theta(x)|$ est évalué.

Le but de ces transformations est de déplacer l'ensemble des points de mesure de façon réversible afin qu'il correspondent au mieux à une fonction de la forme :

$$y = k \cdot |x \cdot \theta(x)| \quad (\text{Eq. 5-1})$$

où : k est la pente de la droite ;

θ est une fonction :

- qui tend vers 1 lorsque x tend vers l'infini ;
- de valeur et de dérivée nulles à l'origine

Cette fonction θ sert uniquement à produire un rayon de raccordement entre les deux droites car la transition entre fonctionnement en deçà et au-delà du seuil de facteur d'air n'est pas aussi tranchée que les mathématiques peuvent le représenter. Pour ce faire nous utilisons une fonction arctangente :

$$\theta(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \text{tg}^{-1}(5 \cdot x) \quad (\text{Eq. 5-2})$$

La Figure 5-7 représente la valeur de la fonction θ en fonction de l'ordonnée.

Cette représentation permet d'apprécier l'intérêt du facteur 5 : son but est de moduler le rayon de raccordement entre les deux droites.

Rappelons que la fonction arctangente est impaire donc symétrique par rapport à l'origine.

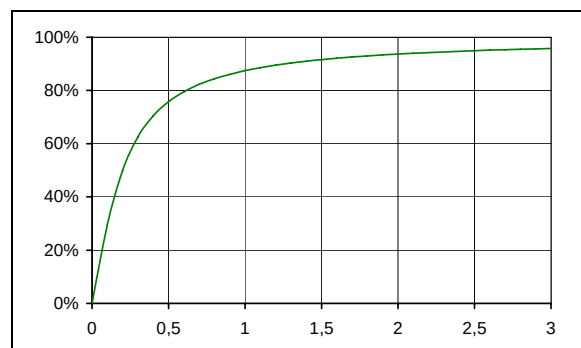


Figure 5-7 : Représentation de la fonction θ .

La Figure 5-6 représente les points de données (cercles évidés) et leur modélisation (triangles pleins). En traçant la fonction $y = k \cdot |x \cdot \theta(x)|$ puis en effectuant la transformation inverse du plan, on obtient la courbe de modélisation tracée sur la Figure 5-5.

5.2.2.2. Résultats numériques

Le module de résolution du tableur fait évoluer l'ensemble des 4 paramètres (ou 4 degrés de liberté) pour chacune des six catégories de points définies auparavant, et ce afin de minimiser la somme des carrés des distances entre le point et son modèle.

Les Tableaux suivants indiquent l'ensemble des quatre paramètres de construction des modèles pour chacune des classes de puissance ou d'humidité du bois représentées sur la Figure 5-2.

Charge moyenne	Facteur d'air décalage	Monoxyde de carbone décalage		Rotation du plan	Pente de la droite
49%	2,18	334 ppm	765 ppm	40,2°	0,95
64%	1,80	179 ppm	754 ppm	38,5°	1,05
88%	1,54	33 ppm	672 ppm	36,1°	1,20

Tableau 5-1 : Paramètres de construction des modèles d'évolution du CO en fonction du facteur d'air pour du bois à 30% d'humidité sur brut.

Notons que la puissance combustible est substituée par la charge de la chaudière. Nous prenons comme puissance de référence 200 kW afin de simplifier l'expression des résultats : 100% de charge correspond à une puissance combustible égale à 200 kW.

Charge moyenne	Facteur d'air décalage	Monoxyde de carbone décalage		Rotation du plan	Pente de la droite
48%	2,05	1142 ppm	2267 ppm	41,1°	0,93
72%	1,84	623 ppm	2410 ppm	30,8°	1,25
95%	1,73	157 ppm	1551 ppm	15,7°	2,21

Tableau 5-2 : Paramètres de construction des modèles d'évolution du CO en fonction du facteur d'air pour du bois à 50% d'humidité sur brut.

Comprenons bien que les valeurs des translations en facteur d'air et en monoxyde de carbone obtenues n'ont qu'un intérêt géométrique pour la construction du modèle. En aucun cas ces valeurs représentent le facteur d'air correspondant à la valeur minimale de monoxyde de carbone produit.

5.2.2.3. Validation

Les trois figures (Figure 5-8) en page suivante permettent de visualiser la bonne situation du modèle parmi les points de mesure.

La méthode des moindres carrés optimise le lieu géométrique du modèle calculé. Ainsi, la modélisation représente correctement le seuil de facteur d'air pour lequel les émissions de monoxyde de carbone sont minimales. De surcroît, le modèle évalue le taux de monoxyde de carbone émis en fonction de la puissance et du facteur d'air choisi.

Les trois figures ci-après indiquent visuellement que le seuil de facteur d'air est correctement situé par rapport à l'évolution globale donnée par les mesures. Les valeurs du taux de monoxyde de carbone modélisé se situent dans la moyenne des mesures.

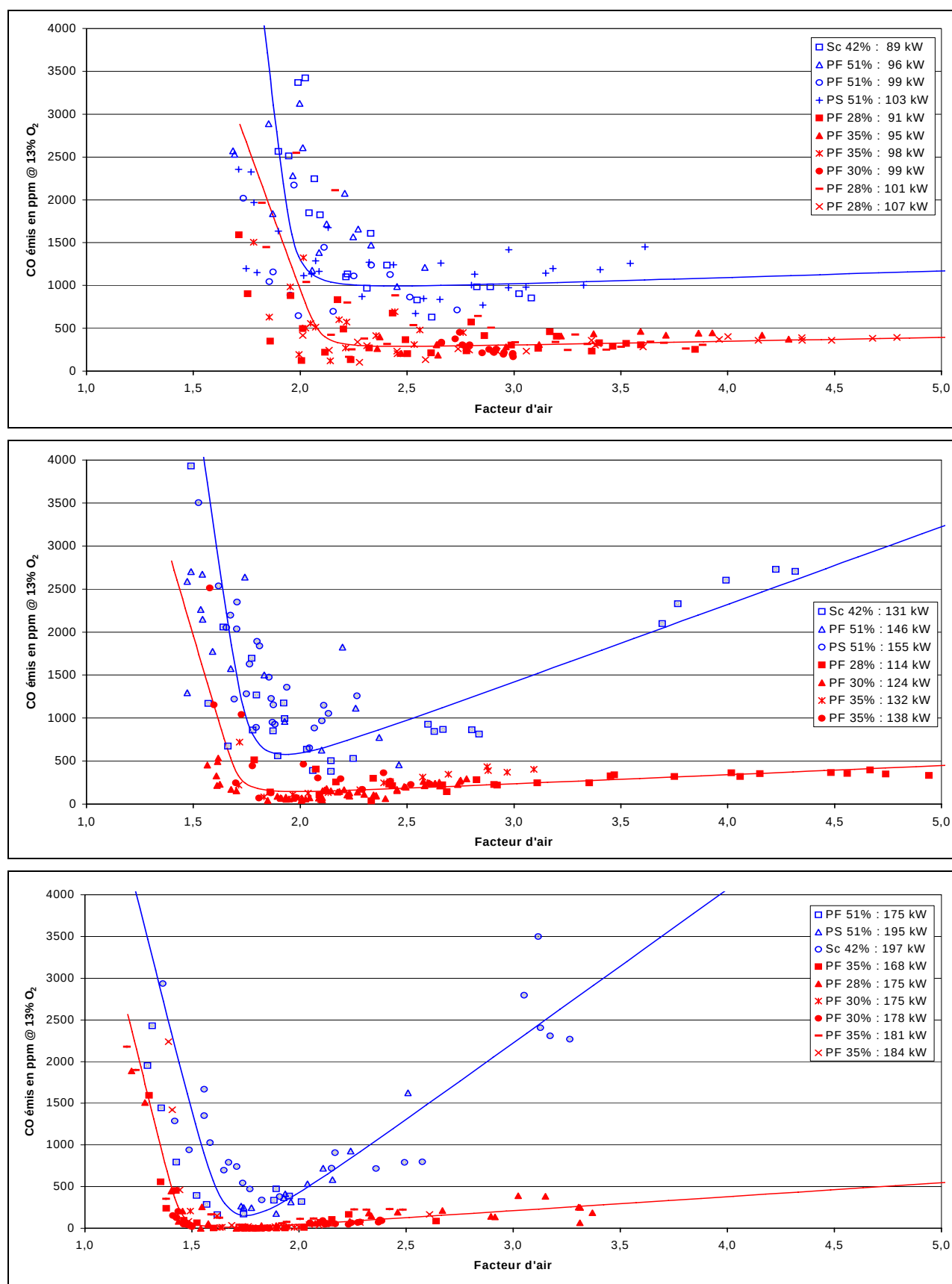


Figure 5-8 : Représentations des courbes de modélisation du monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air calculé selon le même mode de représentation que la Figure 5-3.

5.2.3. Conclusion

Les résultats expérimentaux sont conformes à ceux de la bibliographie. Les ordres de grandeurs qui lient le monoxyde de carbone au facteur d'air sont respectés. La forme de l'évolution du monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air y est identique.

L'évolution du monoxyde de carbone semble basée sur un seuil d'équilibre de facteur d'air pour lequel les émissions de monoxyde de carbone sont minimales. Au dessus ou en deçà de cette valeur de facteur d'air, les émissions de monoxyde de carbone sont plus importantes.

En parfait accord avec les conclusions du Chapitre 4, ce seuil de facteur d'air dépend fortement de la charge de la chaudière et assez peu de l'humidité du combustible.

Le modèle obtenu permet de simuler précisément les émissions de monoxyde de carbone quelles que soient les données d'entrée de la chaufferie : puissance nécessaire, humidité du combustible et facteur d'air imposé.

Ainsi validés, les résultats du modèle sont utilisés dans la suite de cette étude pour prédire les émissions de monoxyde de carbone en fonction des conditions de combustion, et pour quantifier la réduction des émissions qui pourrait être obtenue par modification de la régulation de fonctionnement de la chaudière.

5.3. Optimisation de la régulation de fonctionnement

La modélisation offre une représentation des émissions de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air, de la charge de la chaudière et de l'humidité du bois.

Dans la pratique ces paramètres ont chacun une origine et une intégration différente :

- l'humidité du bois est une variable difficilement maîtrisable a priori. Elle dépend essentiellement du fournisseur de bois fragmenté. L'humidité n'est vraisemblablement pas mesurable en continu pour être implémentée dans l'automate de régulation de la chaudière ;
- la charge de la chaudière est une variable d'utilisation de la chaudière. Rappelons qu'en la matière, notre but consiste à maîtriser les émissions de monoxyde de carbone pour un spectre de charge le plus large possible. Contrairement à l'humidité, ce paramètre est calculé par l'automate de régulation et, par conséquent, peut être utilisé directement sans instrumentation supplémentaire ;
- le facteur d'air est un paramètre théorique qui lie le débit d'air injecté au débit d'air stœchiométrique. Ce paramètre est matérialisé par le flux d'oxygène en excès que l'on peut mesurer dans les fumées grâce à une sonde Lambda. Rappelons que ce type de sonde équipe la plupart des chaudières automatiques.

Autrement dit, le paramètre de modélisation qu'est le facteur d'air doit être traduit en terme de teneur en oxygène dans les fumées sèches conformément à la mesure effectuée par une sonde Lambda pour pouvoir être implémentée dans un automate de régulation.

De surcroît, la modélisation ainsi traduite permet de lier directement les émissions de monoxyde de carbone à la teneur en oxygène mesurée dans les fumées sèches, ce qui ouvre la possibilité d'évaluer les conséquences d'un fonctionnement classique (consigne d'oxygène indépendante de la charge) ou d'un fonctionnement optimisé.

5.3.1. Conversion du facteur d'air

En reprenant les équations du Chapitre 3, on obtient l'expression liant la teneur en oxygène dans les fumées sèches X_{O_2} au facteur d'air f :

$$X_{O_2} = 0,208 \cdot \left(\frac{f-1}{f} \right) \quad (\text{Eq. 5-3})$$

Cette expression traduit ainsi le facteur d'air en terme de teneur en oxygène mesurée.

Si l'on représente cette relation sur l'intervalle de validité du facteur d'air, on obtient la Figure 5-9.

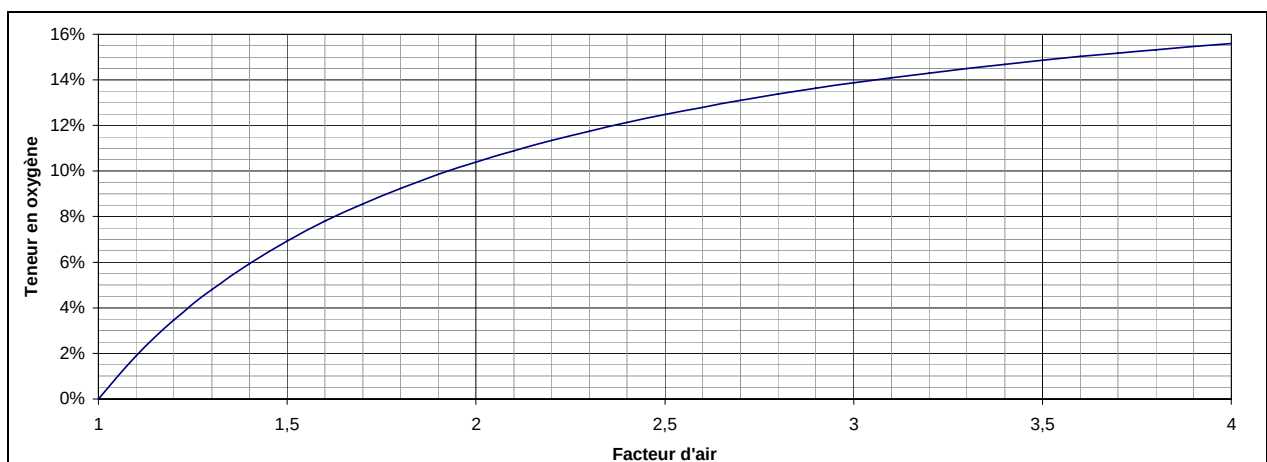


Figure 5-9 : Abaque liant le teneur en oxygène dans les fumées sèches au facteur d'air.

5.3.2. Emissions liées à une régulation classique

Les régulations classiques mises en œuvre sur les chaudières automatiques sont basées sur le maintien d'un taux d'oxygène constant indépendant de la charge de la chaudière.

La modélisation mise en place au début de ce Chapitre permet d'évaluer les émissions de monoxyde de carbone inhérentes à la charge de la chaudière et à l'humidité du bois utilisé en fonction du taux d'oxygène donné en consigne.

Les Figures suivantes représentent les émissions de monoxyde de carbone en fonction de la charge de la chaudière selon la valeur de la consigne d'oxygène choisie (9, 10, 11, 12, 13 et 14%). La Figure 5-10 présente les résultats obtenus pour du bois à 50% d'humidité sur brut. La Figure 5-11 présente les mêmes résultats obtenus pour du bois à 30% d'humidité sur brut.

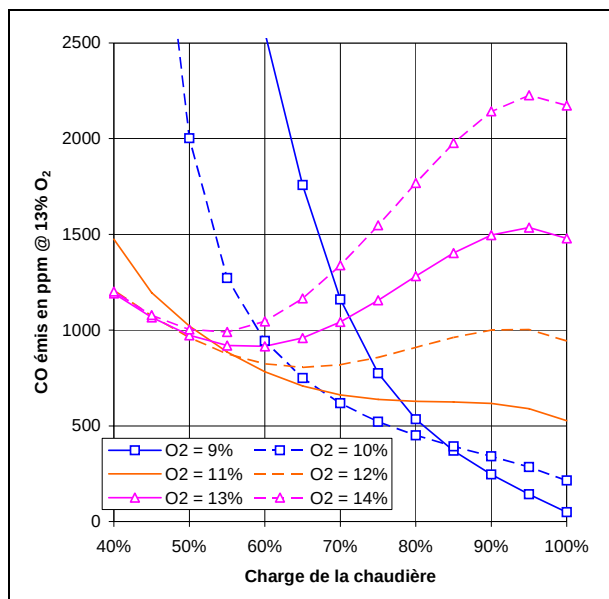


Figure 5-10 : CO émis en fonction de la charge selon la consigne d'oxygène choisie.
Utilisation de bois à 50% d'humidité sur brut.

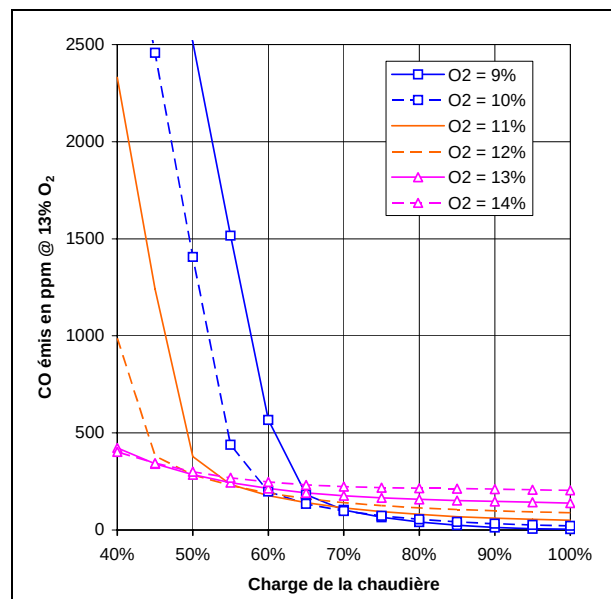


Figure 5-11 : CO émis en fonction de la charge selon la consigne d'oxygène choisie.
Utilisation de bois à 30% d'humidité sur brut.

Ces résultats montrent qu'une régulation par teneur en oxygène fixe ne permet pas d'obtenir de bons résultats quelle que soit la charge de fonctionnement de la chaudière. Ce phénomène est d'autant plus vrai que l'humidité du bois augmente.

Une consigne d'oxygène égale à 10% permet d'obtenir des émissions de monoxyde de carbone relativement les plus faibles pour une charge variant entre 60% et 100%. Mais cette consigne provoque une très forte augmentation des émissions lorsque la charge diminue en deçà de 60%, surtout si le bois est humide.

En revanche, si la consigne d'oxygène est égale à 11%, les émissions de monoxyde de carbone ne sont pas optimisées lorsque la charge dépasse 60% mais elles restent dans le même ordre de grandeur malgré une charge qui peut alors diminuer jusqu'à 50%.

Ainsi, une consigne d'oxygène de l'ordre de 11% permet d'obtenir une plus grande *souplesse* d'utilisation de la chaudière quelle que soit la qualité du combustible, même si elle ne permet pas d'optimiser les émissions dans aucun cas.

Si la consigne est trop élevée (supérieure à 12%), les conséquences sur la combustion d'un bois à 30% d'humidité sont limitées. Une consigne supérieure ou égale à 12% permet de maintenir les émissions de monoxyde de carbone inférieures au seuil de la classe 3 de la norme en vigueur [32] (cf. page 2-42) qui est de 1200 mg/Nm³ @ 10% O₂, soit 700 ppm @ 13% O₂.

En revanche, la combustion d'un bois à 50% d'humidité y est très sensible : les émissions de monoxyde de carbone augmentent fortement avec la charge dès lors que la consigne d'oxygène dépasse 11%. Pour une consigne de 12% d'oxygène les émissions de monoxyde de carbone sont maintenues en deçà de 1150 ppm @ 13% O₂, soit 2000 mg/Nm³ @ 10% O₂, qui correspondent au seuil de la classe 2 de la norme [32].

Les résultats montrent ainsi clairement que pour réduire les émissions de monoxyde de carbone quelles que soient les conditions, il est indispensable de modifier la consigne d'oxygène en fonction de la charge et de l'humidité.

5.3.3. Régulation optimisée

5.3.3.1. Optimisation dépendante de l'humidité du combustible

En recherchant les minimums de monoxyde de carbone donnés par le modèle pour chaque valeur de la charge et selon l'humidité du bois utilisé, on obtient une évaluation de la consigne d'oxygène à appliquer dans chaque cas de figure. Cette évolution du taux d'oxygène correspond par conséquent à une optimisation du fonctionnement de la chaudière en terme de monoxyde de carbone.

Les Figures suivantes représentent la consigne d'oxygène à appliquer en fonction de la charge de la chaudière ainsi que les émissions de monoxyde de carbone attendues.

La Figure 5-12 est basée sur la modélisation des essais de combustion de bois à 50% d'humidité sur brut, et la Figure 5-13 sur du bois à 30% d'humidité sur brut.

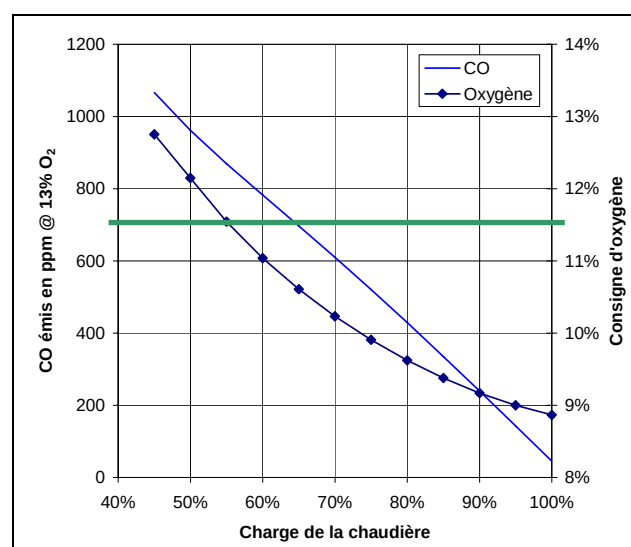


Figure 5-12 : Consigne d'oxygène à appliquer au bois à 50% d'humidité.

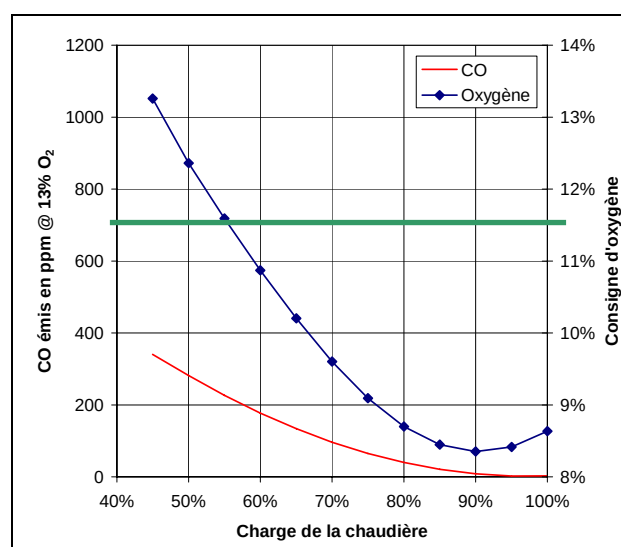


Figure 5-13 : Consigne d'oxygène à appliquer au bois à 30% d'humidité.

Que le bois utilisé soit à 30% ou à 50% d'humidité sur brut, on visualise des évolutions du taux d'oxygène optimal ayant des formes et des valeurs similaires. Dans un but de généralisation du modèle à tout ordre d'humidité du bois, il devient intéressant d'évaluer les conséquences d'une consigne d'oxygène moyenne par rapport à ces deux consignes dépendantes de l'humidité. Cette consigne moyenne deviendrait alors indépendante de l'humidité du combustible.

5.3.3.2. Optimisation indépendante de l'humidité

Rendre la régulation de fonctionnement indépendante de l'humidité du combustible employé revêt un intérêt évident. La modélisation permet d'estimer l'impact en terme d'émissions de monoxyde de carbone qu'impliquerait l'utilisation d'une consigne indépendante de l'humidité. Vue la proximité des consignes d'oxygène optimisées en fonction de l'humidité obtenues précédemment, nous pouvons calculer une consigne d'oxygène moyenne et en éprouver l'efficacité quant aux émissions de monoxyde de carbone minimales.

La Figure 5-14 représente les consignes d'oxygène optimisées pour du bois à 30% et à 50% ainsi que la consigne moyenne qui en découle, le tout en fonction de la charge de la chaudière.

La Figure 5-15 représente les évolutions du monoxyde de carbone émis lors de l'emploi des consignes optimisées dépendantes et indépendantes de l'humidité selon deux classes d'humidité du combustible.

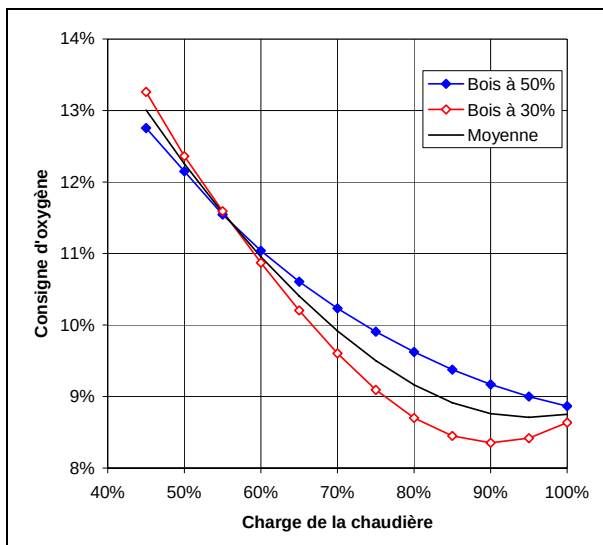


Figure 5-14 : Représentation comparée des consignes d'oxygène des bois à 30% et 50%.

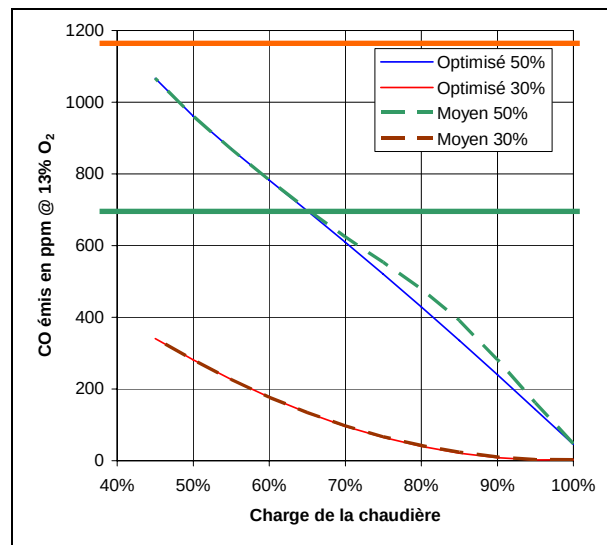


Figure 5-15 : Représentation comparée des émissions de monoxyde de carbone.

La Figure 5-14 montre le faible écart existant entre les consignes d'oxygène optimisées dépendantes de l'humidité du combustible. La consigne moyenne semble suffisamment proche de chacune des consignes optimisées pour n'engendrer qu'un faible écart sur les émissions de monoxyde de carbone.

La Figure 5-15 confirme le très faible impact sur les émissions de monoxyde de carbone dû à l'emploi d'une consigne optimisée indépendante de l'humidité du combustible. En effet, ces courbes montrent que les émissions de monoxyde de carbone ne sont pas vraiment différentes que le modèle utilisé soit le modèle optimisé à l'humidité du bois ou le modèle moyen. Cette Figure montre également que les émissions de monoxyde de carbone sont d'autant plus élevées que l'humidité du combustible augmente.

La consigne d'oxygène moyenne calculée en fonction de la charge peut être approchée par le polynôme suivant :

$$X_{O_2} = 0,0682.\Phi^3 + 0,0077.\Phi^2 - 0,2012.\Phi + 0,2127 \quad (\text{Eq. 5-4})$$

où : X_{O_2} est la consigne d'oxygène ;

Φ est la charge de la chaudière.

Ce résultat est d'autant plus intéressant qu'il permettra ainsi de s'affranchir de l'humidité du combustible et de mettre en œuvre une régulation optimale indépendante de l'humidité.

5.4. Simulation

La comparaison des différents résultats se trouve facilitée si elle s'inscrit dans un contexte commun représentatif. En l'occurrence, nous avons choisi de simuler les émissions de monoxyde de carbone sur une journée de fonctionnement type d'une chaudière bois. Pour ce faire, parallèlement aux essais en laboratoire, des mesures continues sur une chaufferie bois alimentant logements et bureaux ont permis de déterminer les données d'énergie fournie au réseau de chauffage heure par heure pendant trois ans. Les résultats ont permis de représenter une journée de chauffe type.

La Figure 5-16 représente ainsi la moyenne journalière normalisée de l'énergie fournie au réseau de chauffage par tranche horaire. Cette moyenne est effectuée sur les données cumulées de deux saisons de chauffe.

Notons bien que cette représentation de la puissance thermique à fournir durant une journée est une moyenne globale qui inclut des journées de printemps comme des journées d'hiver, des jours de semaine comme des jours chômés. Il est évident que la chaudière fournit 100% de sa charge pendant plusieurs heures durant les semaines d'hiver et qu'elle fonctionne souvent en deçà de 40% de sa charge durant l'intersaison. Ainsi, cette courbe moyenne peut être prise comme base pour évaluer les émissions de monoxyde de carbone durant une journée type.

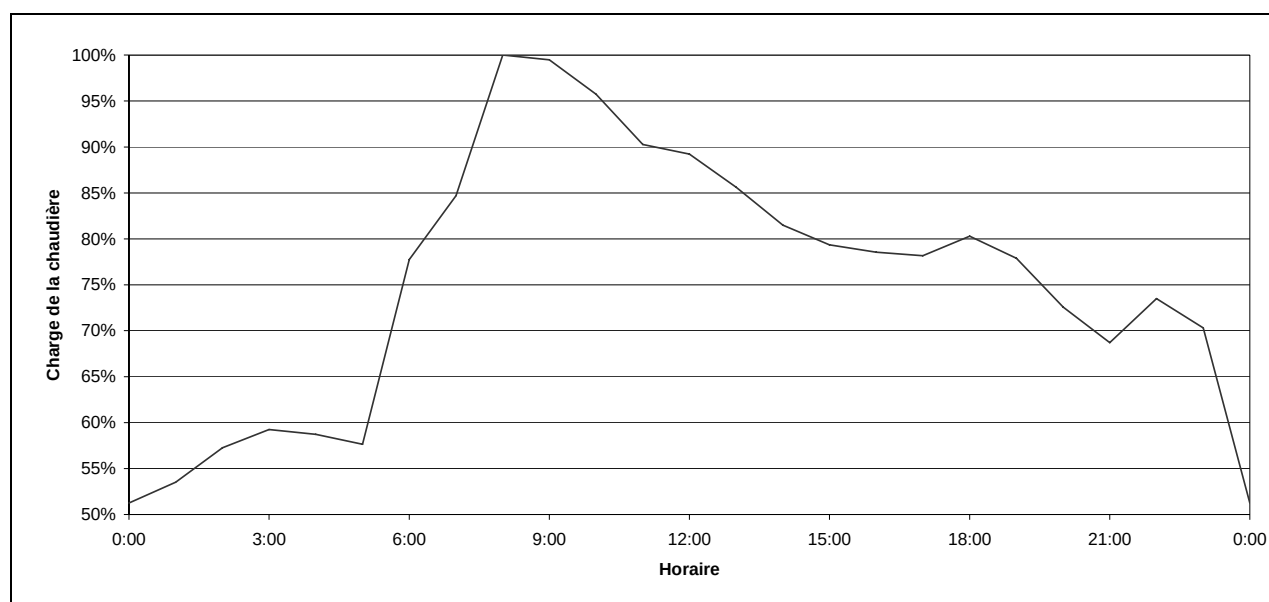


Figure 5-16 : Variation journalière de la charge.

La Figure 5-16 révèle un fonctionnement à mi-régime de minuit à 5h du matin qui s'ensuit par une forte augmentation de la puissance appelée. A 8h, le plus gros appel de puissance de la journée sert à normaliser l'ensemble de la journée. Ensuite, la charge appelée diminue lentement au cours de la journée jusqu'à 23h.

Nous appliquons cette variation de la charge à une chaudière d'une puissance combustible de 200 kW. Cette puissance sert à calculer le débit de bois nominal. La valeur choisie du taux d'oxygène et le débit de bois permettent de déterminer le débit de fumées sèches. La modélisation donne la concentration en monoxyde de carbone dans les fumées sèches en fonction de la charge et du taux d'oxygène. Nous en déduisons alors la quantité de monoxyde de carbone émise quelles que soient les conditions d'entrée.

La quantité de monoxyde de carbone émise durant cette journée type forme une représentation permettant de chiffrer l'impact conséquent à un mode de régulation de la chaudière. La comparaison des différents modes de régulation classiques ou optimisés sur du bois plus ou moins humide permet alors de quantifier les améliorations potentielles en terme de monoxyde de carbone.

5.4.1. Expression des calculs

La puissance combustible nominale de la chaudière simulée est de 200 kW. Les différents paramètres utilisés pour les calculs sont les suivants :

Humidité du bois	50%	30%	
PCS	20500		kJ/kg
PCI	8000	12240	kJ/kg
Puissance combustible	200		kW
Débit de bois humide	90	59	kg/h
Débit de bois anhydre	1875	1716	mol/h

Tableau 5-3 : Récapitulatif des débits de bois en fonction de l'humidité sur brut.

Le débit molaire de bois anhydre $\dot{q}_{\text{bois.anhydre}}$ permet de calculer le débit molaire de fumées sèches $\dot{q}_{\text{fumées.sèches}}$ grâce à la charge et à la teneur en oxygène X_{O_2} .

$$\dot{q}_{\text{fumées.sèches}} = \text{charge} \cdot \frac{1,03}{0,208 - X_{O_2}} \cdot \dot{q}_{\text{bois.anhydre}} \quad (\text{Eq. 5-5})$$

Le débit massique de monoxyde de carbone $\dot{m}_{CO}$ est calculé à partir de la concentration en monoxyde de carbone X_{CO} dont on annule la correction à oxygène constant par le terme $\frac{0,208 - 0,13}{0,208 - X_{O_2}}$.

La concentration en monoxyde de carbone X_{CO} exprimée en ppm est corrigée par le facteur 10^{-6} afin de l'exprimer en mol par mol, ce qui permet de calculer le débit molaire de monoxyde de carbone en multipliant cette concentration au débit molaire de fumées sèches $\dot{q}_{\text{fumées.sèches}}$. La masse molaire du monoxyde de carbone, soit 28 g/mol, permet alors de convertir le débit molaire en débit massique.

$$\dot{m}_{CO} = \frac{0,208 - 0,13}{0,208 - X_{O_2}} \cdot \frac{X_{CO}}{10^6} \cdot 28 \cdot \dot{q}_{\text{fumées.sèches}} \quad (\text{Eq. 5-6})$$

Précisons que la concentration en monoxyde de carbone X_{CO} est évaluée à partir de la modélisation qui prend en compte l'humidité du bois H_b , la charge et la teneur en oxygène X_{O_2} .

$$X_{CO} = f(H_b, \text{charge}, X_{O_2}) \quad (\text{Eq. 5-7})$$

Le cycle journalier de simulation de la Figure 5-16 évalué sur une chaudière de 200 kW représente une quantité d'énergie totale de 3643 kWh. Bien que cela ne soit pas notre but présent, cette valeur peut servir à convertir les émissions de monoxyde de carbone en un terme générique de masse émise par unité d'énergie produite. Ce mode d'expression permet alors de comparer les performances environnementales d'unités de combustion de puissances différentes.

5.4.2. Emissions dues à une régulation classique

En calculant la quantité de monoxyde de carbone émise durant un cycle de charge type selon un mode de régulation à taux d'oxygène constant, on obtient les résultats suivants. La Figure 5-17 concerne la combustion d'un bois à 50% d'humidité sur brut, et la Figure 5-18 un bois à 30% d'humidité sur brut.

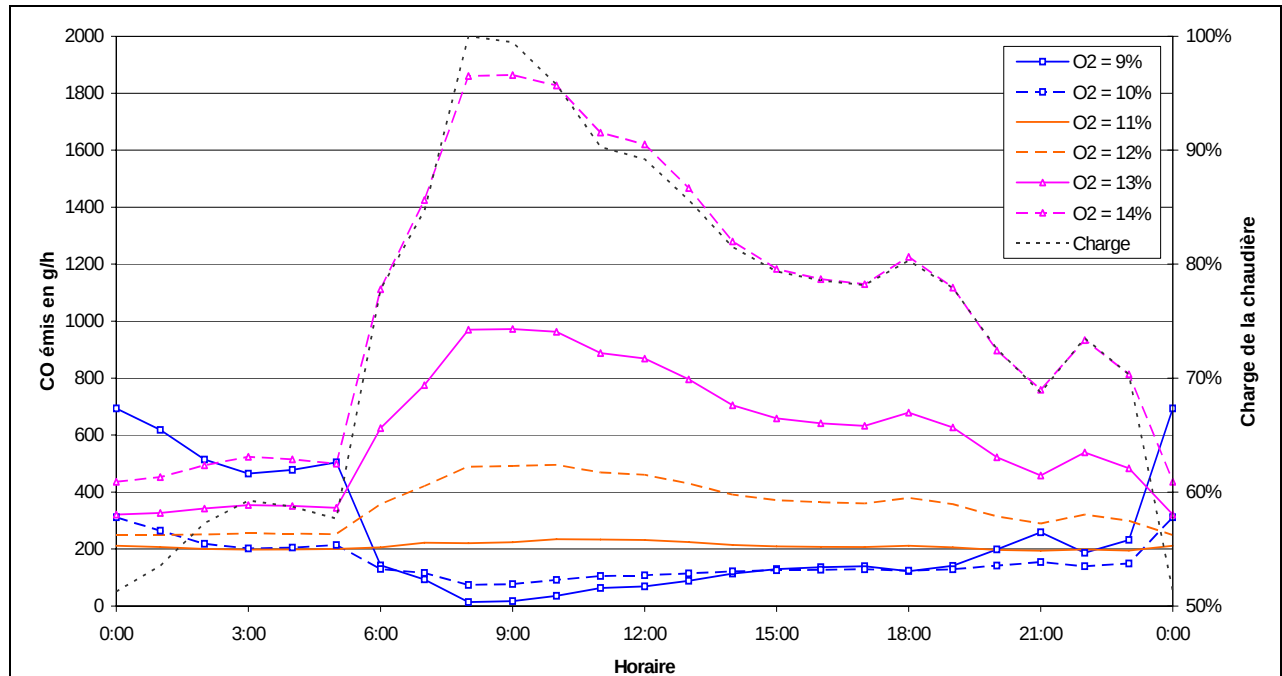


Figure 5-17 : Quantité de CO émis durant une journée type en fonction de la consigne d'oxygène choisie. Combustion de bois à 50% d'humidité sur brut.

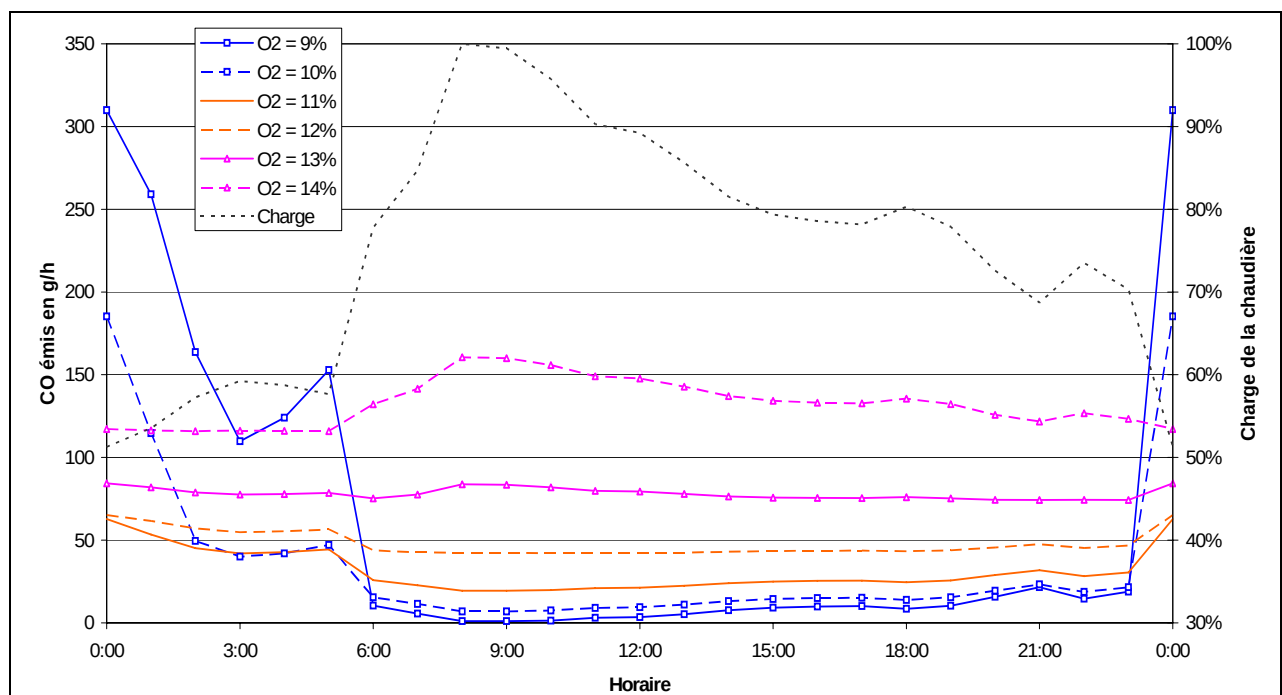


Figure 5-18 : Quantité de CO émis durant une journée type en fonction de la consigne d'oxygène choisie. Combustion de bois à 30% d'humidité sur brut.

Alors, une consigne d'oxygène de 11% semble la plus appropriée aux vues de la Figure 5-10 ou de la Figure 5-11 pour maintenir de faibles émissions de monoxyde de carbone tout au long de la journée. A contrario, l'évaluation de la quantité de monoxyde de carbone émise sur une journée type montre que la consigne d'oxygène génératrice d'un minimum de CO se situe plutôt aux alentours de 10%.

La sommation sur une journée de la quantité de monoxyde de carbone émise permet de mesurer l'impact de l'humidité du bois ou d'un mauvais réglage. Le Tableau 5-4 récapitule les émissions journalières de monoxyde de carbone en fonction de la consigne d'oxygène appliquée à la régulation et de l'humidité du bois utilisé.

Consigne d'oxygène	9,0%	9,5%	10,0%	10,5%	11,0%	11,5%	12,0%	12,5%	13,0%	13,5%	14,0%
Bois à 50%	5454	4093	3575	4018	5053	6549	8570	11259	14845	19669	26245
Bois à 30%	1279	925	727	657	733	902	1138	1453	1871	2431	3191

Tableau 5-4 : Quantité de CO émis durant une journée type de fonctionnement en fonction de la consigne d'oxygène choisie. Valeur donnée en g par jour type.

Le premier résultat issu de ces calculs montre que, malgré une chaudière ayant subi un réglage peaufiné, la combustion d'un bois à 50% d'humidité sur brut produit environ cinq fois plus de monoxyde de carbone que la combustion d'un bois à 30% d'humidité sur brut. Cependant, les valeurs obtenues demeurent très faibles et très largement inférieures à celles énoncées dans la norme NF EN 303-5.

Concernant la consigne d'oxygène appliquée en régulation, le minimum d'émissions de monoxyde de carbone est obtenu pour une consigne de 10% dans le cas d'un bois à 50% d'humidité sur brut et pour une consigne de 10,5% dans le cas d'un bois à 30%. Si la consigne appliquée à la régulation est fautive d'un demi point d'oxygène, cela entraîne une augmentation de la quantité de monoxyde de carbone produite d'environ 15%. Si cette erreur de consigne d'oxygène est d'un point, l'augmentation du CO émis est de 40%.

Cette première évaluation montre deux principaux résultats :

- la valeur de consigne optimale d'oxygène est similaire quelle que soit l'humidité du combustible, entre 10% et 10,5% d'oxygène pour une journée de chauffe moyenne ;
- lorsque le combustible est humide, la précision de la consigne est très importante. Lorsque l'on s'écarte de la valeur optimale, les émissions moyennes augmentent très rapidement. Pour un combustible sec, ce phénomène est beaucoup moins visible.

5.4.3. Emissions dues à une régulation optimisée

La courbe liant le taux d'oxygène optimum en fonction de la charge de la chaudière (Figure 5-12 pour du bois à 50%, Figure 5-13 pour du bois à 30%) permet d'évaluer l'évolution de la consigne d'oxygène à appliquer à la régulation au cours de la journée, ainsi que la quantité de monoxyde de carbone produite tout au long de la journée type.

La Figure 5-19 représente ces évolutions conjointes de l'oxygène et du CO au cours de la journée de chauffage type lors de la combustion d'un bois à 50% d'humidité sur brut. Il en est de même pour la Figure 5-20 qui traite de la combustion d'un bois à 30% d'humidité sur brut.

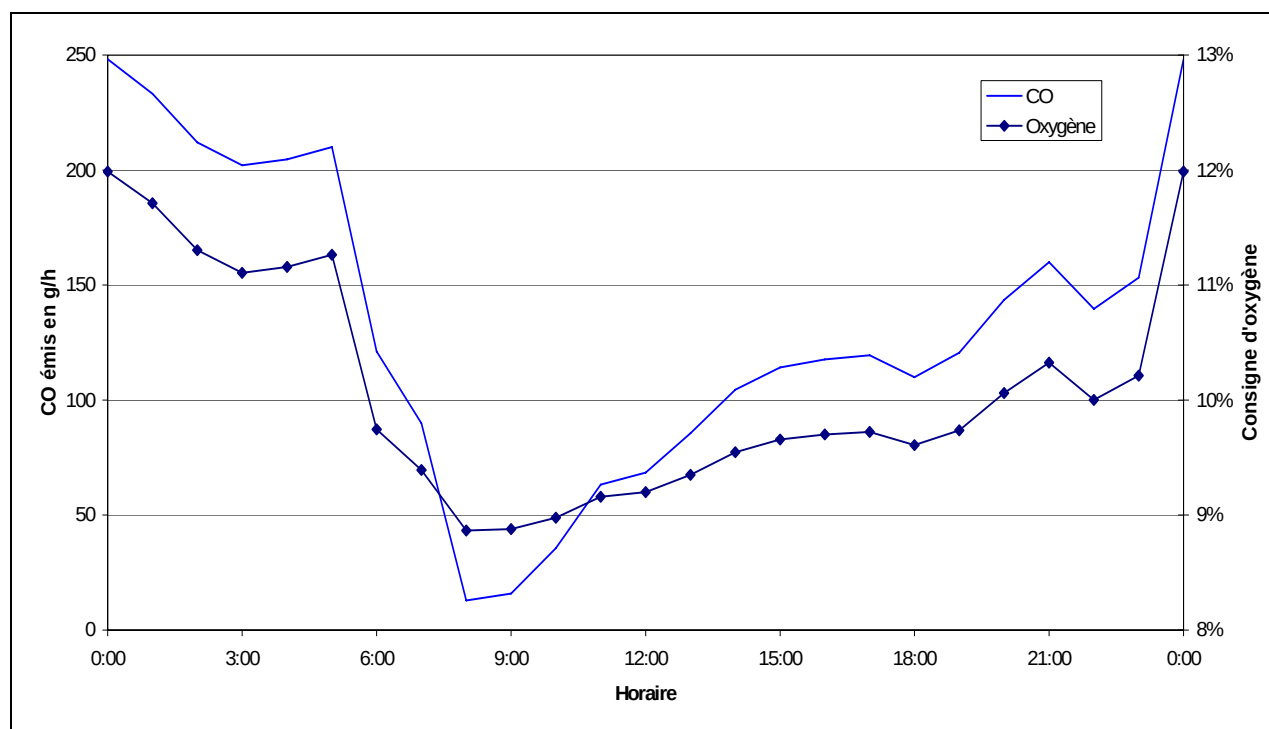


Figure 5-19 : Quantité de CO émis durant une journée type avec une régulation optimisée pour la combustion de bois à 50% d'humidité sur brut.

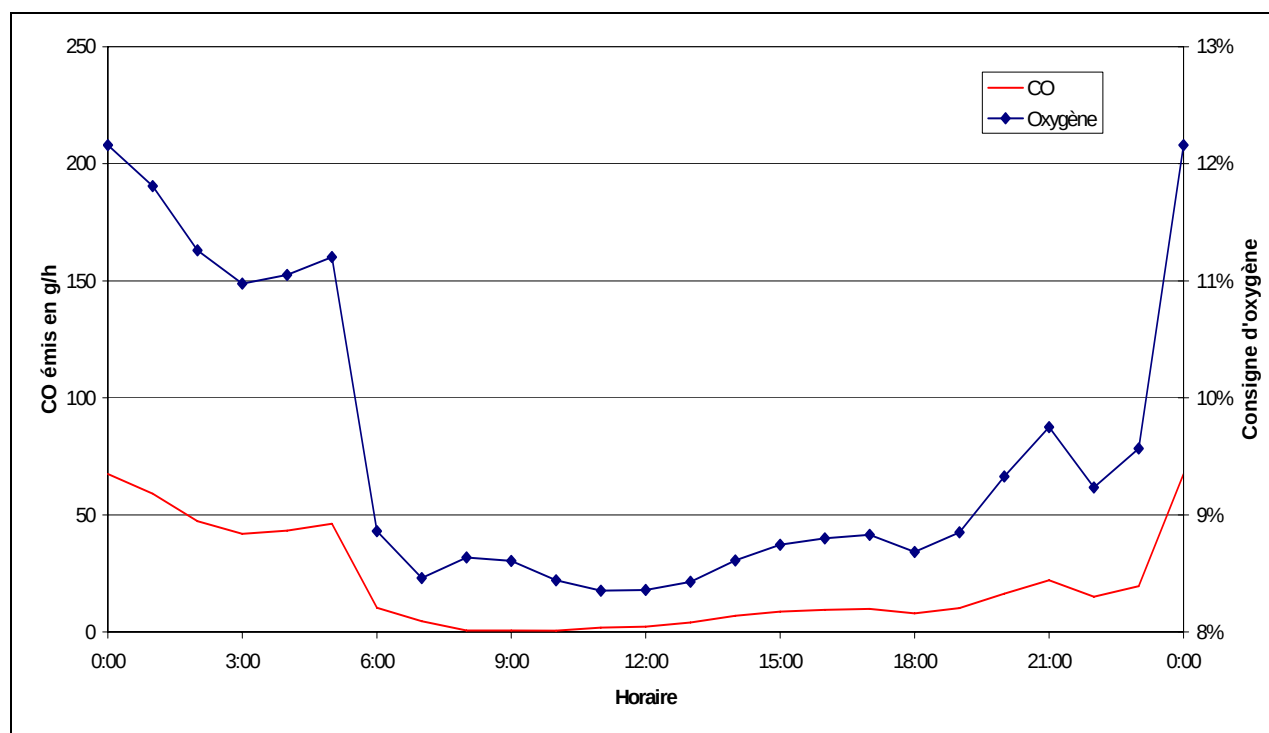


Figure 5-20 : Quantité de CO émis durant une journée type avec une régulation optimisée pour la combustion de bois à 30% d'humidité sur brut.

Dans notre démarche d'affranchissement de l'intégration de l'humidité du bois dans la régulation, nous présentons sur la Figure 5-21 les résultats de la régulation moyenne illustrée par la Figure 5-14.

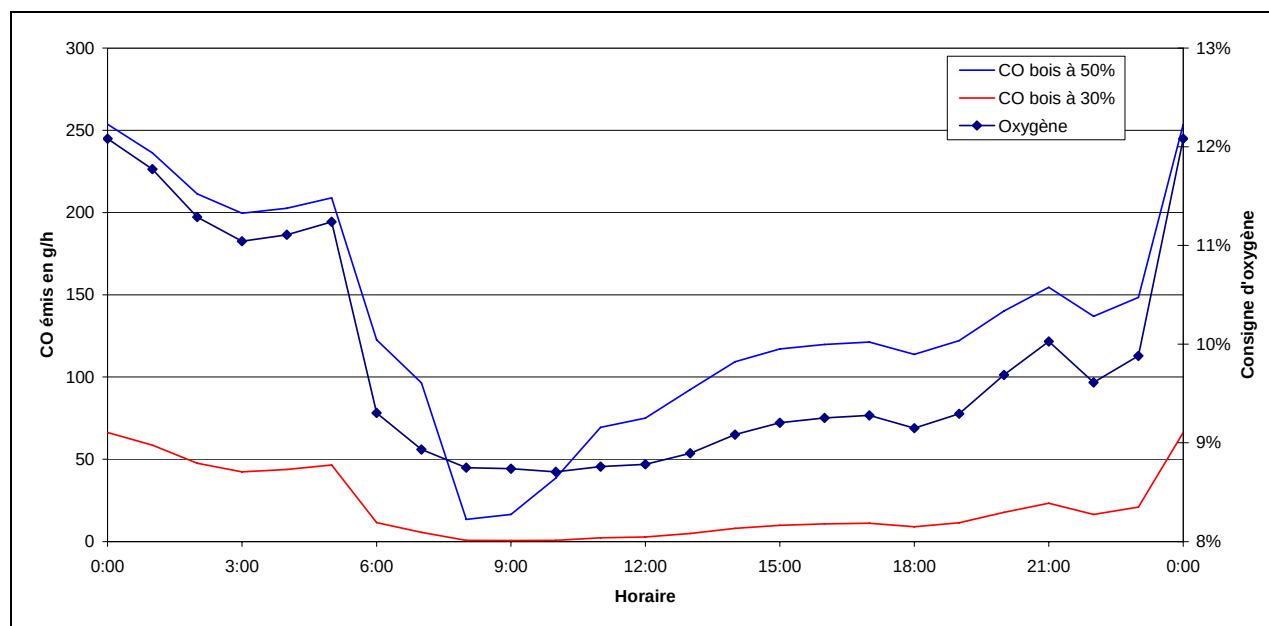


Figure 5-21 : Quantité de CO émis durant une journée type avec une régulation optimisée pour la combustion de bois d'humidité sur brut de 30% à 50%.

Le Tableau 5-5 récapitule les quantités de monoxyde de carbone produites par la combustion de bois à 50% et à 30% d'humidité sur brut lors d'applications des consignes d'oxygène optimisées pour l'humidité et d'optimisation moyenne. Les modes de régulations optimisés servent de base de comparaison pour évaluer les performances de la régulation moyenne optimisée, afin de déterminer la nécessité de prendre en compte l'humidité pour améliorer la régulation.

Modèle utilisé	Optimisé	Moyen	Augmentation
Bois à 50%	3086	3121	1,1%
Bois à 30%	456	473	3,9%

Tableau 5-5 : Récapitulatif des quantités de monoxyde de carbone émises en g/jour durant une journée de chauffe type en fonction de l'humidité du bois et du modèle de régulation utilisé.

Le Tableau 5-5 donne les minimums de monoxyde de carbone produits durant cette journée de chauffe type illustrée par la Figure 5-16 :

- La combustion d'un bois à 50% d'humidité sur brut produit un minimum de 3086 g de CO pour produire 3643 kWh, soit 0,85 g/kWh. Cette production d'énergie demande d'investir 1640 kg de bois humide soit une production de 1,88 g de CO par kg de bois humide. Cela représente 34150 moles de bois anhydre qui produisent 110 moles de monoxyde de carbone, soit 1 atome de carbone pour 310 qui est transformé en CO plutôt qu'en CO₂. Pour ce même bois, le fait d'utiliser une régulation tenant compte de l'humidité ne permet pas de gagner plus 1,1% par rapport à la régulation moyenne. Il semble ainsi qu'il est possible de considérer une régulation moyenne.

- La combustion d'un bois à 30% d'humidité sur brut produit un minimum de 456 g de CO pour produire 3643 kWh, soit 0,125 g/kWh. Cette production d'énergie demande d'investir 1072 kg de bois humide soit une production de 425 mg de CO par kg de bois humide. Cela représente 31250 moles de bois anhydre qui produisent 16,3 moles de monoxyde de carbone, soit 1 atome de carbone pour 1920 qui est transformé en CO plutôt qu'en CO₂. Comme pour le bois humide, l'utilisation d'une régulation ne prend pas en compte l'humidité n'augmente que de 3,9% les émissions de monoxyde de carbone. Il semble ainsi, là encore, qu'une régulation moyenne soit suffisante.
- Dans ces conditions optimales une même production d'énergie génère 6,8 fois plus de monoxyde de carbone si du bois à 50% d'humidité sur brut est utilisé à la place d'un bois à 30%.
- Ces résultats montrent qu'une régulation indépendante de l'humidité fournit des résultats très proches de ceux les plus optimisés quelle que soit l'humidité du bois. Ainsi, ce type de régulation est applicable directement sur la plupart des installations existantes. Seules deux données sont nécessaires : la charge (entre 0 et 100% de la puissance nominale) et la teneur en oxygène (mesurée par une sonde Lambda).

Il reste maintenant à caractériser les émissions polluantes liées à la régulation optimisée par rapport à celles dues à une régulation classique (teneur en oxygène fixe) la plus performante.

Le Tableau 5-6 compare ainsi ces résultats.

Humidité	Type de régulation de l'oxygène	Emissions
50%	Consigne fixée à 10%	3575 g
	Optimisée à 50% humidité	3086 g
	Optimisée indépendante de l'humidité	3121 g
30%	Consigne fixée à 10,5%	657 g
	Optimisée à 30% humidité	456 g
	Optimisée indépendante de l'humidité	473 g

Tableau 5-6 : Comparatif des performances des différents types de régulation en terme d'émissions de monoxyde de carbone.

L'amélioration est plus franche sur la combustion d'un bois à 30% d'humidité sur brut que pour un bois à 50%. En effet, dans le cas d'un bois à 30%, la régulation optimisée permet de diminuer de 44% les émissions de CO produites par une régulation classique. Ce gain demeure égal à 39% si une régulation optimisée indépendante de l'humidité est substituée à la régulation classique.

Dans le cas d'un bois à 50% d'humidité sur brut, ces gains sont plus faibles en terme de proportions. La régulation optimisée diminue de 16% les émissions dues à une régulation classique, tandis que la régulation optimisée moyenne les réduit de 15%. Cependant, les teneurs en monoxyde de carbone étant plus élevées pour un bois humide, le gain en terme de quantité émise est aussi important : pour le bois humide le gain est de 454 g/jour alors qu'il est de 184 g/jour pour un bois plus sec.

En revanche, si on raisonne en terme de quantité de monoxyde de carbone économisée, on note alors que la conversion d'une régulation classique en régulation optimisée permet d'obtenir une économie de monoxyde de carbone produit 2,5 fois plus importante sur une chaufferie brûlant du bois à 50% d'humidité sur brut que si elle emploie du bois à 30%.

5.5. Conclusions

L'évolution du monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air peut être modélisée simplement par deux droites représentant respectivement un régime de combustion en deçà et au-delà d'un point d'équilibre du facteur d'air qui dépend de la charge demandée à la chaudière.

La valeur du facteur d'air optimal dépend peu de l'humidité du bois et beaucoup de la charge de la chaudière, si bien qu'une loi unificatrice permet de s'affranchir de l'humidité du bois utilisé tout en gardant le caractère d'optimisation souhaité.

La conversion du terme de facteur d'air en terme de teneur en oxygène mesurée dans les fumées sèches rend applicable cette loi directement sur tout automate de régulation connecté à une sonde Lambda.

La simulation de cette loi de régulation qui lie la consigne d'oxygène à la charge demandée à la chaudière montre que d'importantes quantités de monoxyde de carbone rejetées dans l'atmosphère pourraient être économisées par simple optimisation de la régulation, sans aucune modification physique des chaufferies existantes.

Le gain obtenu en terme de réduction des émissions de monoxyde de carbone est compris entre 15% et 40% selon les conditions.

6. Conclusion

Les principaux impacts de ce travail permettent d'obtenir des gains ergonomiques, économiques et environnementaux dans l'utilisation de chaufferies automatiques au bois déchiqueté. En effet, l'optimisation de la combustion apportée à l'issue de cette étude a des conséquences directes sur les émissions de monoxyde de carbone rejetées dans l'atmosphère, soit un gain environnemental. La réduction des imbrûlés induit quelques économies de combustible, limite l'entretien du matériel permet d'obtenir des résultats semblables à ceux des chaudières à combustibles fossiles. Enfin, un fonctionnement optimal quelles que soient les conditions d'emploi de la chaudière engendre un confort d'utilisation supplémentaire.

Afin d'obtenir cette optimisation finale, nous avons dû commencer par faire un état de l'art de la combustion du bois fragmenté. Le bois, matière complexe produite par la Nature, a un caractère hygroscopique qui impose de distinguer la part de matière anhydre de l'eau piégée au sein de sa structure fibreuse. Ainsi, l'humidité est le paramètre hautement variable du bois dont l'influence, directe ou indirecte, s'est avérée la plus forte. Ce constat participe à considérer cette eau comme une matière distincte, quantifiable par des mesures simples et fiables, intrinsèque au flux de bois.

En revanche, les caractéristiques du bois anhydre sont homogènes et relativement indépendantes de l'essence considérée. Sa composition élémentaire globale peut être approchée par une formulation unique où le carbone représente la moitié, l'hydrogène 6% et l'oxygène 44% de la masse de bois anhydre. Le pouvoir calorifique supérieur peut être considéré comme égal à 20500 kJ/kg quelle que soit l'origine du bois fragmenté utilisé. La masse volumique apparente semble dépendante de la répartition granulométrique. Le taux de cendres d'un bois courant représente environ 1% de la masse de bois anhydre.

L'eau intervient dans l'expression des différentes caractéristiques du bois. En particulier, l'eau agit sur la quantité d'énergie délivrée par une masse de combustible humide lors de la combustion. Il apparaît un paradoxe : l'eau tend à diminuer le pouvoir calorifique inférieur du combustible, augmente le débit de fumées et baisse la température du milieu réactionnel en conséquence. Mais l'eau favorise également l'oxydation du principal précurseur du dioxyde de carbone qu'est le monoxyde de carbone.

L'étude bibliographique nous a enfin permis de faire le point sur les méthodes d'optimisation de la combustion en chaudière automatique. Une première étude menée sur une chaudière automatique industrielle indique alors qu'une humidité croissante provoque davantage de monoxyde de carbone, et ce dans un intervalle d'humidité jugé comme élevé (entre 42% et 52% d'humidité sur brut). Une seconde étude menée sur une chaudière automatique à double foyer indique que le minimum d'émissions de monoxyde de carbone est obtenu pour un facteur d'air variant avec la puissance délivrée par la chaudière.

A partir de ces résultats, nous avons choisi un premier axe d'étude relatif au combustible dont nous avons fait varier la granulométrie et l'humidité : nous avons étudié la combustion de sciure, de plaquettes de scierie et de plaquettes forestières d'humidités différentes. Le second axe d'étude porte sur les paramètres de la combustion, c'est-à-dire le débit de bois (i.e. la puissance délivrée) et les débits d'airs primaires et secondaires (i.e. la répartition et le facteur d'air).

L'étude expérimentale a été conduite sur une chaudière automatique, alimentée en bois par une vis d'Archimède, dotée d'un foyer à grilles mobiles à co-courant et d'un échangeur à tubes de fumées. Ces solutions technologiques figurent parmi les plus répandues dans la gamme de puissance étudiée (environ 80% du marché). Seuls les dédoublements d'injection d'airs primaires et secondaires distinguent cette chaudière d'étude des autres produites et installées par le fabricant.

L'approche scientifique de ce matériel industriel a nécessité de l'instrumenter par de multiples sondes de température, de capteurs d'impulsions, de mesures de vitesse des gaz et d'analyse de la composition des fumées. Après installation, tous les instruments de mesure ont subi une campagne d'étalonnage stricte qui a permis d'analyser les flux de matière au sein de la chaudière si bien que nous déduisons le débit de bois de ces mesures avec une précision supérieure à toute autre technique. De surcroît, la maîtrise de la logique informatique nous a permis d'enchaîner l'étude de nombreux cas de combustion (variations des débits d'air à débit de bois constant) avec une haute fréquence d'acquisition des mesures (trois acquisitions par minute) sans aucune intervention humaine, laquelle aurait perturbé les conditions d'exploitation.

Ce sont près de 1000 heures de fonctionnement de la chaudière qui ont fait l'objet de mesures de combustion de 7 bois d'humidité et de granulométrie différentes pour des puissances variant entre 60 et 180 kW. Des 23 millions de mesures effectuées, nous obtenons 803 modes de fonctionnement de la chaudière différents, soit en moyenne une quarantaine de débits d'air primaire et secondaire pour chaque type de bois à puissance fixée.

En première approche, nous avons sélectionné 15% des modes étudiés dont les émissions de monoxyde de carbone figurent parmi les plus faibles de chaque expérience de combustion. Cette sélection nous a permis d'analyser les évolutions des émissions de monoxyde de carbone en fonction de la puissance, de l'humidité et de la granulométrie, puis d'en déduire des lois de fonctionnement optimal en fonction des conditions d'entrée.

A partir de ces mesures, il apparaît que la granulométrie n'a pas d'influence visible sur les équilibres de la combustion. Ceci peut s'expliquer par le rapport de dimensions très important existant entre le foyer et les particules brûlées. Que les particules aient 1 ou 10 mm de taille caractéristique, elles restent toujours petites par rapport au foyer de 60 cm de large et de 200 cm de long et demeurent ainsi toujours nombreuses.

Le second résultat concerne la répartition de l'air injecté dans le foyer : sans distinction manifeste en fonction de la puissance ou de l'humidité, les cas sélectionnés affichent entre 15% et 35% de l'air total injecté comme air secondaire. On peut donc affirmer qu'une bonne combustion du bois requiert une répartition de l'air total selon 75% en air primaire et 25% en air secondaire.

Concernant l'humidité du bois, comme la littérature le supposait, elle intervient directement sur les émissions de monoxyde de carbone. Ainsi, la combustion d'un bois à 15% d'humidité sur brut, jugé ultérieurement comme trop sec, produit davantage de monoxyde de carbone qu'un bois à environ 30%, celui-ci formant un minimum d'émissions. A l'inverse, un bois à 50% produit deux à trois fois plus de monoxyde de carbone qu'un bois à 15%. Le premier résultat s'explique par la chimie : la combustion d'un bois trop sec ne produit pas suffisamment de radicaux hydroxyles pour que l'oxydation du monoxyde de carbone soit complète. Le second résultat s'explique par la cinétique : la combustion d'un bois trop humide engendre des températures de foyer trop basses qui limitent les vitesses d'oxydation du monoxyde de carbone. Le bois doit donc avoir une humidité suffisante afin de minimiser les émissions de monoxyde de carbone.

Pour des humidités moyennes du bois, l'équilibre entre combustible et comburant est peu modifié. Ainsi, le facteur d'air optimal en fonction de la charge de la chaudière devient exempt de ce paramètre supplémentaire. Ce résultat nous a permis d'envisager une méthode de régulation du fonctionnement des chaudières telle qu'une simple mise à jour de la logique de régulation permette d'obtenir d'importantes économies de monoxyde de carbone produit.

Grâce à une représentation mathématique de l'évolution du monoxyde de carbone en fonction de la charge, du facteur d'air et de l'humidité nous avons pu simuler la production de ce gaz dans différentes conditions. Il apparaît alors clairement une stratification de ces émissions en fonction de la puissance et de l'humidité, ainsi que l'existence d'un facteur d'air pour lequel les émissions sont minimales.

L'exploitation de cette représentation mathématique a permis de simuler les émissions de monoxyde de carbone attendues en fonction des conditions d'exploitation. Elle a ainsi permis d'évaluer les émissions dues à une régulation classique en fonction de la valeur de la consigne d'oxygène donnée à l'automate de régulation : une consigne suffisamment basse (9%) permet de minimiser les émissions à plein régime mais entraîne une très forte augmentation des émissions lorsque la puissance diminue. En revanche, une consigne plus élevée (12%) permet de maintenir des valeurs d'émissions correctes bien que la puissance baisse jusqu'à 50% de la puissance nominale.

Selon la même démarche, une consigne d'oxygène optimale a été calculée en fonction de la puissance et de l'humidité. Il est alors apparu une telle proximité entre les consignes du bois humide et du bois sec que nous pouvions envisager de calculer une consigne optimale moyenne.

Afin de chiffrer l'impact de ces résultats, nous avons utilisé des données acquises pendant trois saisons sur une chaufferie bois existante pour modéliser une journée de chauffe type. En simulant la quantité de monoxyde de carbone émise pendant cette journée type en fonction des conditions d'exploitation, nous avons pu comparer entre elles les solutions techniques. La principale économie de monoxyde de carbone passe par l'utilisation d'un bois d'humidité convenable (environ 30% d'humidité sur brut). A défaut du choix de l'humidité, l'utilisation d'une régulation optimisée indépendante de l'humidité permet de réaliser sur du bois plutôt humide (50% d'humidité sur brut) un minimum de 15% d'économies de monoxyde de carbone émis, et jusqu'à 40% sur l'utilisation d'un bois plutôt sec (30% d'humidité sur brut), ces chiffres étant calculés sur la base d'une régulation classique dont la consigne est parfaitement ajustée aux circonstances de la journée type.

La mise en œuvre de cette optimisation de la combustion ne requiert qu'une intervention sur le logiciel employé par l'automate de régulation et ne nécessite aucune modification physique de la chaudière. Cependant, ces lois d'évolution de la consigne d'oxygène et de répartition de l'air comburant ont été définies spécifiquement sur la chaudière d'étude. Il reste donc à les valider sur d'autres chaudières afin de les rendre applicables industriellement.

Les résultats issus de ce travail ouvrent également plusieurs perspectives de recherche à venir. Ainsi, si les résultats d'émissions de monoxyde de carbone sont très faibles pour un bois ayant une humidité inférieure à 40% sur brut, il semble que des améliorations puissent être obtenues pour des bois plus humides. Ainsi, d'autres techniques de réduction des émissions polluantes pourraient également être étudiées comme l'étagement de l'injection d'air ou la recirculation des fumées.

De même, la très grande quantité de mesures effectuées ne nous a pas permis d'utiliser toutes les données et nous avons dû restreindre l'étude aux émissions polluantes. Aussi, les très nombreuses mesures de températures peuvent être mises à profit afin de modéliser la combustion dans la chaudière étudiée.

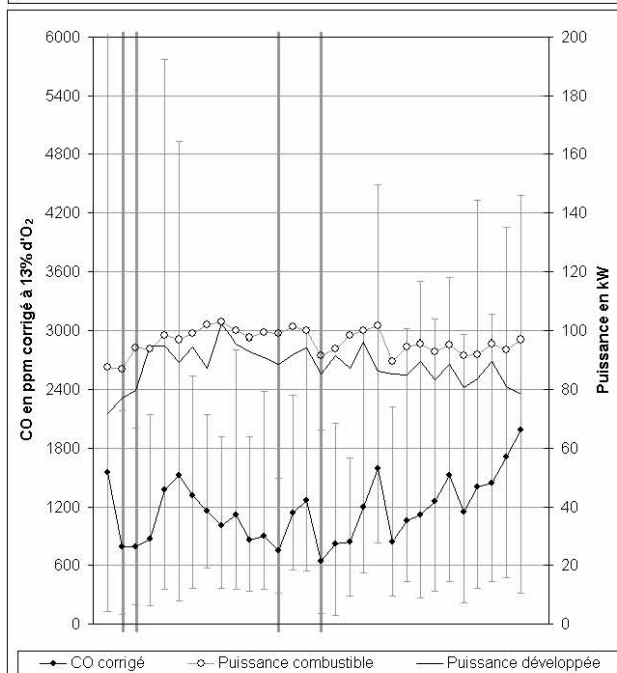
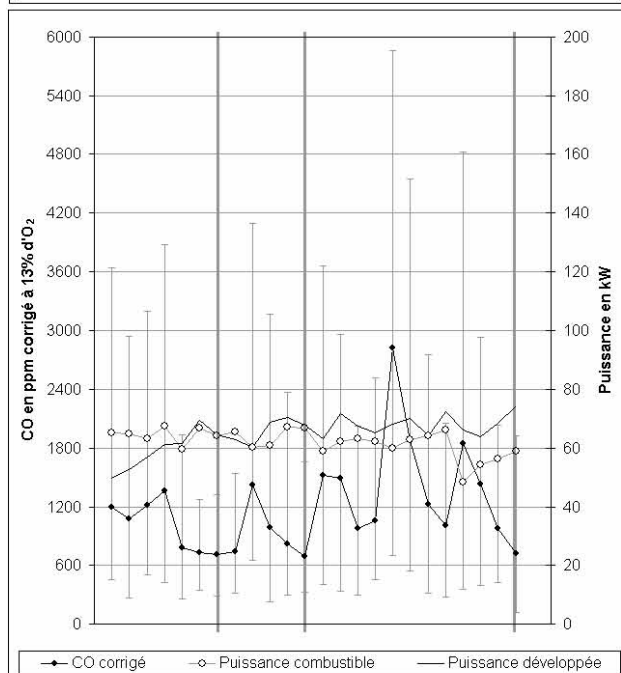
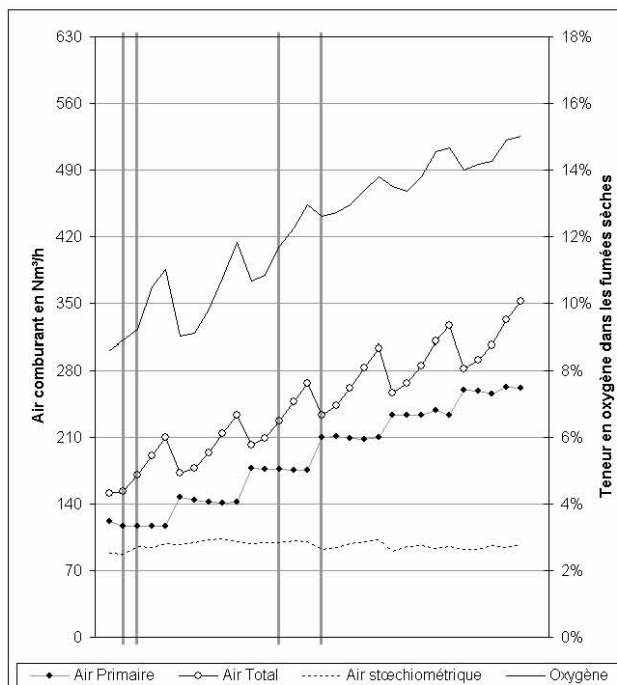
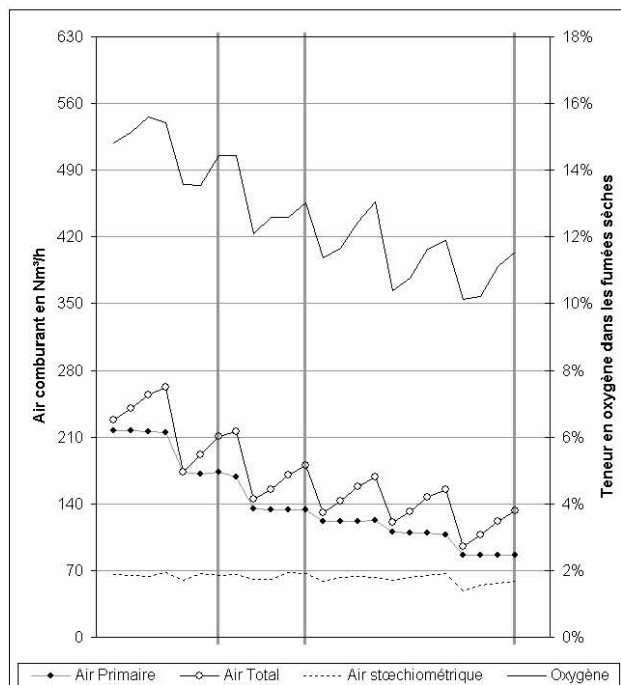
Enfin, la corrélation établie empiriquement à partir des mesures expérimentales devrait pouvoir être justifiée par une modélisation complète. Un premier développement devra porter sur le thermohydraulique de la chaudière à partir de l'ensemble des mesures de températures effectuées. Dans une deuxième étape, l'intégration des paramètres cinétiques de combustion au modèle thermohydraulique devrait permettre d'évaluer les émissions résiduelles de monoxyde de carbone et d'imbrûlés à condition que les modèles cinétiques intègrent à la fois la production des gaz et des particules solides.

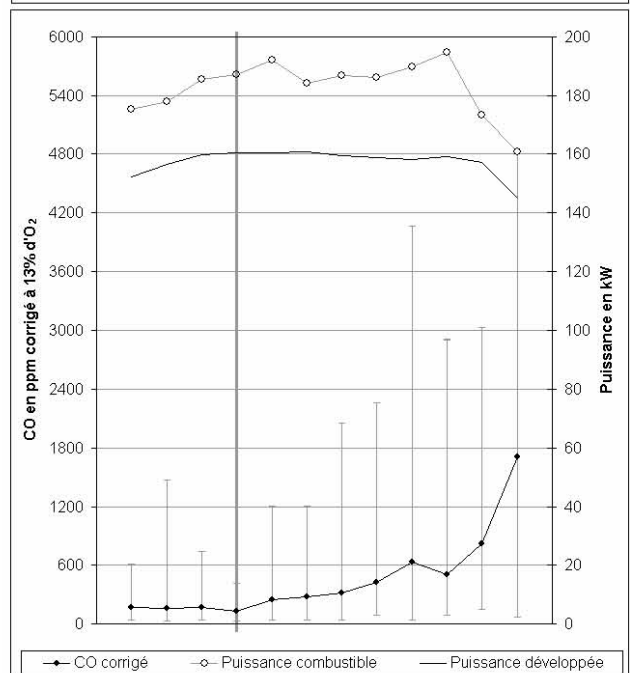
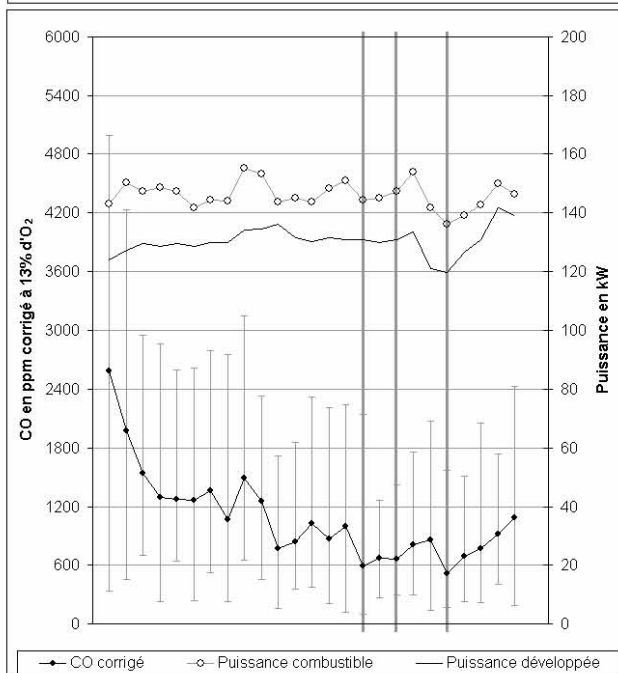
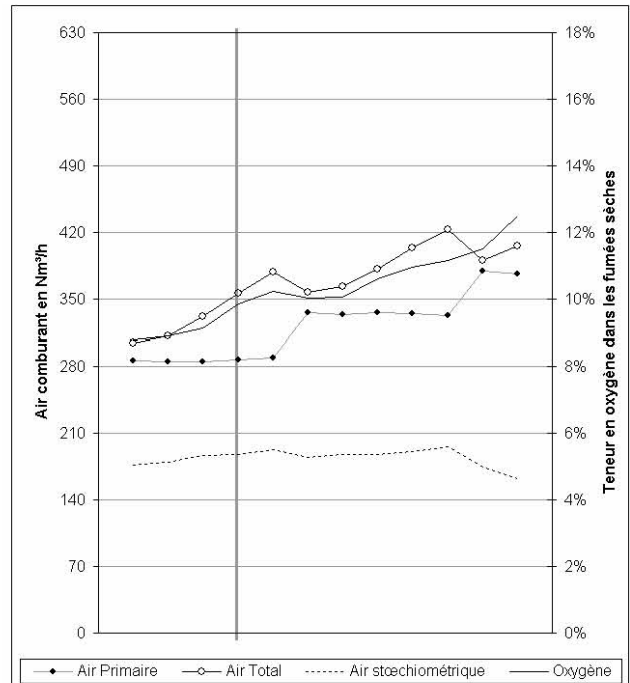
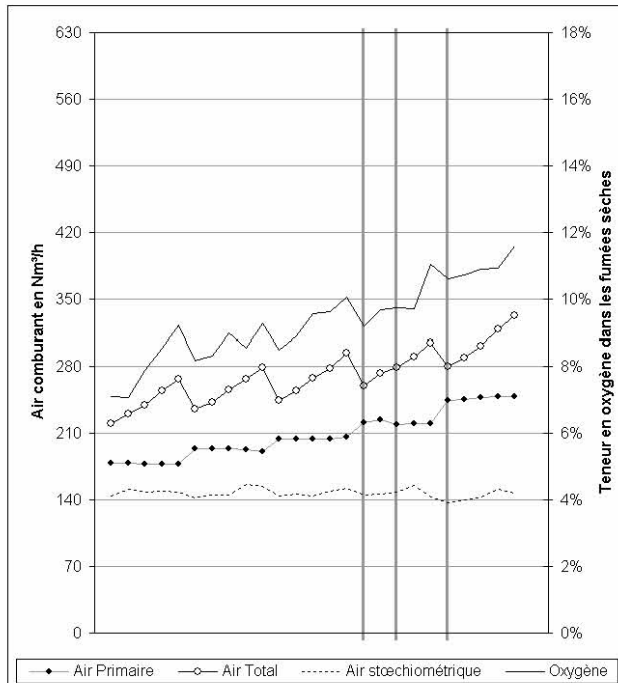
7. Annexes

7.1. Résultats d'expériences

7.1.1. Coproduits de première transformation

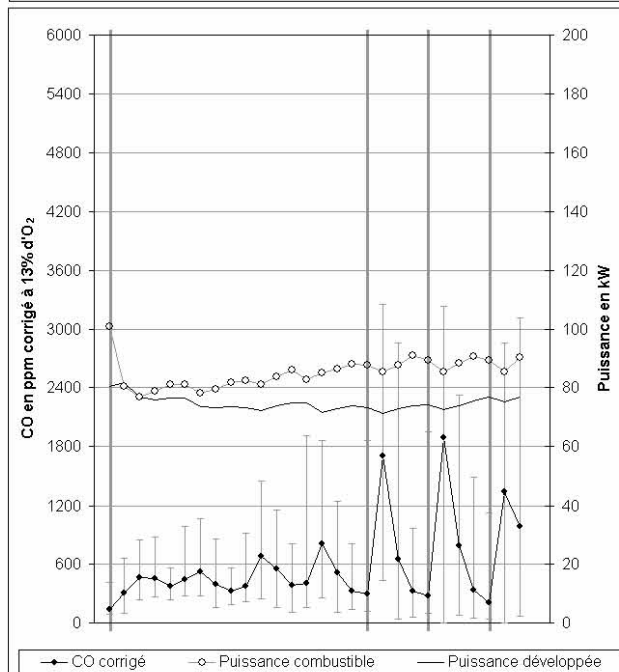
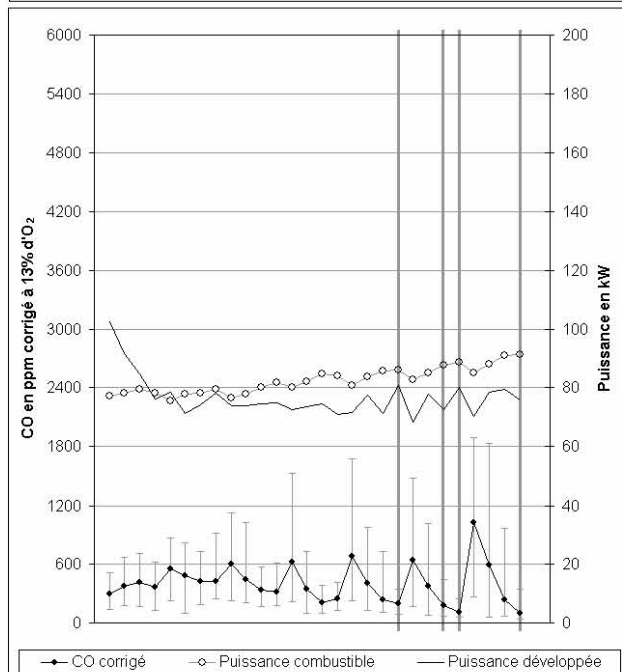
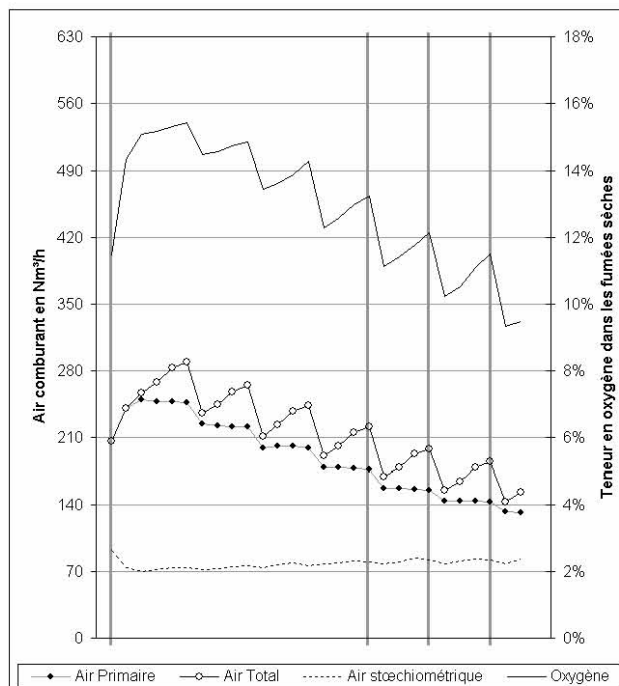
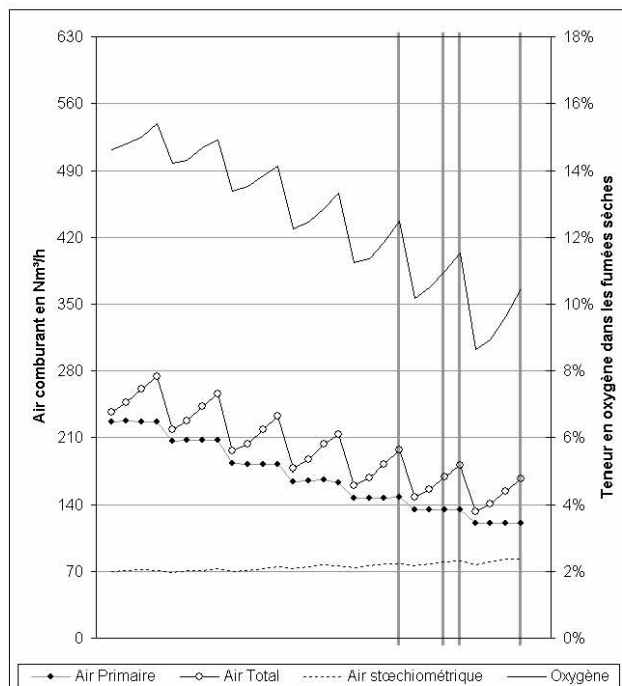
7.1.1.1. Plaquette de scierie à 51%

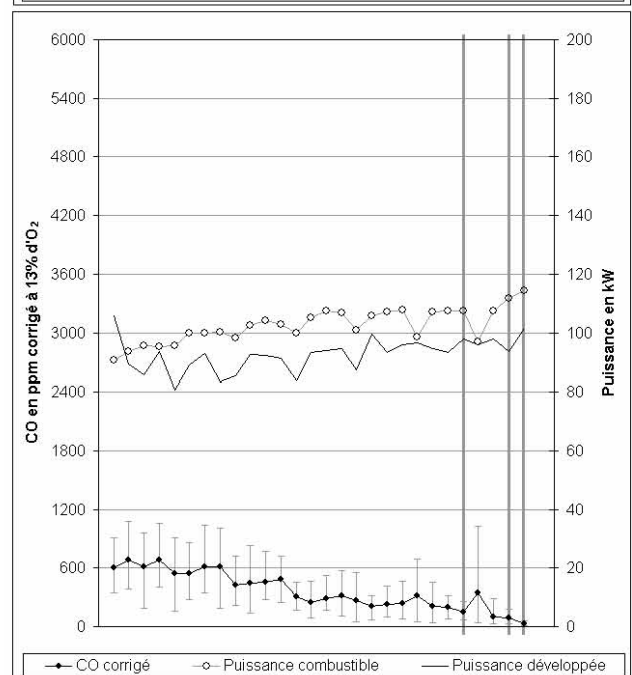
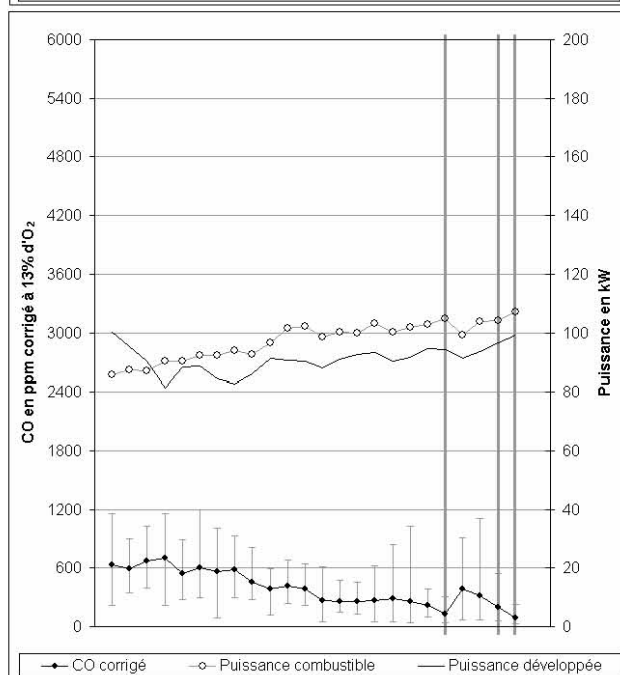
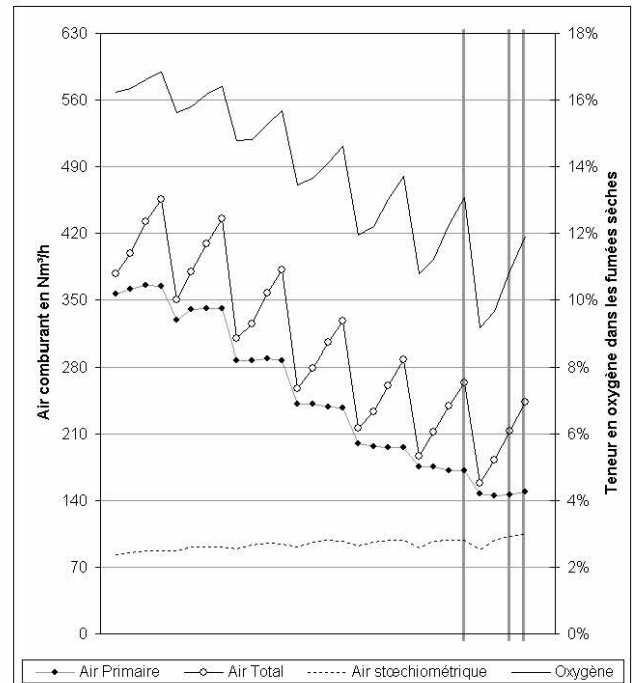
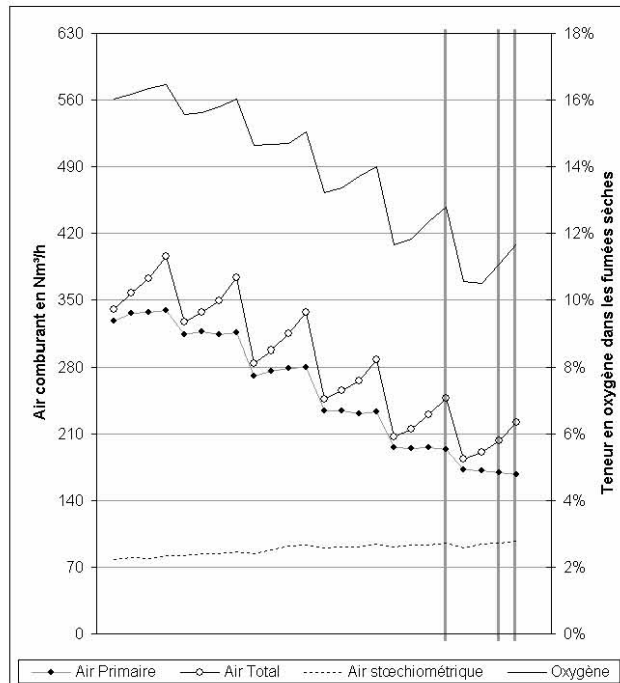


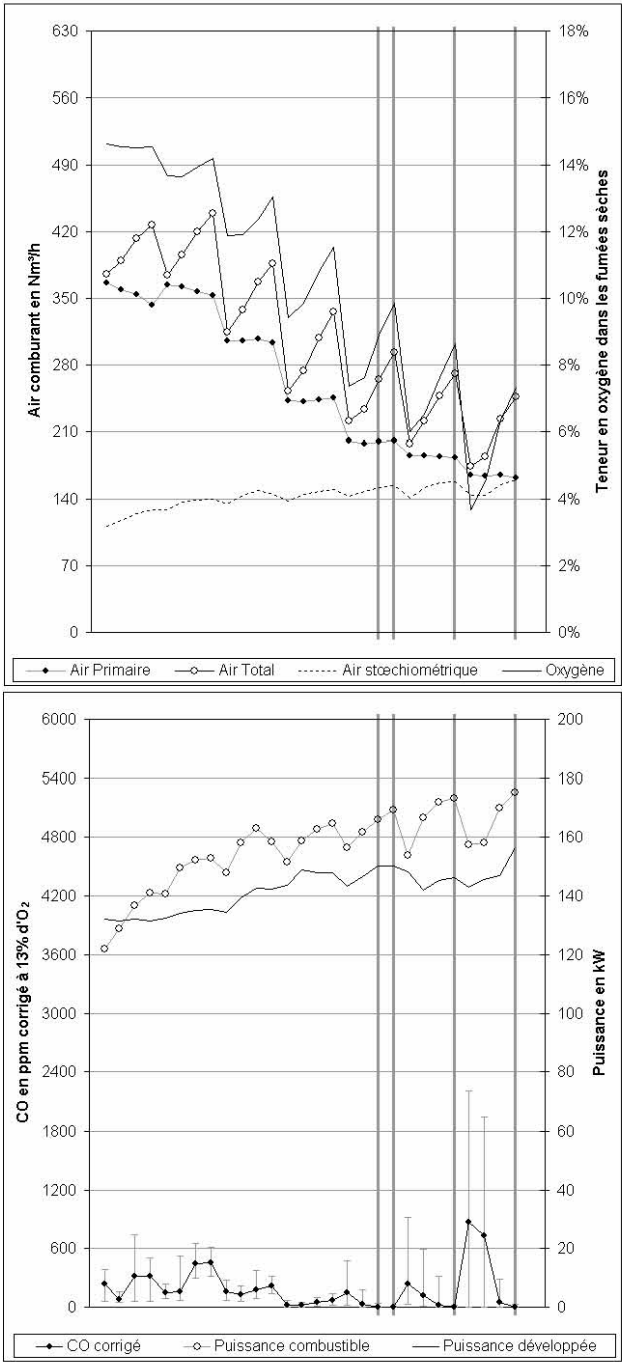


7.1.2. Coproduits d'exploitation forestière

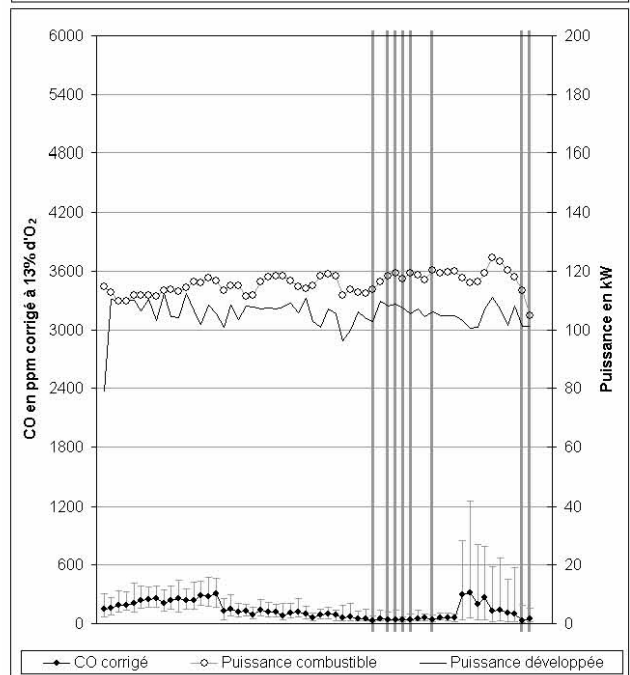
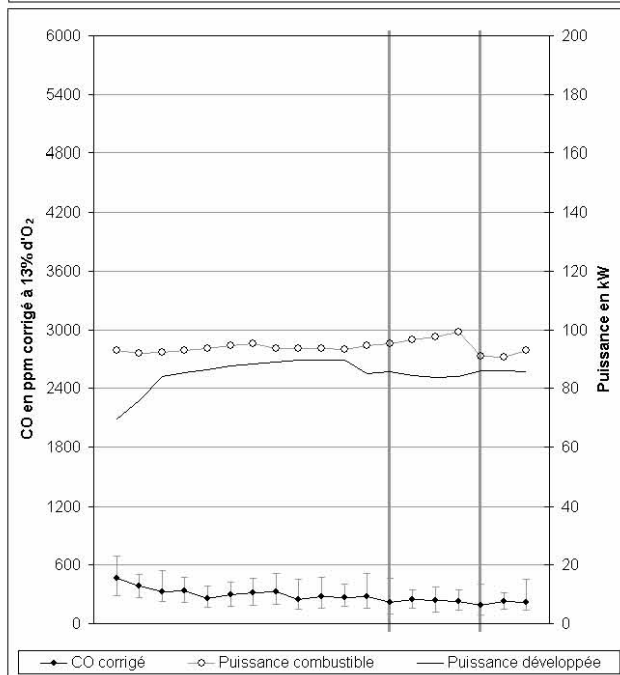
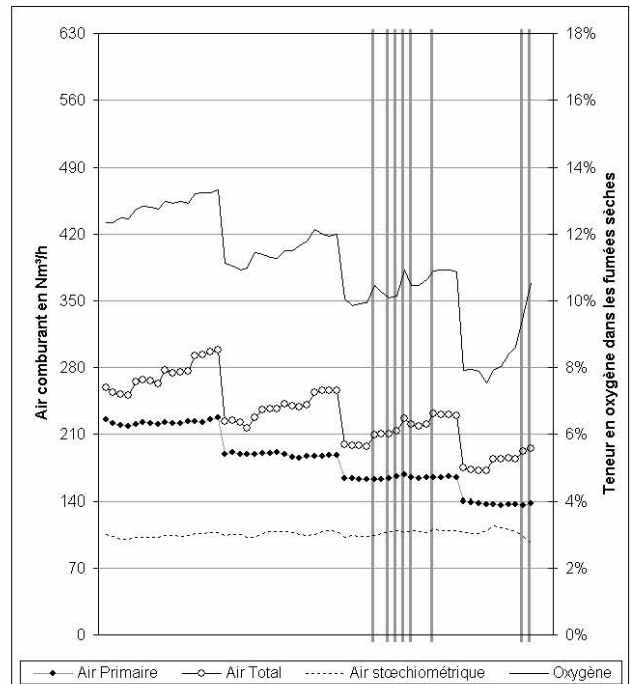
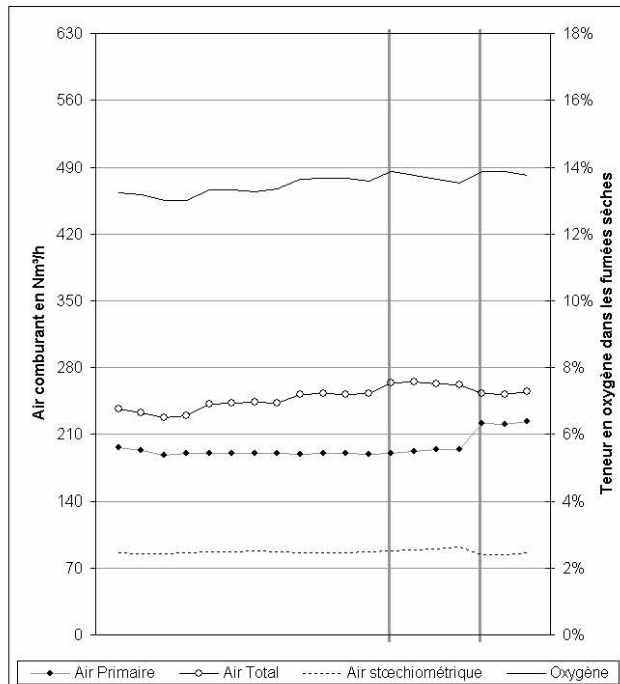
7.1.2.1. Plaquette à 28%

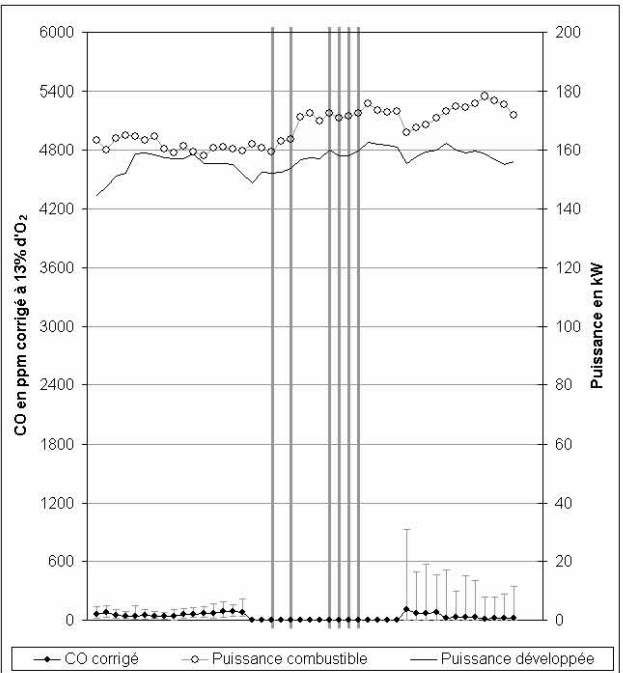
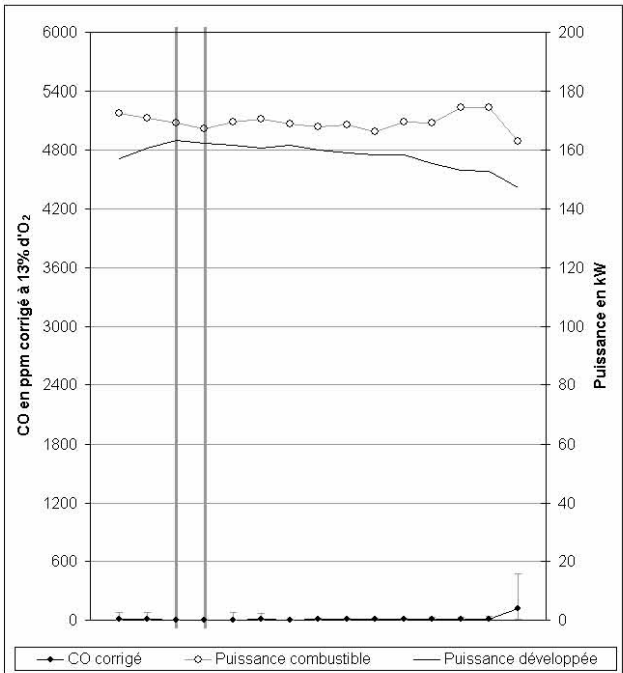
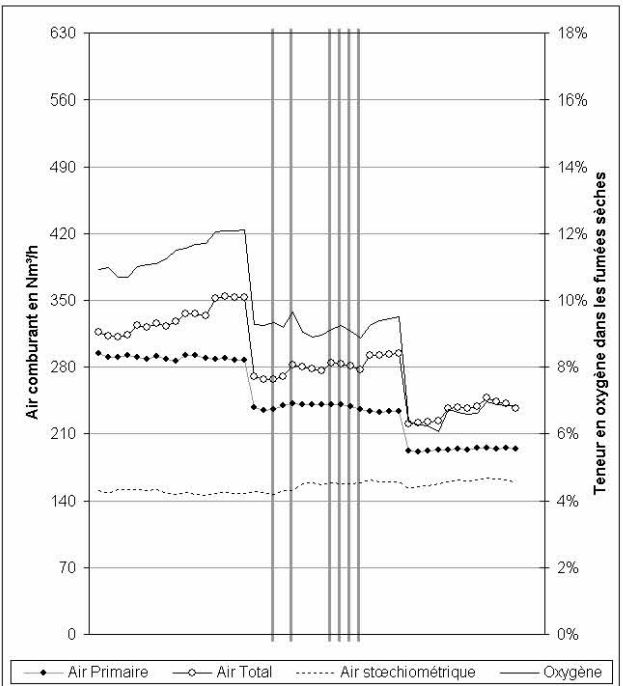
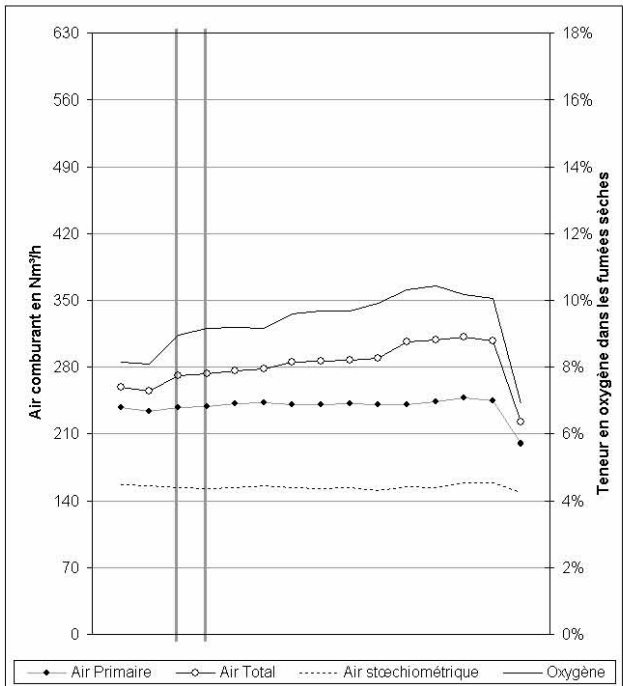




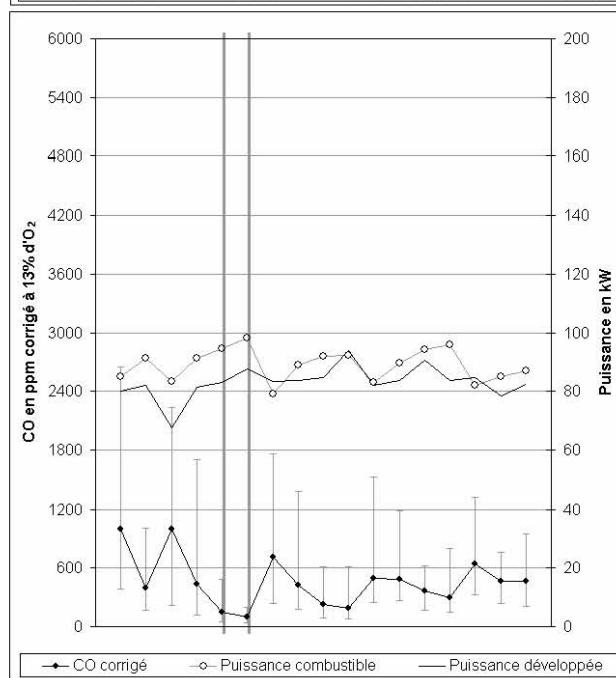
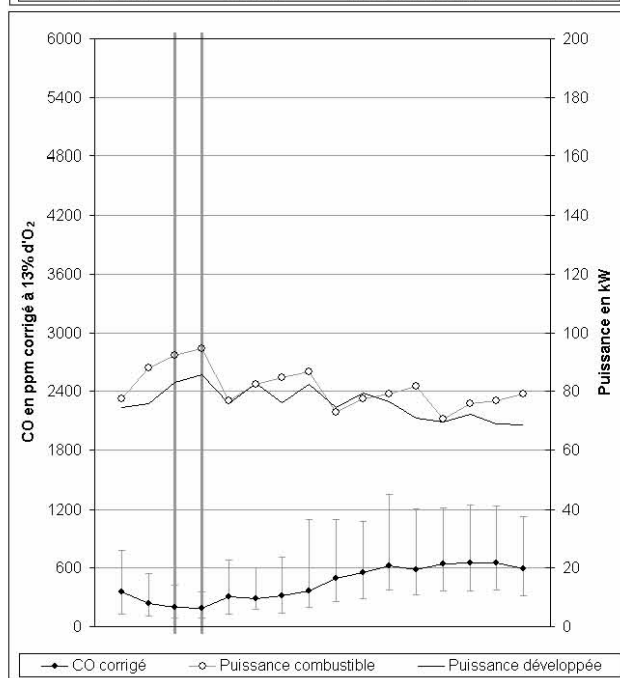
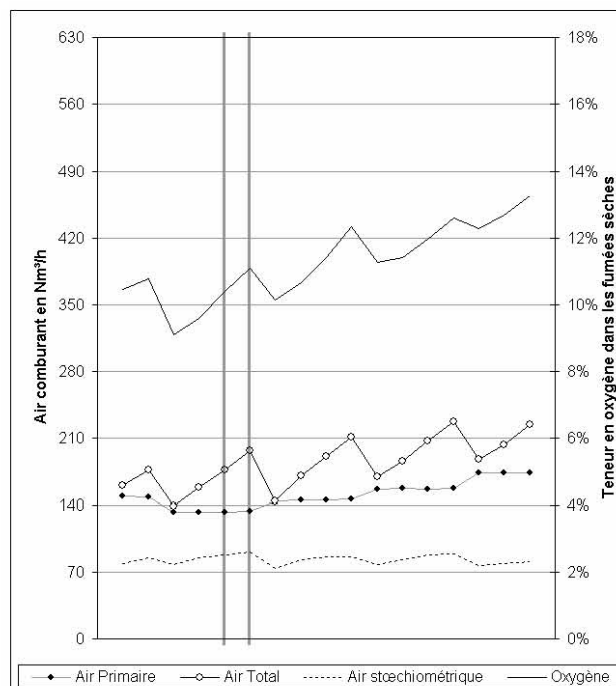
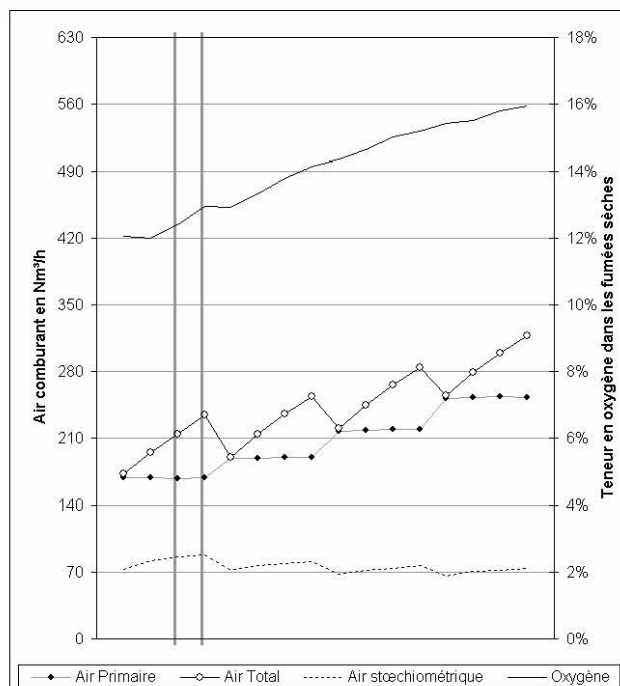


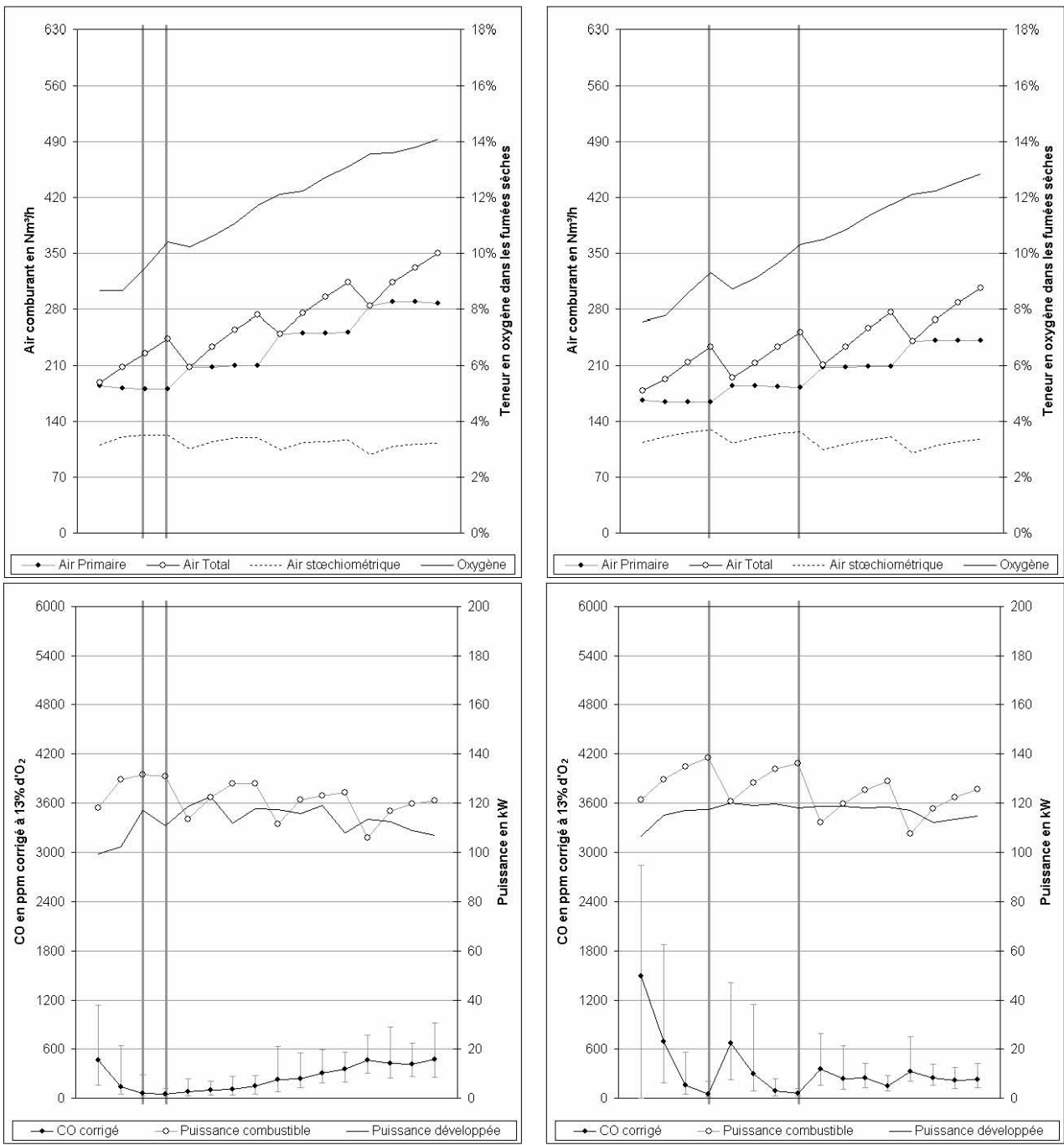
7.1.2.2. Plaquettes à 30%

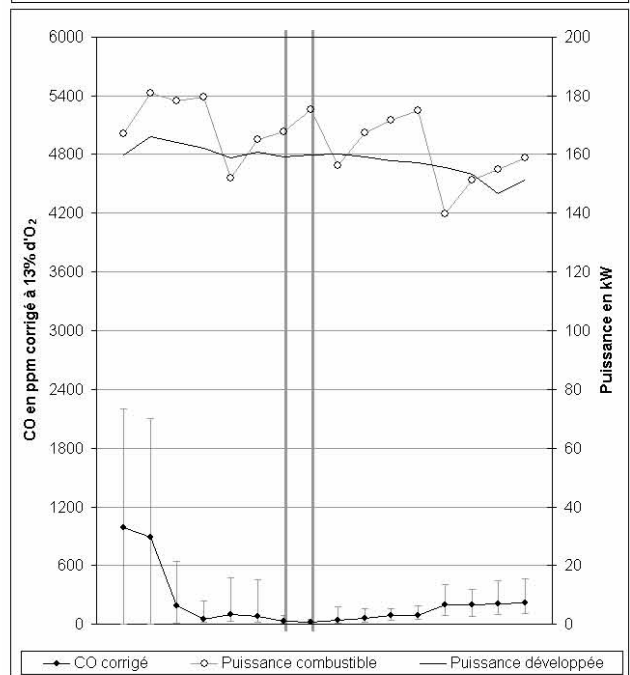
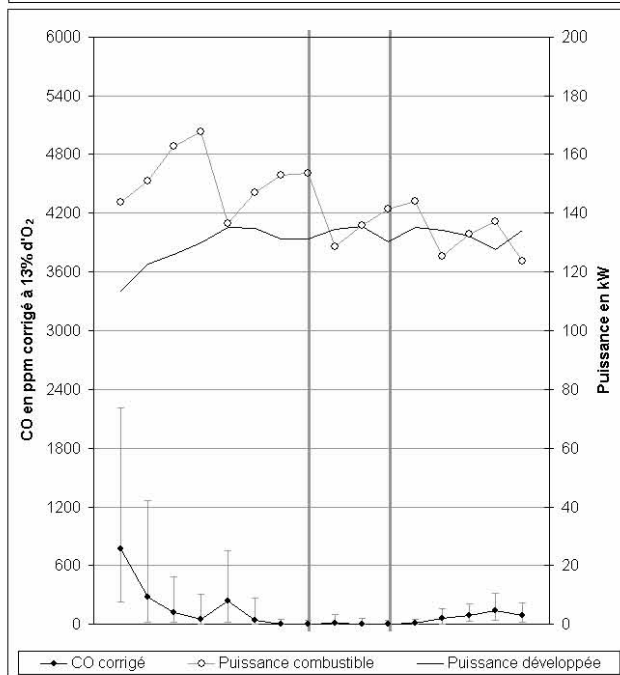
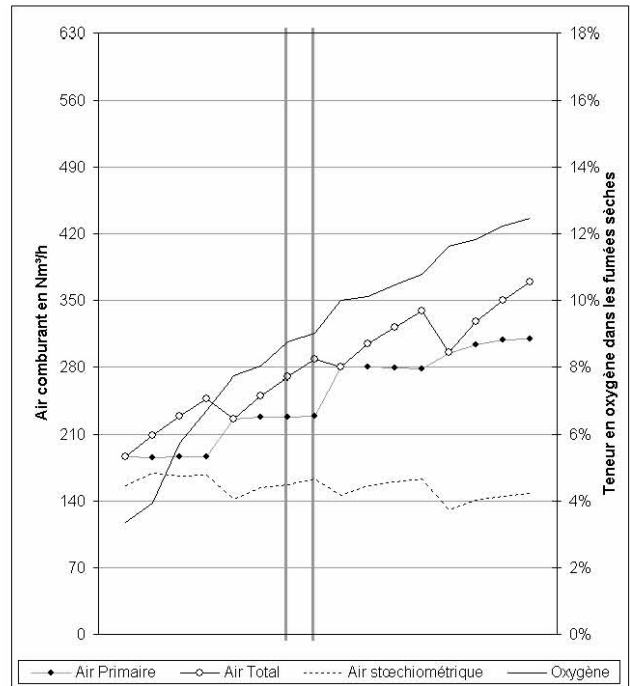
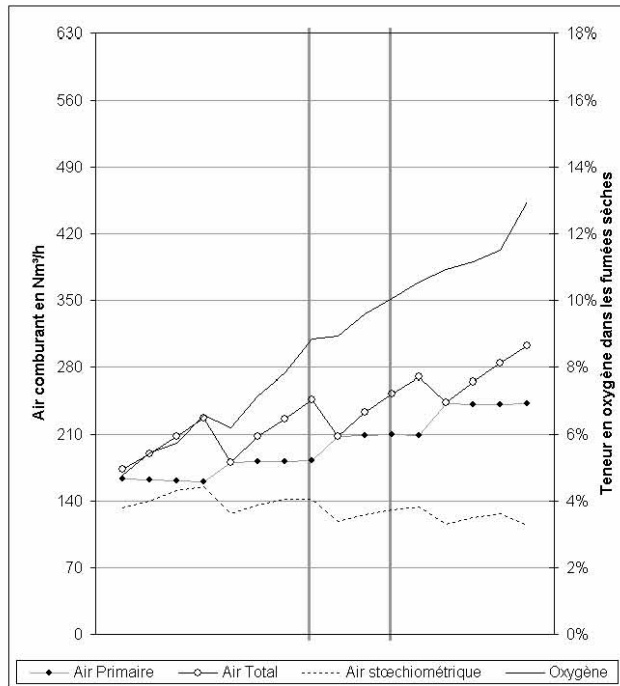


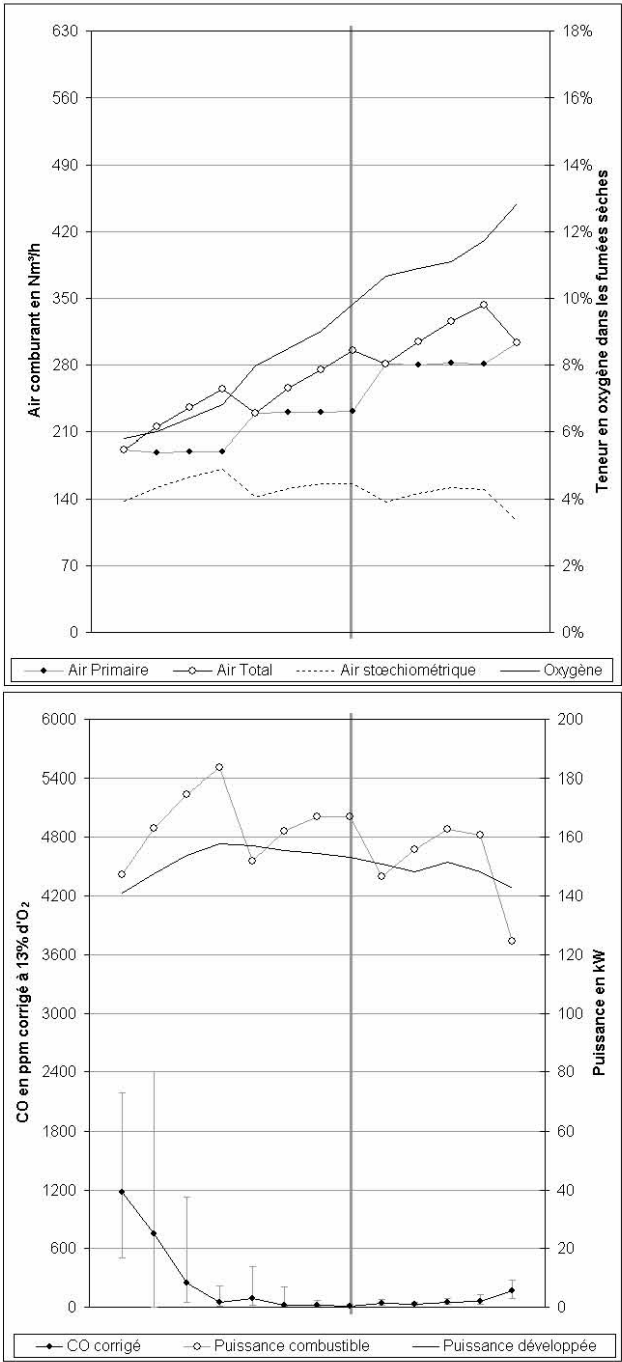


7.1.2.3. Plaquette à 36%

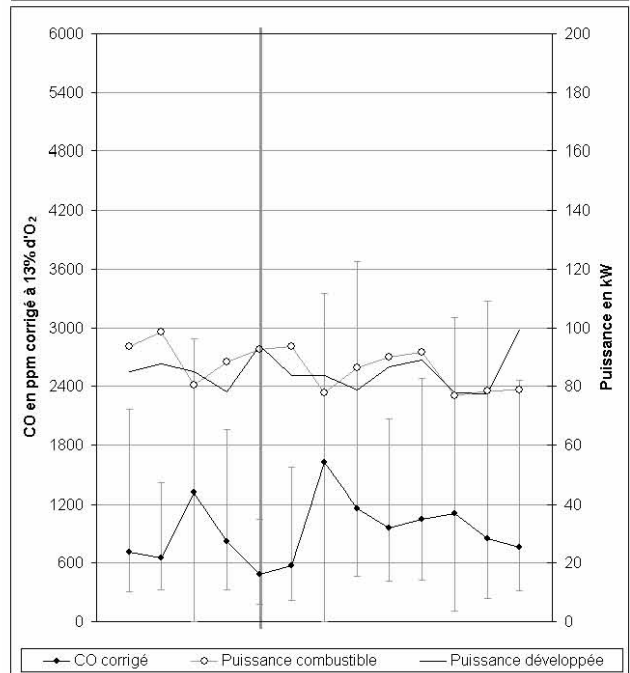
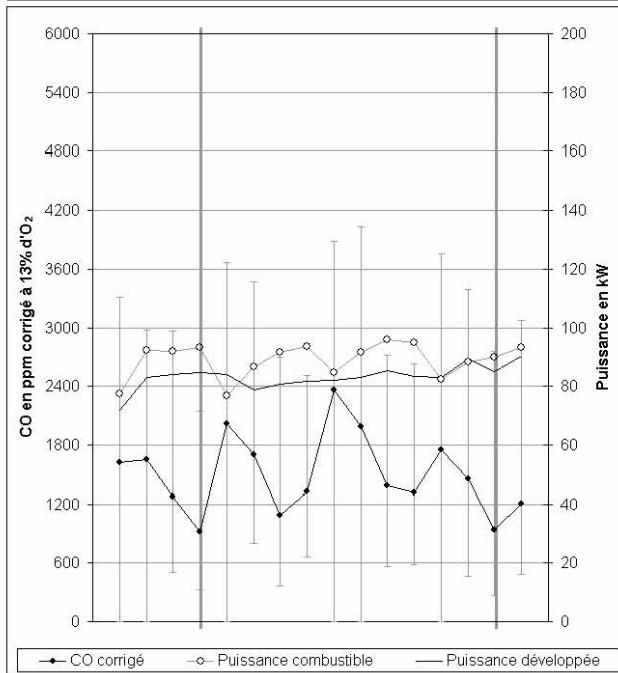
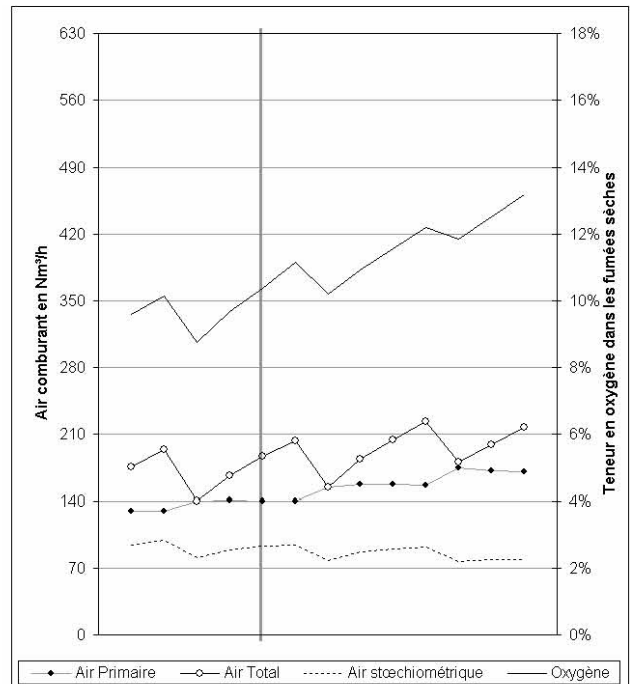
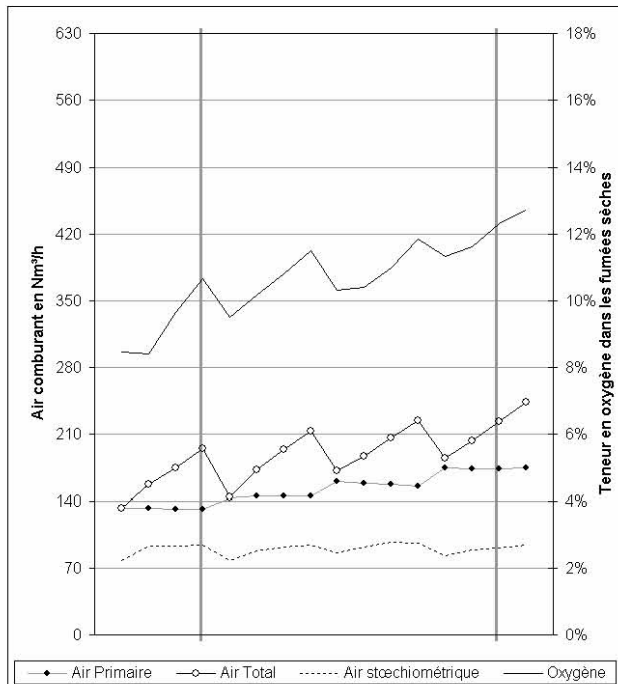


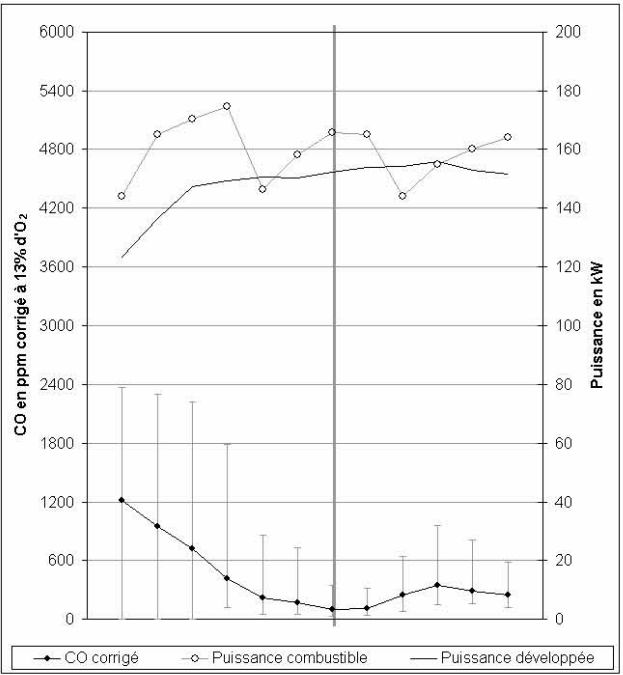
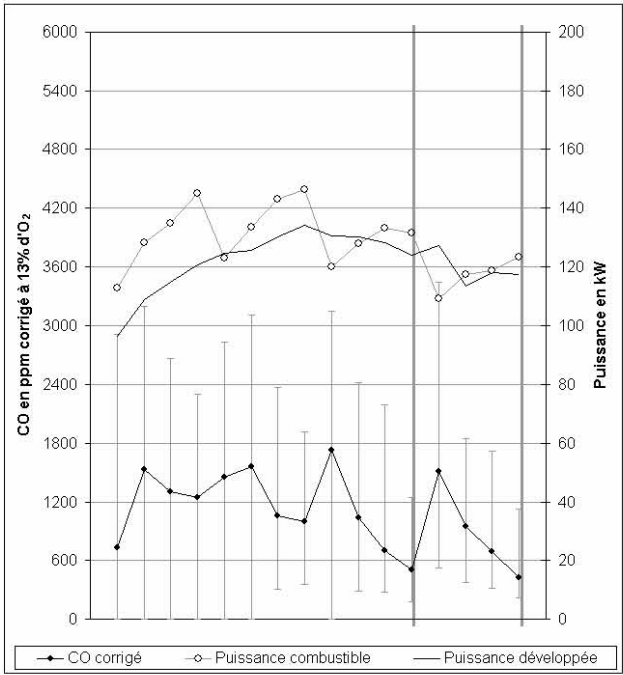
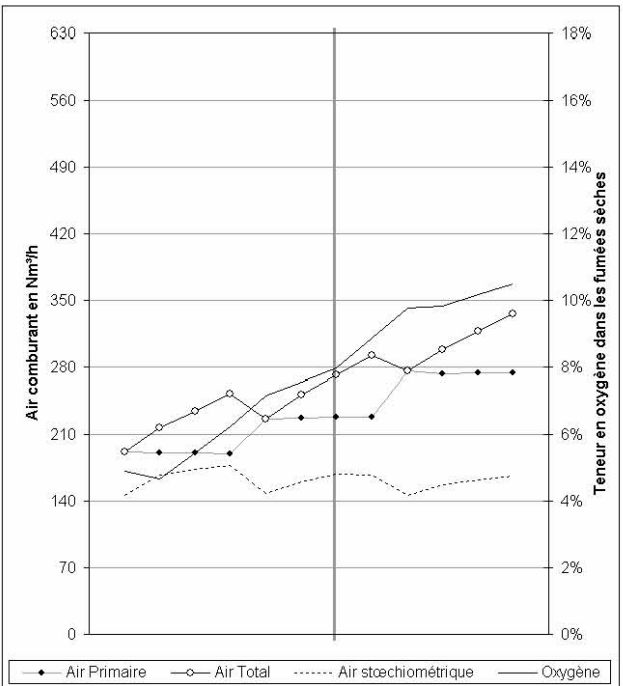
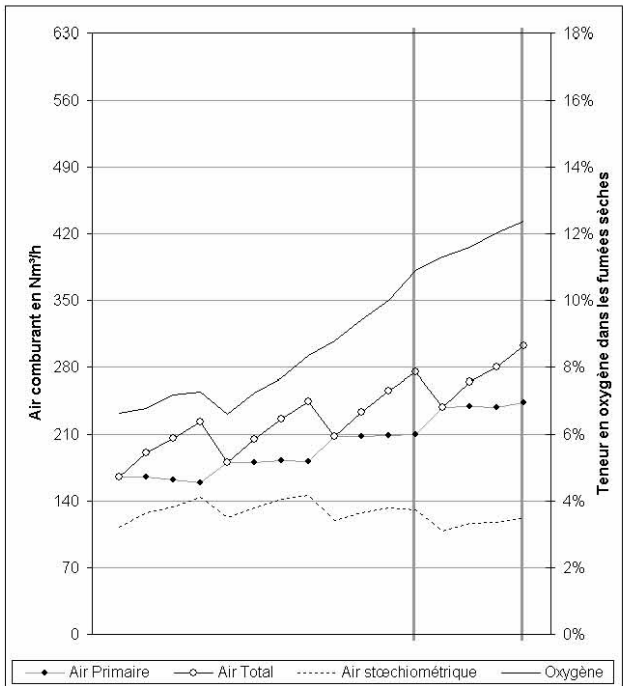






7.1.2.4. Plaquette à 51%





7.2. Références bibliographiques

- Amy.P [1]
- Aoyagi.M et al. [2]
- Beall.F.C et Eickner.H.W [3]
- Bendtsen.A.B et al. [4]
- Bernard.C et al. [5]
- Biocchi.S et Antonini.G [6]
- Bradbury.A.G.W et Shafizadeh.F [7,8]
- Browne.F.L [9]
- Cooper.J et Hallett.W.L.H [10]
- Dadkhah-Nikoo.A et Bushnell.D.J [11]
- Deglise.X et al. [12,13]
- Dryer.F.L et Glassman.I [14]
- Géromini.J.L [15]
- Haluk.J.P [16]
- Johansson.L.S et al. [17]
- Kanury.A.M [18]
- Keller.R [19]
- Kudla.K et al. [20]
- LeVan.S.L [21]
- Lundgren et al. [22,23]
- Mulcahy.M.F.R et Young.C.C [24]
- Miessen.G et al. [25]
- Milligan.D.F et al. [26]
- Miyoshi.A et al. [27]
- Montoya.A et al. [28]
- Morf.Ph et al. [29]
- Normes [30,31,32,33,34,35]
- Ohman.M et al. [36,37]
- Oman.J et al. [38]
- Orfao.J.J.M et al. [39]
- Perre.P [40]
- Petry.J.T. et al. [41]
- Popovici.E et al. [42]
- Robert.P [43]
- Rogaume.Th [44]
- Rogaume.Y [45]
- Rossi.A [46]
- Saastamoinen.J.J [47]
- Schatz.G.C et al. [48]
- Sengupta.D et al. [49]
- Skreiberg.O et al. [50]
- Staiger.B et al. [51]
- Steinhagen.H.P [52]
- Strehler.A [53]
- Sumathi.R et al. [54]
- Thunman.H et Leckner.B [55]
- Tillman.A.D [56]
- Troe.J [57]
- USDA [58]
- Van Loo.S et Koppejan.J [59]
- Walker.P.L [60]
- Wenzl.H [61]

- ¹ Amy.P ; Document de vulgarisation ; 1961
- ² Aoyagi.M, Kato.S ; « A theoretical study of the potential energy surface for the reaction $\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ » ; Journal of Chemical Physics ; 88:6409-6418 ; 1988
- ³ Beall.F.C, Eickner.H.W ; « Thermal degradation of wood : a review of the literature » ; Forest Products Laboratory ; 1970
- ⁴ Bendtsen.A.B, Glarborg.P, Dam-Johansen.K ; « Chemometric analysis of detailed chemical reaction mechanism for methane oxidation » ; Chemometrics and intelligent laboratory systems ; 44:353-361 ; 1998
- ⁵ Bernard.C, Huon.C, Mougel.E, Zoulalian.A, Rogaume.Y ; « Essais de combustion de bois en foyers fermés » ; Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie ; In press ; 2002
- ⁶ Biocchi.S, Antonini.G ; « Les polluants et les techniques d'épuration des fumées » ; ISBN 2-7430-0268 ; 1998
- ⁷ Bradbury.A.G.W, Shafizadeh.F ; « Chemisorption of oxygen on cellulose char » ; Carbon ; 18:109-116 ; 1980
- ⁸ Bradbury.A.G.W, Shafizadeh.F ; « Role of oxygen chemisorption in low-temperature ignition of cellulose » ; Combustion and Flame ; 37:85-89 ; 1980
- ⁹ Browne.F.L ; « Theories of the combustion of wood and its control : a survey of the literature » ; Forest Products Laboratory ; 1956
- ¹⁰ Cooper.J, Hallett.W.L.H ; « A numerical model for packed-bed combustion of char particles » ; Chemical Engineering Science ; 55:4451-4460 ; 2000
- ¹¹ Dadkhah-Nikoo.A, Bushnell.D.J ; « An experimental investigation of wood combustion » ; Journal of Energy Resources Technology ; 116:186-193 ; 1994
- ¹² Deglise.X ; « Les conversions thermochimiques du bois » ; Revue Forestière Française ; n°34 ; 1982
- ¹³ Deglise.X, Doat.J ; « Gazéification par pyrolyse éclair de quelques bois tropicaux : comparaison entre pyrolyse rapide et pyrolyse lente classique » ; Revue bois et forêt des tropiques ; 198:59-74 ; 1982
- ¹⁴ Dryer.F.L, Glassman.I ; « High-temperature oxidation of CO and CH₄ » ; 14th Symposium on Combustion ; 987-1003 ; 1972
- ¹⁵ Géromini.J.L ; « Le monoxyde de carbone » ; ISBN 2-7430-0377-4 ; 2000
- ¹⁶ Haluk.J.P ; « Composition chimique du bois » ; Le bois : matériau d'ingénierie ; ISBN 2-907086-07-3 ; §2:53-90 ; 1994
- ¹⁷ Johansson.L.S, Leckner.B, Gustavsson.L, Cooper.D, Tullin.C, Potter.A ; « Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets » ; Atmospheric environment ; 38:4183-4195 ; 2004
- ¹⁸ Kanury.A.M ; « Combustion characteristics of biomass fuels » ; Combustion Science and Technology ; 97:469-491 ; 1994
- ¹⁹ Keller.R ; « La constitution du bois » ; Le bois : matériau d'ingénierie ; ISBN 2-907086-07-3 ; §1:13-52 ; 1994
- ²⁰ Kudla.K, Koures.A.G, Harding.L.B, Shatz.G.C ; « A quasiclassical trajectory study of OH rotational excitation in OH + CO collisions using ab initio potential surfaces » ; Journal of Chemical Physics ; 96:7465-7473 ; 1992
- ²¹ LeVan.S.L ; « Thermal degradation » ; Concise encyclopaedia of wood & wood based materials ; 271-273 ; 1989

-
- 22 Lundgren J, Hermansson R, Dahl J. ; « Experimental studies during heat load fluctuations in a 500kW wood-chips fired boiler » ; Biomass & Bioenergy ; 26:255-267 ; 2004
- 23 Lundgren J, Hermansson R, Dahl J. ; « Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems » ; Biomass & Bioenergy ; 26:443-453 ; 2004
- 24 Mulcahy.M.F.R, Young.C.C ; « The reaction of hydroxyl radicals with carbon at 298K » ; Carbon ; 13:115-124 ; 1975
- 25 Miessen.G, Behrendt.F, Deutschmann.O, Warnatz.J ; « Numerical studies of the heterogeneous combustion of char using detailed chemistry » ; Chemosphere ; 42:609-613 ; 2001
- 26 Milligan.D.F, Jacox.M.E ; « Infrared Spectrum and Structure of Intermediates in the Reaction of OH with CO » ; Journal of Chemical Physics ; 54:927-942 ; 1971
- 27 Miyoshi.A, Matsui.H, Washida.N ; « Detection and reactions of the HOCO radical in gas phase » ; Journal of Chemical Physics ; 100:3532-3539 ; 1994
- 28 Montoya.A, Mondragon.F, Truong.T.N ; « Formation of CO precursors during char gasification with O₂, CO₂ and H₂O » ; Fuel Processing Technology ; 77:125-130 ; 2002
- 29 Morf.P, Hasler.Ph, Nussbaumer.Th ; « Mechanisms and kinetics of homogeneous secondary reactions of tar from continuous pyrolysis of wood chips » ; Fuel ; 81:843-853 ; 2002
- 30 NF B 51-004 ; Bois - Détermination de l'humidité ; Septembre 1985
- 31 NF B 51-005 ; Bois - Détermination de la masse volumique ; Septembre 1985
- 32 NF EN 303-5 ; Chaudières de chauffage – Partie 5 : Chaudières spéciales pour combustibles solides, à chargement manuel ou automatique, puissance utile inférieure ou égale à 300 kW – Définitions, exigences, essais et marquage ; Août 1999
- 33 NF M 03-003 ; Combustibles minéraux solides - Détermination du taux de cendre ; Octobre 1994
- 34 NF M 03-005 ; Détermination du pouvoir calorifique supérieur et calcul du pouvoir calorifique inférieur ; Décembre 1990 (en concordance technique avec la norme ISO 1928)
- 35 ÖNORM M 7133 : 1998 02 01 Holzhackgut für energetische Zwecke - Anforderungen und Prüfbestimmungen
- 36 Ohman.M, Boman.C, Hedman.H, Nordin.A, Boström.D ; « Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners » ; Biomass and bioenergy ; 27:585-596 ; 2004
- 37 Ohman.M, Nordin.A, Hedman.H, Jirjis.R ; « Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention ; Biomass and bioenergy » ; 27:597-605 ; 2004
- 38 Oman.J, Tacer.M, Tuma.M ; « Overfeed fixed-bed combustion of wood » ; Bioresource Technology ; 67:139-147 ; 1999
- 39 Orfao.J.J.M, Antunes.F.J.A, Figueiredo.J.L ; « Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model » ; Fuel ; n°78 pp 349-358 ; 1999
- 40 Perre.P ; « Le séchage du bois » ; Le bois : matériau d'ingénierie ; ISBN 2-907086-07-3 ; §6:201-288 ; 1994
- 41 Petry.J.T, Harrison.J.A, Moore.C.B ; « Reactions of trans-hydroxycarbonyl radical studied by infrared spectroscopy » ; Journal of Physical Chemistry ; 97:11194-11198 ; 1993
- 42 Popovici.E, Benetto.E, Rousseaux.P ; « Le recyclage de cendres de bois en forêt » ; Bois énergie ; 6 :46-47 ; 2002
- 43 Robert.P ; « Production de chaleur à partir du bois » ; Techniques de l'ingénieur : Génie énergétique BE3:2135 ; 1987
-

- 44 Rogaume.Th ; « Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission des polluants lors de l'incinération des déchets ménagers » ; Thèse de doctorat ; Université de Poitiers ; 2001
- 45 Rogaume.Y ; Cours ENSTIB
- 46 Rossi.A ; « Fuel characteristics of wood and nonwood biomass fuels » ; Progress in Biomass Conversion ; 5:69-99 ; 1984
- 47 Saastamoinen.J.J ; « New simplified rate equation for gas-phase CO oxidation at combustion » ; Energy and Fuels ; 14:1156-1160 ; 2000
- 48 Schatz.G.C, Fitzcharles.M.S, Harding.L.B ; « State-to-state chemistry with fast hydrogen atoms. Reaction and collisional excitation in $H + CO_2$ » ; Faraday Discussions of the Chemical Society ; 84:359-369 ; 1987
- 49 Sengupta.D, Peeters.J, Nguyen.M.T ; « Theoretical studies on the $C_2H + NO$ reactions : mechanism for $HCN + CO$ and $HCO + CN$ formation » ; Chemical physics letters ; 283:91-96 ; 1998
- 50 Skreiberg.O, Glarborg.P, Jensen.A, Dam-Johansen.K ; « Kinetic NO_x modelling and experimental results from single wood particle combustion » ; Fuel ; 76:671-682 ; 1997
- 51 Staiger.B, Unterberger.S, Berger.R, Hein.K.R.G. ; « Development of an air staging technology to reduce NO_x emissions in grate fired boilers » ; Energy ; Article in press ; 2004
- 52 Steinhagen.H.P ; « Thermal conductive properties of wood green or dry, from -40° to $+100^\circ C$: a literature review » ; Forest Products Laboratory ; 1977
- 53 Strehler.A ; « Technologies of wood combustion » ; Ecological engineering ; 16:25-40 ; 2000
- 54 Sumathi.R, Peeters.J, Nguyen.M.T ; « Theoretical studies on the $C_2H + O_2$ reaction : mechanism for $HCO + CO$, $HCCO + O$ and $CH + CO_2$ formation » ; Chemical physics letters ; 287:109-118 ; 1998
- 55 Thunman.H et Leckner.B ; « Thermal conductivity of wood : models for different stages of combustion » ; Biomass & Bioenergy ; 23:47-54 ; 2002
- 56 Tillman.A.D ; « Biomass combustion » ; Biomass ; 203-219 ; 1987
- 57 Troe.J ; « Modeling the temperature and pressure dependence of the reaction $HO + CO \leftrightarrow HOCO \leftrightarrow H + CO_2$ » ; 27th symposium on combustion ; 167-175 ; 1998
- 58 USDA Forest Service ; « Wood Handbook » ; 463 pages ; 1999
- 59 Van Loo.S, Koppejan.J ; « Handbook of Biomass Combustion and Cofiring » ; ISBN 9036517737 ; 2002
- 60 Walker.P.L ; « Char properties and gasification » ; Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion ; 486-509 ; 1985
- 61 Wenzl.H ; « The chemical technology of wood » ; Academic Press ; 1970

Caractérisation et Optimisation de la Combustion de Bois Fragmentés en Chaufferies Automatiques

Les chaufferies automatiques au bois fragmenté connaissent un fort développement. Ces chaufferies doivent répondre aux besoins en chaleur et sont soumises aux aléas du bois. La chaudière doit adapter sa puissance, et permettre l'utilisation de bois dont la granulométrie et l'humidité peuvent fluctuer.

Notre étude est menée sur une chaudière automatique à grilles mobiles de 200 kW. 1000 heures d'essais de combustion de sciures et de plaquettes, d'humidités variables selon 3 paliers de puissance permettent d'obtenir une représentation du CO émis par la combustion en fonction de l'humidité, de la puissance et du débit d'air. Ce modèle permet d'évaluer l'impact environnemental de différents types de régulations de combustion.

Une nouvelle logique de régulation a alors pu être proposée : elle permet de réduire jusqu'à 40% les émissions de CO par une simple reprogrammation de l'automate et fonctionne quelles que soient les caractéristiques du bois ou la puissance appelée.

Mots clés : Combustion, Bois-énergie, CO, Four à grilles mobiles, Optimisation de régulation

Characterisation and Optimisation of Wood Chips Combustion in Automatic Fed Boilers

The development of automatic fed boilers using broken wood follows an upward trend nowadays. These boilers have to fulfil the heating needs despite the heterogeneity of wood. The boiler has to fit its power and allow the use of wood which size and humidity may fluctuate.

Our study uses an automatic fed boiler with moving grates of 200 kW. 1000 hours of combustion experiments with sawdust and chips, with different moistures varying according to 3 stages of power enable to achieve a representation of CO emitted from combustion depending on the humidity, the power and the air flow. This model allows to assess the environmental impact of different types of combustion regulations.

A new logic of regulation has been then proposed : it enables to reduce up to 40 % of the total CO emissions by a simple re-programming of the automaton and works whatever the wood characteristics or the demanded power.

Key words : Combustion, Wood-fuel, Automatic fed boiler, Optimisation of regulation

Monsieur Claude BERNARD

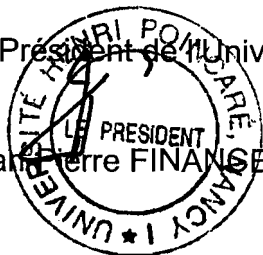
DOCTORAT de l' UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY 1
en SCIENCES DU BOIS

VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER N° 1117

Nancy, le 22 décembre 2005

Le Président de l'Université

Jean-Pierre FINANCE



3C-F9