

ESSAIS DE COMBUSTION DE BOIS EN FOYERS FERMÉS

Claude BERNARD¹, Christophe HUON², Eric MOUGEL¹,
André ZOULALIAN¹, Yann ROGAUME¹

¹LERMA3 ; UMR 1093 – INRA – ENGREF – UIHP ;
ENSTIB ; 27, rue de merle blanc, BP 1041 , 88051 Epinal ; France

²ENERGICO ingénierie ; Mulhouse ; France

(Reçu le 09/09/2002 – Accepté le 25/03/2003)

Summary : Wood is used as a source of energy since the dawn of the humanity. In the Southern Countries, its combustion allows to cook or to produce electricity whereas in the North it is essentially used for heating. Nowadays, wood is more and more used both because it is a renewable energy and its utilization allows to limit the emissions of greenhouse effect gases.

The main problem to burn wood is the large variability of its characteristics : size of the wooden scraps, humidity or composition. This way, the wood combustion is not so easy and can reach to high pollutants emissions such as carbon monoxide, nitrogen oxides, PAH and dusts. This paper makes the synthesis of measures made on 18 wood-heating systems distributed in France. These installations have different age and power and use different wood fuels.

The results show that NO_x emissions are very often weak above 140 mg.Nm^{-3} : this is due to the low nitrogen content of wood ($\sim 0,3 \%$), but the production of thermal- NO can be possible if the temperature of combustion is too high, notably with a well dried fuel or a well insulated furnace. The level of the CO emissions is very changeable (from 66 to 33600 mg.Nm^{-3}) and are not bound neither to the fuel, or to the furnace. The source of CO is actually a bad equivalence between the fuel, the furnace and the regulation device. The dusts emissions follow strictly the same way that the CO emissions, due to a bad fitting of the combustion parameters.

Finally, this study shows that the use of wood can be a good way to fight against the greenhouse effect, but some scientific data must be kept to optimize the combustion process and to limit the unburned emissions.

Keywords : wood, combustion, pollutants emissions, industrial furnaces.

I - INTRODUCTION

Le bois est utilisé comme combustible depuis la nuit des temps et continue de l'être sous différentes formes et pour différents besoins selon les pays et les habitudes. Si dans les pays chauds et sous développés, cette énergie sert surtout pour faire la cuisine ou de l'électricité, dans les pays du Nord, le bois sert au chauffage et bénéficie maintenant de technologies permettant une combustion mieux maîtrisée, plus propre et moins contraignante.

Pour respecter les accords de Kyoto qui visent à réduire les émissions de gaz à effets de serre, la France alloue des aides par l'intermédiaire de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour développer l'utilisation des énergies renouvelables, telles que le bois.

Pour valoriser et faire accepter le bois-énergie auprès du grand public européen, il est nécessaire de développer l'utilisation de chaudières automatiques fonctionnant au bois fragmenté ⁽¹⁾. Cependant, la mise en place de telles installations demande un travail d'étude préalable efficace pour devenir des références qui servent ensuite de point d'appui au développement de l'ensemble de la filière.

Le bois fragmenté utilisé dans ces installations peut avoir plusieurs provenances : plaquettes forestières issues directement de la forêt, déchets d'usines de première ou de seconde transformation du bois, ... Les chaudières mises en place offrent la possibilité d'éliminer ces déchets tout en les valorisant sous forme d'énergie. Toutefois, pour que cette élimination ne soit pas plus polluante que la mise en décharge, il est important que les paramètres d'influence de la combustion soient bien maîtrisés car toute installation de combustion est génératrice de gaz tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x) ou les composés organiques volatiles (COV), mais aussi de solides sous forme de poussières et de sues.

Les résultats présentés ici sont la synthèse de mesures effectuées sur 18 chaudières en fonctionnement âgées de 1 à 15 ans. Les facteurs d'influence sur les émissions polluantes en CO, NO et poussières sont présentés pour les différents types de foyer, de régulation et de nature de combustible. Nous verrons ainsi que toute installation peut être d'utilisation propre si le foyer est adapté au combustible et si la combustion d'un combustible de qualité variable est gérée par un matériel de régulation adapté. Nous verrons aussi que la production de NO avec des émissions d'environ 140 mg.Nm^{-3} varie très peu quelle que soit la chaudière, contrairement aux émissions d'imbrûlés (CO et poussières).

II - FOYERS, ECHANGEURS ET COMBUSTIBLES

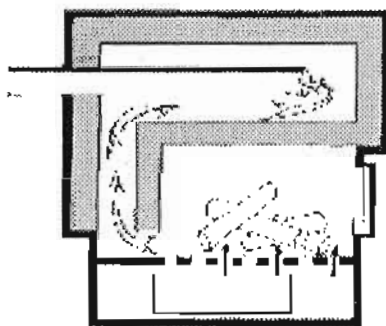
Les chaudières doivent être adaptées au type de combustible afin d'engendrer une combustion propre et limiter les émissions de polluants gazeux ou solides. Seulement, les combustibles sont multiples selon leur provenance bien que nous parlions toujours de bois. De même, les technologies propres aux chaudières, concernant le foyer ou l'échangeur, diffèrent selon la puissance et le type de combustible pour lequel elles sont prévues.

a) Les principaux types de foyers

Les foyers se distinguent principalement par le mode de transport du combustible en leur sein et par les zones d'injection de l'air comburant [2]. L'air primaire est injecté sous le combustible et permet la combustion hétérogène et de véhiculer les gaz depuis le solide vers la zone de combustion en phase gazeuse. Il permet l'oxydation des produits de dégradation dans une zone proche du solide. Son débit idéal veut qu'il soit légèrement en excès par rapport à la stœchiométrie afin de permettre une oxydation suffisamment avancée sans pour autant refroidir cette zone. L'air secondaire est injecté en phase gaz (au sein de la flamme) et permet un apport supplémentaire en oxygène dans une zone chargée en imbrûlés pour finir leur oxydation.

Le foyer à grille fixe (Figure 1) est adapté au bois bûches dont le chargement en combustible est manuel. Certaines chaudières gardent ce principe pour des raisons économiques malgré un apport automatique en combustible. Dans ce genre de chaudières, le combustible se dégrade à la surface de la grille. Cette technologie simple et peu mécanisée permet la fabrication de chaudières robustes et peu chères mais dont le chargement manuel limite l'utilisation aux seuls amateurs des corvées de bois quotidiennes. Le schéma ci-contre montre une configuration bois-bûches mais de nombreuses chaudières sont encore conçues sur ce principe malgré une alimentation automatique par vis ou par poussoir : une adaptation étant le brûleur (Figure 2).

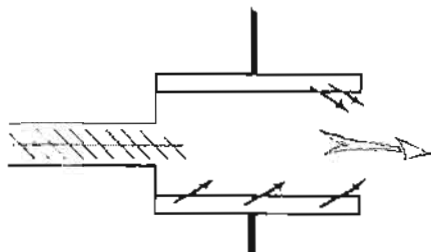
FIGURE 1: Chaudière à grille fixe et échangeur à plaques



Le brûleur (Figure 2) a été développé pour la combustion de granulés mais peut accepter tout type de combustible. Ce type de foyer peut être considéré comme un foyer à grille fixe du fait que le combustible est déplacé sur la grille par l'effet de la poussée due à l'alimentation en combustible frais. L'élément propre au brûleur réside dans la position des injections d'air secondaire et la propagation de sa flamme coaxialement à l'alimentation en combustible. Le fonctionnement aux granulés de bois donne à ces brûleurs compacité et efficacité. Ces qualités permettent aux brûleurs d'être placés dans des chaudières dédiées à la

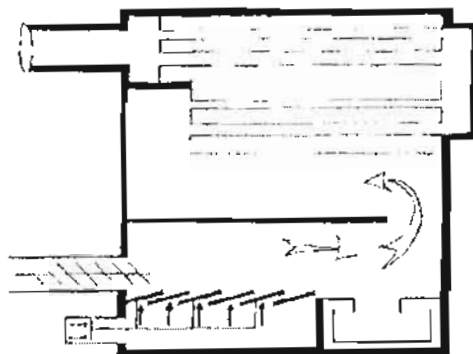
combustion de bûches, ce qui procure une utilisation bi-combustible de ces installations.

FIGURE 2 : Brûleur de granulés



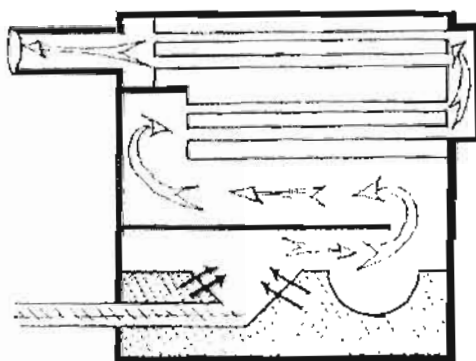
Le foyer à grilles mobiles (Figure 3) permet de brûler des combustibles humides. Conçu sur le même principe que les fours d'incinération des déchets, le combustible s'étale le long des grilles par l'action propre de ces dernières afin de connaître une première phase de séchage, puis une phase de dégradation thermique et enfin une phase de combustion hétérogène du carbone fixe. L'apport d'air primaire sous les grilles est régulé sur les trois zones énoncées précédemment. Ce type de foyers doit faire l'objet d'attentions particulières si l'humidité du combustible varie car, en fonction de celle-ci, le combustible occupe une surface de grille plus ou moins vaste. Ainsi, l'utilisation d'un bois plus sec demande d'adapter la zone et le débit d'injection de l'air primaire afin de maintenir une même qualité de combustion.

FIGURE 3 : Chaudière à grilles mobiles et échangeur à tubes de fumées



Le foyer volcan (Figure 4) est adapté au bois fragmenté dont l'alimentation est effectuée en continu. Grâce à une alimentation par vis sans fin, le combustible est injecté à la base d'un creuset dont l'angle d'ouverture permet au combustible solide de remonter par la seule pression de l'alimentation. A mi-hauteur du creuset, l'air primaire est injecté au sein du bois fragmenté. Le bois s'enflamme en surface et brûle au dessus du volcan. L'air secondaire est injecté dans la flamme, dans le courant des gaz en combustion. Ce type de foyer permet de brûler des combustibles de très secs (~5% sur brut) à semi-humide (~30% sur brut) tout en conservant de faibles émissions polluantes. Ces résultats sont dus à une localisation précise et constante du combustible et des injections d'air.

FIGURE 4 : Chaudière à foyer volcan et échangeur à tubes de fumées



b) Différents types d'échangeurs

Le foyer est la partie de la chaudière génératrice de chaleur. Cette chaleur sort du foyer sous forme de gaz chauds. L'échangeur est l'élément qui permet de communiquer cette chaleur au fluide caloporteur. Ce fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau liquide, du glycol plus ou moins dilué, de la vapeur ou de l'huile, et ce selon les températures du fluide caloporteur que l'on voudra obtenir ou selon les problèmes de gel ou de corrosion que l'on souhaite prévenir. Quoi qu'il en soit l'eau liquide demeure le fluide caloporteur le plus efficace (très forte capacité calorifique) et le moins cher à mettre en œuvre. Les échangeurs se distinguent par la forme de l'enveloppe qui sépare les fumées issues du foyer du fluide caloporteur.

Ainsi, on peut distinguer trois types d'échangeurs principalement utilisés [3] :

- «à tubes de fumées» où la fumée circule à l'intérieur de tubes dont l'extérieur est mouillé par le fluide caloporteur ;
- «à plaques » où la fumée et le fluide caloporteur circulent chacun de leur côté d'une plaque séparatrice ;
- «à tubes d'eau» où le fluide caloporteur circule dans des tubes placés au sein des fumées.

c) Différents types de régulation

Nous distinguerons ici trois types de régulations :

La régulation minimale dont l'action est notée «M/A», soit Marche/Arrêt. Elle fait fonctionner l'installation tant que la consigne de température n'est pas atteinte (consigne haute). Lorsque la différence de température entre la consigne haute (température d'arrêt) et la consigne basse (température de démarrage) est trop faible par rapport à l'inertie thermique du réseau, ce type de régulation impose plusieurs cycles de démarrage/extinction par heure.

La régulation standard dont l'action gère les débits d'air et de combustible en fonction des besoins en chaleur selon des coefficients

pré-établis en usine. Autrement dit, toutes variations des caractéristiques du combustible qui engendrent des variations des débits d'air primaire ou secondaire en fonction du débit de combustible, demandent une intervention de la part du constructeur pour adapter les coefficients de fonctionnement.

La régulation complète dont l'action adapte :

- le débit de combustible aux besoins énergétiques ;
- les débits d'air au taux d'oxygène résiduel dans les fumées ;
- le tirage à la pression dans le foyer ;

a pour principal effet de limiter les périodes de manque de chaleur et de manque d'oxygène. La régulation accompagne la montée en puissance de la chaudière lorsque les besoins en chaleur se font sentir : une progressive injection d'air permet de raviver les braises présentes dans le foyer sans un apport massif en air qui aurait pour conséquence de tout refroidir. De même, un accompagnement à l'extinction permet d'obtenir une combustion propre des gaz produits par la dégradation thermique du bois tout en diminuant le flux de chaleur convergeant vers le bois. L'adaptation des débits d'air au taux d'oxygène résiduel dans les fumées permet alors de maintenir un mélange gazeux combustible/comburant constant, ce qui permet une bonne combustion malgré la modification du régime de fonctionnement de la chaudière.

Nota : Rappelons que l'enjeu majeur de la régulation est le respect de l'environnement en adaptant les conditions opératoires aux besoins énergétiques et à la qualité du combustible car les émissions d'imbrûlés sont occasionnées essentiellement lors des phases d'allumage et d'extinction :

- la phase d'allumage est une phase pendant laquelle les températures sont trop basses pour générer une dégradation thermique optimale du bois. Ces températures trop basses provoquent aussi un ralentissement important des réactions d'oxydation des gaz et génèrent des imbrûlés ;

- la phase d'extinction est une phase pendant laquelle l'apport en oxygène est trop faible pour oxyder tous les gaz produits par une température encore suffisante à la dégradation thermique du bois.

Ainsi, il semble que les régulations complètes permettent une limitation significative des émissions polluantes lorsqu'elles sont correctement configurées.

Selon la puissance de l'installation, il est également nécessaire de prendre en compte le facteur économique. Ce qui est de coût négligeable sur une installation valant plus de 150.000 devient inconcevable sur une installation de coût inférieur à 5.000. Ainsi, la mise en œuvre d'un automate de régulation dont la complexité de programmation et le prix des sondes (sonde lambda pour la mesure de l'oxygène, sonde de pression différentielle,...) sont liés au process et non à la taille de la chaudière sera la même quelle que soit la puissance de la chaudière. Pour de petites installations, le coût devient alors trop élevé et des régulations plus simples doivent être envisagées.

d) Différents types de combustibles

Le bois est un combustible dont le pouvoir calorifique supérieur (PCS) varie peu en fonction de l'essence ou de la partie du bois (écorce, aubier, duramen) considérée⁽⁴⁾. Mais, dès lors que l'on considère une combustion dans des chaudières telles que celles présentées, chaudières où l'eau est évacuée sous forme de vapeur, le PCS est inefficace à décrire directement le bilan thermique. Ce cas de figure demande alors de considérer le pouvoir calorifique inférieur (PCI) dans lequel est compris l'effet de l'eau sur les propriétés énergétiques du combustible. Ainsi, au PCS, qui est de l'ordre de 20000 kJ par kg de bois anhydre, doit être retirée l'énergie utile à vaporiser la masse d'eau, initialement à 20°C, qui est produite durant la combustion d'une unité de masse de bois humide. Se distinguent alors 2 origines de l'eau : l'eau libre contenue dans le bois grâce à son pouvoir hygroscopique et l'eau produite par réaction de l'hydrogène constitutif du maté-

riau bois. Nous verrons aussi que la composition élémentaire du bois varie très peu. Le PCI du combustible dépend aussi essentiellement de la fraction massique en eau qu'il contient et qui est nommé humidité sur brut. Cette dernière expression est à distinguer de l'humidité sur sec qu'utilisent les professionnels du bois et qui est le rapport de la masse d'eau sur la masse de bois anhydre.

Quant à l'humidité des différents combustibles, elle peut varier en fonction des 3 facteurs principaux conjugués qui sont :

- le temps écoulé depuis la coupe ;
- la granulométrie ;
- les conditions de stockage.

La production de coproduits de l'industrie est diverse, ce qui génère des combustibles aux qualités différentes. En suivant la filière de production depuis l'abattage des arbres jusqu'au recyclage des produits en fin de vie, on obtient le panorama de combustibles suivant :

- la sciure dont la taille moyenne est de l'ordre de 0,1 cm ;
- les plaquettes dont les dimensions sont celles d'une phalange, soit 1 x 3 cm ;
- les écorces dont certaines particules peuvent dépasser 30 cm de long ;
- le bois bûches.

Ces premiers combustibles provenant directement de forêt ou de scierie, la plupart ont une humidité sur brut supérieure à 45% lorsqu'ils sont produits, ce qui leur donne un PCI inférieur à 9500 kJ.kg⁻¹. Un séchage de plusieurs années du bois bûche est traditionnel, ce qui permet d'obtenir un PCI aux alentours de 13500 kJ.kg⁻¹. Mais le séchage des sciures, plaquettes et écorces est plus rapide du fait que ces produits sont fragmentés. De plus, ces fragments de bois humides mis en tas engage une fermentation aérobie qui permet d'obtenir une humidité d'environ 20% sur brut en l'espace de quelques mois d'entrepôt en tas sous couvert et naturellement ventilé.

Lorsque l'on aborde les coproduits de l'industrie de seconde transformation du bois, on obtient des produits dont le séchage préalable fait partie intégrante du processus industriel. On distingue alors les produits suivants :

- les copeaux de menuiserie dont la granulométrie est très variable en fonction des machines qui les ont générés mais dont l'humidité est très faible (<10% sur brut d'où un PCI d'environ 16000 kJ.kg⁻¹) ;
- le broyat de bois de rebut se présentant sous forme plaquettes dont l'humidité varie beaucoup en fonction du mode de stockage. Malgré cela, l'humidité sur brut n'excède pas 20% d'où un PCI supérieur à 14500 kJ.kg⁻¹ ;
- les granulés issus de la compression de sciures dont le fort PCI (>17000 kJ.kg⁻¹) et la grande masse volumique apparente en font le combustible bois le moins cher à transporter.

III - INSTALLATIONS VISITÉES

Les 18 installations présentées dans le tableau I sont triées et numérotées selon une puissance nominale croissante. Ces installations ont une puissance s'étendant de 20 kW à 4 MW, autrement dit leur application s'étend du chauffage d'un petit pavillon (~100m²) au chauffage d'un quartier de ville tout entier. De conception (différents foyers et échangeurs), de technologie (régulation ou thermostat) et d'utilisation de combustibles différents (bûches, granulés, copeaux, plaquettes, écorces ou encore déchets d'industrie), ces 18 chaudières montrent l'hétérogénéité du parc de chaudières actuellement en fonctionnement en France.

n°	Puis	Régulation			Combustible			Humidité sur brut (%)
		Foyer	Echangeur	mesure de	pression	action	Type	
1	4000	grille fixe	tubes	fixe	foyer	air	copeaux	menuiserie
2	2600	grilles mobiles	tubes	oui	non	M/A	écorces + plaquettes + sciure	sciure
3	1000	grilles mobiles	tubes	oui	oui	air + bois	sciure + écorces	sciure
5	630	grille fixe	tubes	oui	oui	air + bois	sciure + déchets papetiers	sciure + pâte de sciure
6	400	volcan	tubes	non	non	M/A	copeaux	menuiserie
7	350	volcan	tubes	non	non	air + bois	granulés	sciure compressée
8	350	volcan	tubes	oui	non	air + bois	copeaux	menuiserie
9	320	grille fixe	tubes	oui	oui	bois	palette	forêt + paysage
10	300	grille fixe	tubes	non	non	air + bois	palette broyée	déchetterie
11	290	grille humide	tubes	non	non	M/A	palette broyée + plaquette	fabrique d'emballage
12	250	grille fixe	plaques	oui	non	M/A	brquettes	menuiserie
13	70	volcan	tubes	non	non	bois	sciure	sciure
14	55	brûleur / grille fixe	plaques	non	non	M/A	granulés	sciure compressée
15	40	grille fixe	plaques	non	non	M/A	granulés ou boches	sciure compressée
16	30	brûleur	plaques	non	non	M/A	boches	forêt
17	20	brûleur	plaques	non	non	M/A	granulés	sciure compressée
18	20	grille fixe	plaques	non	non	M/A	granulés	sciure compressée
							boches	forêt

TABLEAU 1 : Récapitulatif des installations selon un classement par puissance décroissante

Seules 8 des ces chaudières sont munies de systèmes de gestion du débit de combustible. Parmi elles, seulement 6 sont munies de régulations complètes, les 2 autres étant munies de régulations standards qui adaptent le débit de bois afin que le taux d'oxygène dans les fumées soit constant, le débit des fumées étant fixé par un ventilateur de tirage à débit constant.

Les 10 autres chaudières dont l'installation n° 1, soit la plus puissante des installations figurant dans ce dossier, sont munies de régulations minimales. Malgré cela, ses émissions polluantes ne pâtissent pas de ce choix technologique. De même l'installation n° 5 fait exception à la règle économique énoncée dans la présentation des différents types de régulations. On notera que ces 2 installations brûlent un combustible sec et peu variable : des copeaux de menuiseries. Notons aussi, la corrélation entre le type d'échangeur et la puissance de la chaudière : comme la régulation, ceci est dû à des soucis d'économies dans la réalisation de l'installation. Le tableau 2 ci-dessous trie les différentes installations selon une humidité sur brut du combustible croissante. Ce tri permet de visualiser les corrélations existant entre l'humidité du combustible, sa provenance et les choix technologiques inhérents la mise en œuvre du combustible utilisé.

n°	Foyer			Régulation			Combustible		
	Puis.	Forme	Echangeur	oxygène	action	pression foyer	Type	provenance	Humidité sur brut
13	70	volcan	tubes	non	M/A	non	granulés	sciure compressée	6,0%
18	20	brûleur	plaques	non	M/A	non	granulés	sciure compressée	6,0%
1	2000	grille fixe	tubes	non	M/A	oui	copeaux	menuiserie	6,0%
14	55	brûleur	plaques	non	M/A	non	granulés	sciure compressée	6,0%
16	30	brûleur	plaques	non	M/A	non	granulés	sciure compressée	6,0%
6	400	volcan	tubes	non	air & bois	non	granulés	sciure compressée	6,0%
11	290	grille humide	tubes	non	M/A	non	brquettes	déchets de menuiserie	7,7%
7	350	volcan	tubes	non	air & bois	non	copeaux	menuiserie	8,0%
5	600	volcan	tubes	non	M/A	non	copeaux	menuiserie	10,0%
8	350	volcan	tubes	oui	bois	non	plaque	forêt + paysage	25,5%
14	55	grille fixe	plaques	non	M/A	non	bûches	forêt	30,0%
10	300	grille fixe	tubes	non	M/A	non	palette broyée + plaque	fabrication d'emballage	30,0%
17	20	grille fixe	plaques	non	M/A	non	bûches	forêt	30,0%
15	40	grille fixe	plaques	non	M/A	non	bûches	forêt	30,0%
12	250	grille fixe	plaques	oui	bois	non	sciure	3 scières	38,8%
9	320	grille fixe	tubes	oui	air & bois	oui	palette broyée	déchetterie	41,4%
4	700	grille fixe	tubes	oui	air & bois	oui	sciure + déchets papeterie	sciure + papeterie	50,0%
2	2500	grille mobile	tubes	oui	air & bois	non	sciure + sciure	sciure	55,0%
3	1000	grille mobile	tubes	oui	air & bois	oui	sciure + sciures	sciure	60,0%

TABLEAU 2 : Récapitulatif des installations selon un classement par humidité croissantes

La description des différents types de foyers évoque une adéquation entre l'humidité du combustible et le type de foyer. Ainsi, le tableau ci-dessus nous permet de constater que les foyers à grilles mobiles sont plutôt dédiés au combustibles humides, alors que les brûleurs et les foyers volcans sont plutôt dédiés aux combustibles secs.

De même, la description des différents types de régulations évoque une adéquation entre la régulation et la variabilité du combustible. Le tableau ci-dessus montre aussi que la présence de régulation minimale (M/A) est très souvent liée à l'utilisation d'un combustible peu humide.

IV - RESULTATS ET DISCUSSION SUR LES ÉMISSIONS POLLUANTES

Dans le but de pouvoir comparer les émissions polluantes entre elles, et de se référer aux normes européennes, les mesures des polluants initialement effectuées en fraction molaire (ppm) sont corrigées à 10% d'oxygène (Equation 1) et exprimées en flux de masse (Equation 2).

Equation 1 : Correction des mesures à 10% d'O₂

$$M_{\text{corrigée}} = M_{\text{mesurée}} \times \frac{0,21 - 0,1}{0,21 - M_{O_2}}$$

où :

M_{O_2} est le taux d'oxygène mesuré ;

$M_{\text{mesurée}}$ est la mesure exprimée en ppm ;

$M_{\text{corrigée}}$ est le résultat corrigé à 10 % exprimé en ppm.

Equation 2 : Expression du flux de masse

où :

$$M_m = \left(\frac{m}{22,4 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot Mf$$

m est la masse molaire du produit considéré en $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$;

M_f est la mesure exprimée en ppm ;

M_m est le flux de masse en kg.Nm^{-3} .

a) Emissions de monoxyde de carbone

Le tableau ci-dessous trie les différentes installations selon des émissions croissantes de monoxyde de carbone. Les numéros 13, 18 et 5 prévalent des installations dont les émissions de CO sont parmi les meilleures bien que ces chaudières ne soient pas gérées par des régulations complètes. La dernière ligne révèle un cas inverse.

n°	Foyer		Régulation	Type	provenance	PCI humide	Humidité sur brut	T° fumées en °C	en %				en mg/m ³ à 10% d'O ₂			
	Puis	Forme							O ₂	CO ₂	CO	NO	Poussière			
13	70	volcan	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	189	12,4	8,3	66	84				
13	20	brûleur	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	248	14,4	8,4	149	116				
9	320	grille fixe	ou	palette broyée	déchets bois menuiserie	8431	41,4%	181	11,3	9,2	170	722				
5	600	volcan	ou	copeseux	sciure	14698	10,0%	227	9,7	10,3	170	85				
8	360	volcan	ou	plaquette	forêt + Paysage	11608	25,5%	211	10,7	9,7	173	475				
4	360	grille fixe	ou	sciure + déchets papeteries	sciure + papeterie forêt	8892	50,0%	270	2,9	12,5	244	139				
14	95	grille fixe	non	bûches	sciure + papeterie forêt	10841	30,0%	230	12,8	8,1	278	114				
1	4000	grille fixe	ou	copeseux	menuiserie	15793	6,0%	189	8,6	8,9	374	189				
3	1000	grille fixe	ou	sciure	3 sciures	8904	38,8%	289	9,2	11,2	442	155				
12	250	grille fixe	ou	sciure + écorces	sciure	5364	80,0%	238	6,5	10,5	628	169				
10	300	grille fixe	non	palette broyée + plaquette	sciure + écorces	11699	30,0%	230	8,3	11,3	750	165				
17	20	grille fixe	non	bûches	sciure + écorces	1064	30,0%	230	16,0	4,9	100	86				
14	55	brûleur	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	170	10,5	10,2	130	70				
16	30	brûleur	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	329	12,5	8,2	172,5	103				
15	40	grille fixe	non	bûches	forêt	10841	30,0%	439	8,9	11,7	264,6	168				
6	400	volcan	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	201	12,6	8,1	270	72				
7	350	volcan	non	granulés	sciure compressée	15068	8,0%	307	6,8	10,3	306,9	136				
1	230	grille humide	non	Briquettes	déchets de menuiserie	15843	7,7%	230	6,2	14,2	912,7					
2	2500	grille mobile	ou	écorces + plaquettes + sciure	sciure	6790	55,0%	178	10,7	8,5	335,80					

TABLEAU 2 : Récapitulatif des installations selon un classement par émissions croissantes de CO

Onze de ces chaudières produisent moins de 750 mg.Nm^{-3} de CO alors que les normes les plus strictes en vigueur en France limitent à 1200 mg.Nm^{-3} les émissions des chaudières les mieux classées (les moins polluantes).

Le plus mauvais candidat de ce dossier (chaudière n°2) avec 33600 mg.Nm^{-3} de CO devrait, d'après les mesures, fermer simplement son installation parce que de tels taux de CO sont directement dangereux pour l'homme même s'ils sont rejetés dans un quartier peu habité et ventilé. A la décharge du présent constat, ces résultats ont été obtenus en hiver, époque durant laquelle les chaudières fonctionnent à plein régime. Or la scierie n'avait prévu aucune infrastructure permettant de stocker son combustible à l'abri des intempéries. Il entrait dans la chaudière un mélange de neige, de terre gelée et de bois, d'où les résultats obtenus. Dans un tel cas, bien que cette installation bénéficie d'un système de régulation en état de marche (la mesure d' O_2 donne 10,7%, résultat cohérent avec ce genre d'installation), ce système n'est pas apte à garantir des émissions polluantes minimales : le problème est vraiment celui de la qualité du combustible.

Le principe de fonctionnement d'une régulation complète est généralement efficace pour diminuer les émissions polluantes : la totalité des installations munies de système de régulation complète ou standard sont comprises parmi les onze installations dont les émissions de CO sont inférieures à 750 mg.Nm^{-3} .

Malgré tout, il est intéressant de constater que l'installation n°13 produit moins de CO avec 66 mg.Nm^{-3} sans aucune régulation de la combustion. Ces performances sont dues à un bon réglage de la chaudière. Seulement un bon réglage n'est pas viable si le combustible change (humidité, masse volumique apparente). Cette chaudière fonctionne au granulé de bois qui par son procédé de fabrication a des caractéristiques constantes quelle que soit l'époque de l'année. Afin d'étayer ce constat, on peut remarquer que les chaudières n°18 et n°5 font partie des chaudières les moins polluantes bien qu'elles n'aient

pas de système de régulation. Dans ces deux cas le combustible utilisé est sec et de caractéristiques stables : la chaudière n°18 brûle des granulés et la chaudière n°5 brûle des copeaux de menuiserie.

Nous remarquons également une réelle indépendance des émissions de CO vis-à-vis du type de combustible (*Deglise.X [5]*). De même l'humidité ne semble pas avoir de rôle direct sur les émissions de CO. La chaudière n°14 est un bon exemple car en brûlant des bûches de bois ses émissions de CO sont de 278 mg.Nm^{-3} , et ce malgré une régulation minimale. De même, la chaudière n°9 brûle des palettes broyées de déchetterie contenant plus de 40% d'eau avec un PCI inférieur à 8500 kJ.kg^{-1} tout en n'émettant que 170 mg.Nm^{-3} de CO.

Ces résultats montrent que le facteur d'influence du CO n'est pas le combustible à proprement parler, mais c'est plutôt un mauvais emploi de ce combustible. Les raisons de ce mauvais emploi peut être lié à la variabilité du combustible qui conduit au dérèglement, mais aussi à son inadéquation avec le foyer.

b) Emissions d'oxydes d'azote

Le tableau ci-dessous trie les différentes installations selon des émissions croissantes de monoxyde d'azote.

Les deux dernières lignes révèlent le cas de 2 installations dont les émissions de NO sortent de la moyenne.

n°	Foyer		régulation	Type	provenance	PCI humide	Humidité sur brut	T° en %				NO
	Puis.	Forme						O ₂	CO ₂	CO		
14	55	grilleur	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	10,5	10,2	1318	70	
6	400	volcan	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	12,6	8,1	2700	72	
17	20	grilleur	non	bûches	forêt	10844	30,0%	16,0	4,8	1100	88	
13	76	volcan	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	12,4	8,3	166	94	
18	30	grilleur	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	12,5	8,2	1725	103	
10	300	grille fixe	non	palette broyée + plaquette	laboratoire d'emballage	11099	30,0%	5,2	11,3	732	105	
14	55	grille fixe	non	bûches	forêt	10844	30,0%	12,5	8,1	278	114	
18	20	grille fixe	non	granulés	sciure compressée	16391	6,0%	12,4	6,4	138	116	
7	350	volcan	oui	copieux	sciure compressée	15066	8,0%	9,8	10,8	3086	138	
4	700	grille fixe	oui	sciure + déchets papetiers	sciure + papetière	8952	50,0%	2,9	12,5	244	139	
12	250	grille fixe	oui	sciure	3 sciures	8954	38,8%	9,2	11,2	442	155	
15	40	grille fixe	non	bûches	forêt	10841	30,0%	8,9	11,7	2048	168	
3	1000	grille mobile	oui	sciure + écorces	sciure	5364	60,0%	6,5	10,5	628	169	
B	350	volcan	oui	palette	forêt + paysage	1308	25,5%	10,7	9,7	173	173	
9	320	grille fixe	oui	palette broyée	déchetterie	8491	41,4%	11,3	9,2	170	172	

TABLEAU 4 : Récapitulatif des installations selon un classement par émissions croissantes de NO

Comme précédemment la chaudière n°14 figure deux fois car cette chaudière bi-combustible bûches et granulés a été auditée selon ses deux modes de fonctionnement. Quatre chaudières ne figurent pas dans ce tableau pour des raisons de limitation du matériel de mesure : les installations absentes de ce tableau ont des taux d'émissions de NO supérieurs à 500 ppm et n'ont pas pu être évaluées avec l'appareil utilisé lors de ces essais. Ainsi, la chaudière n°1 qui brûle une partie de chutes de panneaux de particules, combustible plus chargé en azote (4,7 % de la masse) que le bois (environ 0,3 % de la masse), ne figure pas dans ce tableau récapitulatif pour des raisons de saturation des cellules de mesure.

L'analyse élémentaire sur les composés C, H, O et N réalisée sur chacun des combustibles fournit des résultats très peu variables. Ainsi, nous ne présentons ci-dessous que la moyenne des résultats obtenus concernant les combustibles des chaudières présentées ci-dessus :

TABLEAU 5 : fractions massiques constitutives en C, H, O et N des combustibles utilisés

Elément	C	H	O	N
Fraction massique	47,1%	5,9%	43,5%	0,3%
Corrélation sur la moyenne	95,9%	95,9%	96,5%	66,1%

Le taux de variation par rapport à la moyenne (cf. Tableau 5) montre la régularité de composition du combustible bois quelles que soient sa forme ou sa provenance. Cet indice de variabilité est plus faible pour l'azote avec 66% mais ce résultat est dû à la précision des résultats obtenus et aux variations dues à la présence en faible quantité de panneaux de particules.

D'après *Skreiberg.O et al.*^[6], le peu d'azote contenu dans le combustible (cf. Tableau 5) limite la formation de NO du combustible (fuel-NO). D'après *Alzueta.U.M et al.*^[7], les températures existantes dans ce type de foyers ne sont pas propices à la formation de NO thermique. Aussi, les mesures montrent que la majorité des installations ne

produisent que peu de monoxyde d'azote. Treize des quinze chaudières (cf. Tableau 4) génèrent des émissions de monoxyde d'azote entre 70 et 170 mg.Nm⁻³.

Seules les chaudières n° 8 et n° 9 ont des émissions de NO plus importantes que la moyenne avec respectivement 475 mg.Nm⁻³ et 722 mg.Nm⁻³.

Concernant la chaudière n° 8, la production de NO est due à la géométrie et à la nature même du foyer : la forme du foyer engendre des températures plus élevées que dans d'autres types de foyers ce qui facilite la production de NO thermique. De plus, le foyer de cette chaudière est généreusement garni de briques réfractaires qui rayonnent une importante quantité d'énergie juste au-dessus du lit solide, favorisant la montée en température et aidant ainsi la formation de NO par le mécanisme thermique.

Quant à la chaudière n° 9, son foyer à grille fixe ne peut pas être l'unique origine de la formation de NO. Quant au combustible, il est constitué de bois en fin de vie issu de déchetterie. Ce combustible est essentiellement constitué de palettes mais aussi de caisses et de socles d'expédition faits de bois aggloméré. Il peut donc contenir plus d'azote que le bois. Aussi, cette mesure de NO, 5 fois plus haute que la moyenne des installations, est due à une combinaison de ces deux facteurs d'influence que sont une température plus élevée et un combustible plus chargé en azote.

c) Emissions de poussières

Le tableau ci-dessous trie les différentes installations selon des émissions croissantes de poussières.

TABLEAU 6 : Récapitulatif des installations selon un classement par émissions croissantes de poussières

n°	Foyer		Régulation		Combustible		en %					en mg/Nm ³ à 10% d'O ₂	
	Puis.	Forme	oxygène	Type	provenance	PCI humide	Humidité sur brut	O ₂	CO ₂	CO	NO	Poussière	
12	250	grille fixe	oui	scierie	Scières	8904	38,8%	5,2	11,2	24,2	150	40	
5	600	volcan	non	copreaux	menuiserie	14698	10,0%	9,7	10,8	170		89	
8	350	volcan	oui	plaquelette	forêt + paysage	11308	25,5%	10,7	9,7	173	475	110	
1	3000	grille fixe	non	copreaux	menuiserie	15793	6,0%	8,6	8,9	375		189	
3	1000	grille mobile	oui	scierie + écorces	sciens	5364	60,0%	6,5	10,5	629	169	204	

L'équipement qui permet d'effectuer la mesure du taux de poussières est conçu sur le principe suivant :

- une partie du flux gazeux est pompée de façon isostatique dans la conduite des fumées ;
- ce flux gazeux converge vers un filtre sur lequel se déposent les particules solides de taille supérieure à la maille du filtre.

Dans sa mise en œuvre cet équipement demande que :

- les poussières soient réparties uniformément au sein de l'écoulement dans lequel les prélèvements sont effectués ;
- la vitesse de l'écoulement soit connue et stable afin que le prélèvement soit effectivement isostatique.

Ces impératifs de mesures sont à l'origine du peu de résultats que nous présentons ici.

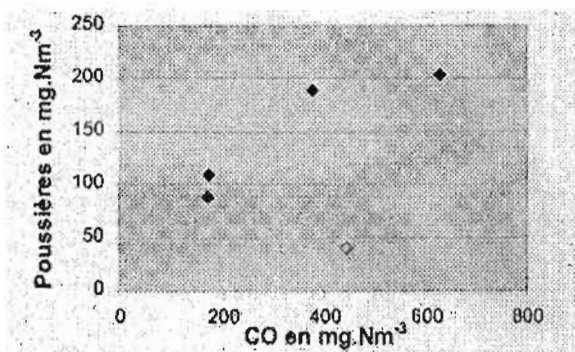
Selon l'étude de Zuberbühler *U et al.* ⁽⁸⁾ les poussières issues de chaufferies automatiques sont principalement dues à la vitesse élevée des gaz qui crée des envols de cendres de composition essentiellement minérale. Aussi, un premier facteur d'influence de la production de poussières réside dans la qualité du bois. Plus le combustible est chargé en résidus minéraux et plus la production de poussières est importante. Mais, la mécanique des fluides rentre également en jeu : un fort air primaire crée des envols de poussières. De plus, si l'air secondaire est en défaut afin d'obtenir un excès d'air total constant, alors les poussières montent directement dans le conduit de cheminée.

On peut alors remarquer que la chaudière n°12 qui ne génère que 40 mg.Nm⁻³ est alimentée par de la sciure, autrement dit du bois exempt d'écorce. De même, la chaudière n°3 qui est la plus génératrice de poussières brûle en partie des écorces ; sachant que l'écorce est la partie du bois la plus fortement chargée en résidus minéraux (Ca, Si, ...).

Il est également remarquable, hormis la chaudière n°12, de voir (Figure 5) la corrélation qui existe entre les émissions de CO et les émissions de poussières. Bien qu'il soit impossible d'établir une tendance à partir d'un échantillon de 5 mesures dans lesquelles figure un

contre exemple, il est tout de même difficile d'avancer que ces émissions de poussières sont indépendantes de qualité de la combustion lorsque l'on peut apprécier les cendres à leur couleur. Les cendres issues d'installations mal réglées sont noires alors que les cendres tirées du cendrier d'une installation correctement réglée sont plutôt claires. Ce graphique permet de montrer que les émissions de poussières suivent l'évolution du CO. Aussi, quand une chaudière mal réglée produit du CO, elle produit aussi des imbrûlés solides sous formes de cendres noires.

FIGURE 5: Emissions de poussières en fonction du CO



V - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude visualise un échantillon large d'installations brûlant des coproduits de l'industrie du bois sur lesquelles nous avons fait un bilan des émissions de CO, NO et poussières. L'interprétation de ces résultats est basée sur 3 facteurs d'influences qui sont le type de foyer, le type de régulation et la qualité du combustible.

Toutes les installations consomment des coproduits de bois, c'est-à-dire un combustible relativement pauvre en azote, d'où des émissions de NO faibles et ne présentant que peu de variations selon l'installation considérée. Malgré tout, il est à noter que les températures qui règnent dans ces foyers sont juste assez faibles pour ne pas favoriser la

formation de NO par le mécanisme thermique. Aussi, l'utilisation de combustibles secs dont les températures de flammes sont plus élevées doit être accompagnée d'une dissipation de l'énergie produite. Un foyer trop bien garni de réfractaire et brûlant un combustible trop sec produira fatalement plus de NO par le mécanisme thermique.

Nos résultats concernant les poussières sont limités pour que nous puissions en tirer une tendance définitive. Malgré tout, nous avons mis en évidence une relation directe entre les émissions de CO et les émissions de poussières, ce qui nous permettra d'extrapoler les résultats recherchés. Nous devons cependant réaliser d'autres mesures pour en déduire des relations plus stables.

Le CO est le facteur de pollution qui se révèle le plus variable et le plus difficile à saisir. Les raisons de sa présence dans les fumées sont multiples. Un combustible fortement humide et/ou issu de bois de rebut peut être brûlé sans émissions excessives de CO. Cependant, nous avons pu décrire 3 paramètres qui influent sur les émissions de CO : adéquation foyer-combustible, adéquation réglages-combustible et adéquation variabilité-régulation.

L'adéquation foyer-combustible : un combustible humide a besoin de sécher avant de brûler. Cette phase de séchage étant réalisée dans le foyer, elle requiert l'étalement du bois sur une certaine surface afin que l'énergie issue de la flamme provoque ce séchage. Un foyer recevant du combustible humide devra ainsi être plus vaste qu'un foyer de même puissance recevant du combustible sec, et ce, d'une part pour permettre le séchage du combustible, et d'autre part pour pouvoir accueillir des flux de combustibles plus importants vu la baisse de PCI impliquée par la présence d'eau dans le combustible.

L'adéquation réglages-combustible : la dégradation thermique d'un combustible humide connaît un pic endothermique plus important que celle d'un combustible sec, cela étant directement lié au processus d'évaporation de l'eau. Aussi, la combustion d'un combustible humide sera plus sensible à un excès d'air primaire que la combustion d'un

combustible sec (Saastamoinen.J.J). L'excès d'air primaire tend alors à refroidir le lit de combustible solide et tend à ralentir les réactions de dégradations, ce qui engendre des produits de dégradation plus lourds et plus difficiles à brûler.

L'adéquation variabilité-régulation : un combustible peut avoir des caractéristiques variables que ce soit l'humidité, la granulométrie, la composition élémentaire, etc. Il faut alors adapter les débits d'air et de combustible à ce combustible variable. De même, un combustible sec ne requiert pas obligatoirement une régulation complète pour obtenir une combustion peu polluante. Ainsi, le type de régulation doit être adapté à la qualité du combustible utilisé et doit pouvoir ajuster les conditions opératoires selon les variations de qualité du combustible.

Comme cette étude le démontre, de multiples facteurs influent sur la qualité de combustion : foyer (injections d'air, géométrie, nature), combustible (humidité, granulométrie, taux de cendres, teneur en azote, ...), régulation,...

Ainsi, nos travaux s'orientent, d'une part sur l'influence des caractéristiques du combustible bois sur sa combustion, et d'autre part sur l'influence du foyer et de sa régulation sur la combustion, afin de les mettre en adéquation et de fournir des données scientifiques claires pour développer et pérenniser la filière bois-énergie.

BIBLIOGRAPHIE

[1] - BERNARD C, HUON. C, MOUGEL E, ZOULALIAN A, ROGAUME.Y ; " Bois-énergie : problématiques liées au combustible et au foyer"; Assemblée générale du Groupement Français de Combustion ; 2001.

[2] - STREHLER.A; "Technologies of wood combustion"; *Ecological engineering* 2000 ; 16:25-40.

[3] - ROBERT P ; "Production de chaleur à partir du bois"; *Techniques de l'ingénieur : Génie énergétique* 1987 ; BE3:2135.

[4] - INCE.J.P; "How to estimate recoverable heat energy in wood or barkfuels"; Forest Products Laboratory; 1979.

[5] - DEGLISE.X; "Les conversions thermochimiques du bois"; R.F.F. XXXIV 249-270 ; 1982.

[6] - SKREIBERG.O, GLARBORG.P, JENSEN A, DAM-JOHANSEN.K ; "Kinetic NOx modelling and experimental results from single wood particle combustion"; Fuel, vol.76 n°7, (1997) ; p.671-682.

[7] - ALZUETA.U.M, GLARBORG.P, DAM-JOHANSEN.K ; "Low temperature interactions between hydrocarbons and nitric oxide: an experimental study"; Combustion and Flame, (1997) ; 109:25-36.

[8] - ZUBERBÜHLER.U, G.BAUMBACH, D STRAUB, K.R.G.HEIN, M.STRUSCHKA ; "Fine particle emissions from wood combustion in different firing systems"; 6th international conference on technologies and combustion for a clean environment (cleanair) ; PORTO ; 2001.