

CAMPAGNE DE MESURES DE PARTICULES A L'EMISSION DE CHAUFFERIES BIOMASSE

Rapport final

octobre 2009

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par IRH Ingénieur Conseil

Coordination technique :
Erwan AUTRET
Direction des Energies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés Energétiques
20, avenue du Grésillé
49004 ANGERS

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les maîtres d'œuvre et exploitants des chaufferies et les membres du comité de pilotage de l'étude, pour leur aide dans l'élaboration de ce document :

- Erwan AUTRET, Sylvain BORDEBEURE, Cédric GARNIER et Emmanuel FIANI, ADEME Angers
- Michel AZIERE, ADEME, Délégation Régionale Bourgogne
- François BOISLEUX, ADEME, Délégation Régionale Nord
- Noémie FRADET, ADEME, Délégation Régionale IDF
- Sophie GOUTALAND, ADEME, Délégation Régionale Franche-Comté
- Sébastien HUET, ADEME, Délégation Régionale Haute-Normandie
- Marie MAMDY et Jonathan MULLER, ADEME, Délégation Régionale Alsace
- Jacques PASSAVY, ADEME, Délégation Régionale Auvergne
- Nathalie TROUSSELET, ADEME, Délégation Régionale Languedoc Roussillon
- Axel WYCKHUYSE, ADEME, Délégation Régionale Champagne-Ardenne

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

<http://www.ademe.fr>

About ADEME :

The French Agency for the Environment and Energy Management (ADEME) is a public agency under the joint supervision of the French Ministries for Ecology, Sustainable Development and Spatial Planning, and for Higher Education and Research. It participates in the implementation of public policies in the fields of the environment, energy and sustainable development. The agency makes its expertise and consultancy skills available to business, local communities, public authorities and the general public and helps them to finance projects in five areas (waste management, soil preservation, energy efficiency and renewable energies, air quality and noise abatement) and to make progress with their sustainable development procedures.

<http://www.ademe.fr>

Sommaire

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE	6
2. PRESENTATION DES CHAUFFERIES	8
3. PARAMETRES MESURES ET METHODOLOGIE APPLIQUEE	9
3.1. PARAMETRES MESURES	9
3.1.1. Analyse du bois et des cendres	9
3.1.2. Mesures des rejets atmosphériques	9
3.2. METHODOLOGIE	9
3.2.1. Echantillonnage du bois et des cendres.....	9
3.2.2. Mesures des rejets atmosphériques	10
4. PLANNING DES INTERVENTIONS	12
5. METHODOLOGIE DE CALCUL DES PERFORMANCES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES	13
5.1. PERFORMANCES ENERGETIQUES	13
5.1.1. Détermination du rendement.....	13
5.1.2. Détermination du taux de charge	14
5.2. PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES – DETERMINATION DES FACTEURS D'EMISSION	14
6. RESULTATS ET RECOMMANDATIONS	15
6.1. RESULTATS ENERGETIQUES	15
6.2. RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX.....	16
6.2.1. Résultats des analyses du combustible	16
6.2.2. Résultats des analyses des cendres.....	16
6.2.3. Résultats des analyses des rejets atmosphériques	17
6.2.4. Résultats des calculs de facteur d'émission.....	20
6.3. RECOMMANDATIONS.....	21
7. CONCLUSION	23

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des chaufferies.....	8
Tableau 2 : Planning des interventions	12
Tableau 3 : Résultats énergétiques.....	15
Tableau 4 : Résultats des analyses du combustible	16
Tableau 5 : Résultats des analyses des cendres.....	17
Tableau 6 : Résultats des rejets atmosphériques	17
Tableau 7 : Réglementation relative aux rejets de poussières (Arrêté du 25 juillet 1997).....	19
Tableau 8 : Résultats des facteurs d'émission	20
Tableau 9 : Facteurs d'émission du CITEPA pour les installations de combustion de puissance inférieure à 50 MW du secteur industriel ou du chauffage collectif (2003)	21

Liste des graphes

Graphe 1 : Concentration moyenne en poussières selon le système de traitement.....	18
--	----

Résumé

L'objectif de l'étude est d'évaluer les performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse en fonctionnement, en particulier au regard des valeurs limites réglementaires et exigées par l'ADEME d'émissions de particules. La campagne de mesures concerne 14 chaufferies biomasse de puissance inférieure à 4 MW, équipées de dépoussiérage de type cyclonique (7 sites), de filtres à manches (4 sites) ou d'électrofiltres (3 sites). La puissance des chaudières biomasse étudiées varie entre 0,7 MW et 3,5 MW et sont pour une majorité très récente. Les plaquettes forestières seules ou en mélange avec des connexes de scierie ou des palettes, sont le combustible généralement utilisé. Ont été réalisées des analyses de combustibles, de cendres et de rejets atmosphériques (monoxyde et dioxyde de carbone, particules, oxydes d'azote et dioxyde de soufre). Les rendements des chaudières et les taux de charge des chaufferies ont également été évalués.

Dans l'ensemble, les 14 chaufferies étudiées présentent de bonnes performances énergétiques et environnementales, avec en particulier de faibles émissions de particules. Au regard des performances des systèmes de dépoussiérage, les concentrations observées en sortie de cyclone ou multicyclones sont très dispersées, avec une moyenne des résultats obtenus sur 5 sites égale à 108 mg/Nm³. A l'inverse, les concentrations observées en sortie de filtre à manches et d'électrofiltre sont toujours inférieures à 50 mg/m³. Les filtres à manches et les électrofiltres conduisent à des niveaux d'émission de poussières comparables. Des recommandations sont enfin formulées pour garantir des émissions réduites de polluants atmosphériques.

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'ADEME pilote actuellement le programme national Biomasse Energie 2007-2010 avec comme principal objectif, pour le secteur du chauffage collectif et industriel, l'incitation des maîtres d'ouvrage publics et privés à s'équiper de chaufferies biomasse performantes. Dans le cadre de son système d'aide aux énergies renouvelables en vigueur, l'ADEME exige le recours à des systèmes performants de dépoussiérage et a introduit comme critère de performance une valeur limite d'émission de poussières exprimée en mg/Nm^3 à 11 % d' O_2 . Cette exigence est plus contraignante que la réglementation en vigueur lorsqu'elle existe et dépend de la puissance de l'installation, à savoir :

- conformité à la classe 3 de la norme EN 303-5 lorsqu'elle s'applique ou la présence d'un système de dépoussiérage de type cyclonique ;
- pour les chaufferies de puissance comprise entre 300 et 2 000 kW, la mise en place d'un système de dépoussiérage de type cyclonique permettant de respecter une $\text{VLE}_{\text{poussières}} = 150 \text{ mg}/\text{m}^3$ à 11% O_2 ;
- pour les chaufferies de puissance comprise entre 2 000 et 4 000 kW, la mise en place d'un système de dépoussiérage de type cyclonique permettant de respecter une $\text{VLE}_{\text{poussières}} = 100 \text{ mg}/\text{m}^3$ à 11% O_2 dans les conditions optimales d'opération ;
- pour les chaufferies de puissance comprise entre 4 000 et 20 000 kW, une $\text{VLE}_{\text{poussières}} = 100 \text{ mg}/\text{m}^3$ à 11% O_2 .

Par ailleurs, le fonds chaleur, dont la gestion a été confié à l'ADEME, prévoit également dans ses appels à projets annuels des valeurs limites d'émission de poussières de plus en plus contraignantes. Ainsi, le premier appel à projets Biomasse Chaleur Industrie Agriculture (BCIA) 2009 exige une valeur limite de $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ pour tous les projets de plus de 1000 tep^1 et l'appel à projets Biomasse Chaleur Industries Agriculture et Tertiaire (BCIAT) 2010 prévoit d'aller au-delà de ces valeurs, avec pour les installations de puissance inférieure à 20 MW une valeur limite d'émissions de poussières inférieure ou égale à $30 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ à 11% d' O_2 .

L'objectif de l'étude est d'évaluer les performances de chaufferies biomasse en fonctionnement au regard des valeurs limites réglementaires et exigées par l'ADEME d'émissions de particules.

La campagne de mesures concerne 14 chaufferies biomasse de puissance inférieure à 4 MW, équipées de dépoussiérage de type cyclonique, de filtres à manches ou d'électrofiltres. Ont été réalisées des analyses de combustibles (pouvoir calorifique inférieur et taux de cendres), de cendres (teneur en carbone) et de rejets atmosphériques (débit, température, humidité, teneur en oxygène, monoxyde et dioxyde de carbone, particules, oxydes d'azote et dioxyde de soufre). Les rendements des chaudières et les taux de charge des chaufferies ont été évalués.

L'étude s'est déroulée en 2 grandes phases.

Phase 1 : Collecte d'informations et définition du protocole de mesures

L'objectif de cette étape a consisté à collecter l'ensemble des renseignements disponibles et nécessaires à la réalisation des campagnes de mesures et à l'exploitation des résultats :

- la présentation de l'installation ;
- l'analyse du procédé d'alimentation bois depuis le silo ;
- l'analyse du dimensionnement par rapport aux besoins ;
- l'analyse du mode de régulation liée à la fourniture de chaleur ;
- l'identification si possible des causes génératrices de pannes ou incidents et fréquence de ceux-ci ;
- les garanties des constructeurs relatives aux émissions de particules, les résultats de PV d'essais, l'arrêté d'autorisation d'exploiter, les résultats des précédentes campagnes de mesures.

¹ * tep : tonne équivalent pétrole ; 1 tep = 11630 kWh

Les moyens d'accès aux points de mesures (échelle à crinoline, passerelle...) ainsi que les caractéristiques de ceux-ci (trappes normalisées, brides, piquages...) ont été vérifiés avant les campagnes de mesures de rejets atmosphériques.

Phase 2 : Campagne de mesures et valorisation des résultats

La phase 2 consiste en la réalisation des campagnes de mesures sur les 14 sites ainsi que l'exploitation des mesures et des données recueillies lors des interventions, le but étant d'évaluer les performances des chaudières biomasse en termes de rendement et de facteur d'émission des rejets atmosphériques.

Le présent rapport d'étude détaille donc, pour les mesures sur site, les paramètres mesurés et la méthodologie employée. Il reprend les méthodes de calculs de rendement et de facteur d'émission d'une chaudière, ainsi que des taux de charge. Une synthèse des résultats obtenus sur l'ensemble des campagnes de mesures est présentée avec des comparaisons à la réglementation, des commentaires et des recommandations.

2. PRESENTATION DES CHAUFFERIES

Les campagnes des mesures ont été effectuées sur 14 sites choisis par l'ADEME dans les 9 régions suivantes : Champagne Ardennes, Alsace, Franche-Comté, Basse-Normandie, Bourgogne, Auvergne, Languedoc-Roussillon, Ile de France et Nord.

La liste des chaufferies et leurs caractéristiques sont fournies dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Liste des chaufferies

Site	Puissance chaudière (MW)	Année de mise en service	Type de dépoussiérage	Type de combustible	Type de bâtiments chauffés
1	3,5	2000	électrofiltre	palettes	Hôpital
2	0,69	2006	multicyclone	Plaquettes forestières	Hôpital
3	2,5	2004	multicyclone	Plaquettes forestières	Collège + bâtiments municipaux
4	2,8	2006	Filtre à manches	Plaquettes forestières	Chauffage urbain
5	3,2	2000	électrofiltre	palettes (90%), plaquettes (10%)	Chauffage urbain + école + piscine
6	1,5	2007	Filtre à manches	Plaquettes forestières	Chauffage urbain
7	4 (1,5 + 2,5)*	2007	électrofiltre	PF+palettes+connexes	Chauffage urbain
8	1,2	2006	multicyclone	Bois déchiqueté+ écorces	bâtiments municipaux + hôpital
9	2,5	2005	multicyclone	Déchets bois calibrés (80%) + écorces (20%)	bâtiments municipaux + indépendants
10	2,5	2007	multicyclone	Plaquettes forestières	Chauffage urbain
11	2,4	2007	multicyclone	Plaquettes forestières	Chauffage urbain
12	2,5	2008	multicyclone	Plaquettes forestières +connexes+palettes	Chauffage urbain
13	2,1	2007	Filtre à manches	Plaquettes forestières +connex	Chauffage urbain
14	3,2	2008	Filtre à manches	Plaquettes forestières +connex	Chauffage urbain

* 2 chaufferies en fonctionnement le jour des mesures – 1 conduit commun pour les rejets atmosphériques.

L'étude est limitée aux chaufferies biomasse collective dont la puissance est inférieure à 4 MW. Les consommateurs sont des logements, des écoles, des bâtiments communaux, des piscines, mais également des hôpitaux. La puissance des chaudières biomasse étudiées varient entre 0,69 MW (site 2) et 3,5 MW (site 1) et sont pour une majorité très récente, la moitié d'entre elles ayant été mises en service en 2007. Les deux plus anciennes datent de 2000.

Les plaquettes forestières seules ou en mélange avec des connexes de scierie ou des palettes, sont le combustible généralement utilisé, pour plus de 70% des chaufferies. L'essence la plus représentée est le feuillu, seul ou en mélange avec du résineux.

En ce qui concerne le traitement des rejets atmosphériques, les systèmes de traitement par cyclone ou multicyclone sont les plus représentés (7 chaufferies), devant les filtres à manches (4 chaufferies) et les électrofiltres (3 chaufferies).

3. PARAMETRES MESURES ET METHODOLOGIE APPLIQUEE

3.1. PARAMETRES MESURES

3.1.1. Analyse du bois et des cendres

- PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) ;
- taux de cendres ;
- teneur en carbone dans les cendres.

3.1.2. Mesures des rejets atmosphériques

- débit (Nm³sec/h) ;
- température (°C) ;
- humidité (%) ;
- O₂ (%) ;
- CO₂ (%) ;
- CO (mg/Nm³sec) ;
- poussières (mg/Nm³sec) ;
- NO_x (mg NO₂/Nm³sec) ;
- SO₂ (mg/Nm³sec).

Pour chaque paramètre, trois essais ont été réalisés selon la méthodologie décrite ci-après.

Tous les résultats sont exprimés en mg/Nm³ sec corrigés de la teneur de référence en O₂, soit 11%. La conversion d'une concentration C_{n%} exprimée à n% d'O₂ à une concentration C_{11%} exprimée à 11% d'O₂ se fait en appliquant la formule suivante :

$$C_{11\%} = C_{n\%} \times (21 - 11) / (21 - n)$$

Avec : C_{11%} concentration exprimée à 11% d'O₂
C_{n%} concentration exprimée à n% d'O₂
n : % d'O₂ dans les fumées sèches

3.2. METHODOLOGIE

3.2.1. Echantillonnage du bois et des cendres

Les échantillons de bois sont prélevés selon le protocole suivant, tiré du groupe de travail n°3 du Comité Européen de Normalisation (CEN) 355 et présenté en figure ci-après. La réalisation de l'échantillon se décompose en 2 phases :

- la collecte de l'échantillon ;
- la réduction du volume de l'échantillon.

Les échantillons de cendres sont prélevés sous le foyer et dans le circuit d'épuration des fumées.

Détermination du nombre de prélèvements élémentaires

Classification des biocombustibles en fonction de l'hétérogénéité

- **Groupe 1** : bio combustible homogène avec granulométrie nominale maximale < 10 mm (sciures, copeaux)
- **Groupe 2** : Bio combustible homogène avec granulométrie nominale maximale > 10 mm (granulés, plaquettes)
- **Groupe 3** : Bio combustible hétérogène (écorces, broyat de résiduel forestier)

Le nombre minimal de prélèvements élémentaires à réaliser est égal à :

Pour le groupe 1 : $n=5+0,025 \cdot M_{lot}$

Pour le groupe 2 : $n=10+0,040 \cdot M_{lot}$

Pour le groupe 3 : $n=20+0,060 \cdot M_{lot}$

Avec M_{lot} =masse du lot en tonne

Volume des prélèvements élémentaires

Volume des prélèvements élémentaires

- $V_{min}=0,5$ litres lorsque la granulométrie nominale est ≤ 10 mm
- $V_{min}=0,05 \times d$ lorsque la granulométrie nominale est > 10 mm

Masse minimale à tester :

Ecorce (si elle n'a pas été broyée)	15 kg
Plaquettes	2 kg
Sciures	50 grammes

Méthodologie de constitution de l'échantillon à analyser

Le choix de l'outil dépend de la constitution du stock et doit être le plus représentatif de la marche de l'installation. Mélange, à l'aide d'une pelle, des différents prélèvements élémentaires entre eux en répétant l'opération une dizaine de fois avec étalement du mélange obtenu dans un rectangle dont l'épaisseur n'excède pas trois fois la granulométrie nominale, puis division en vingt parties égales (4x5) et prélèvement dans chacune des 20 parties (2 kg mini) puis conditionnement dans des bouteilles en verre de grande contenance à usage unique.

3.2.2. Mesures des rejets atmosphériques

Les paramètres suivis d'une étoile ont été mesurés sous accréditation COFRAC.

Débit gazeux (*)

Mesure effectuée au niveau du point de prélèvement au tube de Pitot double selon la norme ISO 10 780. La température est mesurée par un thermocouple K. La masse volumique est déterminée selon la norme ISO 10 780 (analyse O₂, CO₂ et humidité des gaz).

Vitesse des gaz

Elle est calculée à partir de la connaissance du débit gazeux et de la section de sortie.

Mesure de la température

Elle est mesurée lors du contrôle des émissions par un thermocouple K.

Concentration en Poussières (*)

Mesure effectuée selon la norme NFX 44.052 ou NF EN 13284-1 avec le dispositif adapté.

Monoxyde de Carbone (*)

Analyse en continu par analyseur de gaz automatique infra-rouge selon la norme NFX 43.012. ou NF EN 15058.

Gaz majeurs O₂(*) - CO₂

Analyse en continu par analyseur de gaz automatique

- O₂ : paramagnétique selon FDX 20.377 ou NF EN 14 789
- CO₂ : infra rouge selon X 43.300 ou

Résultats exprimés en % volumique sur gaz sec.

Oxydes d'azote (*)

Analyse en continu par analyseur de gaz automatique avec four de réduction NO₂ – NO (par chimiluminescence selon NFX 43.018) ou NF EN 14790.

Dioxyde de soufre (*)

Mesure effectuée selon la norme NF ISO 11632 et NF EN 14791 (prélèvement par barbotage et analyse par chromatographie ionique).



Photos 1 et 2 : Exemple de camionnette laboratoire et de baie d'analyseurs de gaz IRH Ingénieur Conseil

4. PLANNING DES INTERVENTIONS

Le tableau suivant récapitule le calendrier des interventions.

Tableau 2 : Planning des interventions

Site	Puissance chaudière (MW)	Date d'intervention
1	3,5	05/02/2009
2	0,69	02/02/2009
3	2,5	04/02/2009
4	2,8	05/02/2009
5	3,2	12/02/2009
6	1,5	13/02/2009
7	4 (1,5 + 2,5)	05/02/2009
8	1,2	24/02/2009
9	2,5	25/02/2009
10	2,5	16/02/2009
11	2,4	12/02/2009
12	2,5	17/03/2009
13	2,1	25/02/2009
14	3,2	18/03/2009

5. METHODOLOGIE DE CALCUL DES PERFORMANCES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

5.1. PERFORMANCES ENERGETIQUES

5.1.1. Détermination du rendement

Le calcul du rendement des chaudières est réalisé conformément au guide de l'expert réalisé au titre du décret n° 98-833 du 16 septembre 1998 (Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie).

Le calcul de rendement (R) est établi à partir des pertes par fumées (Pf), des pertes par les imbrûlés (Pi) et des pertes par rayonnement ou par convection (thermique) (Pr), selon la formule suivante :

$$R = 100 - P_f - P_i - P_r$$

Calcul des pertes par fumées (Pf)

$$P_f = K \times \frac{T_1 - T_2}{\alpha} \text{ en \%}$$

Avec :	T1	Température des fumées en °C
	T2	Température de l'air comburant en °C
	α	Teneur en CO ₂ des fumées en % vol
	K	Coefficient qui dépend du combustible

Pour le bois, K = 0,77 d'après « URE Bâtiment : Guide d'audit énergétique (1999) 7. Production de Chaleur ».

Calcul des pertes par les imbrûlés (Pi)

$$P_i = \frac{8133}{PCI} \times C \quad \text{avec} \quad C = C_e \times \frac{I}{100 - I}$$

Avec :	C	Teneur en carbone des déchets solides en % du poids du combustible
	C _E	Teneur en cendres du combustible brut en %
	I	Teneur moyenne en carbone des résidus solides en %
	PCI	Pouvoir calorifique Inférieure en KWh/kg

Calcul des pertes par rayonnement ou par convection (thermique) (Pr)

Date de construction	P _R
Jusqu'au 31.12.1984	2 %
Du 01.01.85 au 31.12.1994	1 %
Après le 01.01.1995	0,5 %

Le calcul des pertes par rayonnement a été réalisé en tenant compte du taux de charge de la chaufferie.

5.1.2. Détermination du taux de charge

Le taux de charge a été calculé à partir du relevé du compteur énergie sur la période de mesure.

$$\text{Taux de charge calculé (\%)} = (\text{Puissance instantanée} / \text{Puissance nominale}) \times 100$$

Où : Puissance instantanée (MW) = (Relevés compteur en MWh) / (période en heures)

5.2. PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES – DETERMINATION DES FACTEURS D'EMISSION

Pour chaque chaufferie, le facteur d'émission (FE) est déterminé pour chaque polluant (poussières, CO, NO_x, SO₂) à partir du calcul suivant :

$$FE = C_x \times \frac{Q \times t}{Conso \times PCI}$$

avec C_x : moyenne des 3 concentrations du paramètre x
Q : débit gazeux
t : durée de mesure en heures du paramètre x
Conso : consommation de bois sur la période de mesure

6. RESULTATS ET RECOMMANDATIONS

6.1. RESULTATS ENERGETIQUES

Le tableau suivant présente les résultats des performances énergétiques des installations avec les valeurs de rendement et de taux de charge.

Tableau 3 : Résultats énergétiques

Site	Pertes par fumées (Pf) (%)	Pertes par imbrûlés (Pi) (%)	Pertes par rayonnement (Pr) (%)	Rendement (%)	Taux de charge (%)
1	9,47	3,24	0,80	86	63
2	14,8	0,09	0,64	84	78
3	9,99	4,46	0,56	85	90
4	10,19	0,94	0,58	88	86
5	10,87	2,94	0,59	86	84
6	6,28	1,03	0,79	92	63
7	9,91	1,7	0,52	88	97
8	21,7	0,24	1,09	77	46
9	10,03	0,05	1,10	89	46
10	8,96	1,07	1,04	90	48
11	19,32	0,52	0,68	79	73
12	11,18	0,3	0,85	88	59
13	11,3	26,1	0,79	62	64
14	16,56	3,30	0,70	79	71

64% des sites ont un rendement supérieur ou égal à 85 %. Mis à part le site 13, les rendements rencontrés se situent entre 75 et 90% soit la fourchette classique du rendement d'une chaudière bois. Le faible rendement du site 13 est lié à des pertes par imbrûlés importantes liées à une teneur en carbone très élevée dans les cendres mesurée pendant la campagne et révélant une mauvaise combustion. Plus généralement, le rendement dépend de la technologie utilisée, de l'humidité du combustible et du bon entretien de l'installation. Un combustible sec offrira un rendement élevé et une chaudière encrassée connaîtra un rendement limité.

Les taux de charge calculés sont compris entre 46 % (site 8) et 97 % (site 7). Un taux de charge supérieur à 80% est généralement conseillé pour une installation bien conçue. Ce taux de charge a été calculé sur la période de mesures des rejets atmosphériques. A la vue de ces résultats, moins d'une chaudière sur trois dispose d'un taux de charge supérieur à 80%. Les explications possibles à ces faibles taux de charge mesurés pendant la campagne de mesures sont principalement les suivantes :

- un surdimensionnement possible des installations par rapport à la demande de chaleur ;
- le type de bâtiments chauffés (faible intermittence de certains bâtiments tels que les hôpitaux ou les piscines) ;
- le climat.

6.2. RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX

6.2.1. Résultats des analyses du combustible

Les résultats des analyses du combustible, PCI (pouvoir calorifique inférieur) et taux de cendres, sont reportés dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Résultats des analyses du combustible

Site	PCI (kWh/kg)	Taux de cendres (%)	Type de combustible
1	2,43	0,8	Palettes
2	2,23	0,8	Plaquettes forestières
3	2,71	0,7	Plaquettes forestières
4	2,8	0,6	Plaquettes forestières
5	3,14	0,9	Palettes (90%), plaquettes (10%)
6	2,32	1,1	Plaquettes forestières
7	2,67	0,9	Plaquettes forestières + palettes + connexes
8	2,49	2,4	Bois déchiqueté + écorces
9	3,24	0,6	Déchets bois calibrés (80%) + écorces (20%)
10	2,72	11,9	Plaquettes forestières
11	3,13	1,8	Plaquettes forestières
12	3,3	3,9	Plaquettes Forestières + connexes + palettes
13	3,67	3,6	Plaquettes Forestières + connexes
14	3,0	3,3	Plaquettes Forestières + connexes

Les valeurs du PCI sont comprises entre 2,23 kWh/kg (site 2) et 3,67 kWh/kg (site 13). Les valeurs de PCI du bois varient généralement entre 2 kWh/kg (bois humide) et 5 kWh/kg (bois sec mais dépendent également de l'essence (feuillus, résineux) et du type de combustible :

- plaquettes forestière : 2,2 à 3,9 kWh/kg (humidité comprise entre 20 et 50%) ;
- Broyats de DIB : 3,3 à 3,9 kWh/kg (humidité comprise entre 20 et 30%) ;
- Granulés: 4,6 kWh/kg (humidité de 8%) ;
- Bûches: 1,4 à 2,1 kWh/kg (humidité de 15 à 40 %).

Les taux de cendres varient sur les installations étudiées entre 0,6% (sites 4 et 9) et 3,9% (site 12), à l'exception du site 10 (taux de cendres égal à 11,9%). Le taux de cendres dépend de la nature du combustible. A titre d'exemple, les plaquettes forestières ont un taux de cendres inférieur à 3 %, les rémanents forestiers autour de 2 %, les broyats de DIB autour de 0,75 % et les granulés autour de 0,3 %. Le taux de cendres du site 10 est très élevé (11,9 %) et il s'agit dans ce cas de cendres exogènes produites non pas par les matières minérales constitutives du bois mais par des impuretés acheminées avec le bois (terre, cailloux, graviers, métal...).

6.2.2. Résultats des analyses des cendres

Les résultats des analyses des cendres sont reportés dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Résultats des analyses des cendres

Site	Teneur en carbone (%)
1	10,8
2	0,3
3	17,5
4	5,1
5	11,2
6	2,6
7	5,8
8	0,3
9	0,3
10	0,3
11	1,1
12	0,3
13	24,7
14	3,5

La teneur en carbone dans les cendres varie largement de 0,3% (sites 2, 8, 9, 10, 12) à 24,7 %, avec notamment trois valeurs très élevées pour les sites 3, 5 et 13. Ces résultats montrent une combustion incomplète entraînant des pertes par imbrûlés importantes qui dégradent les rendements de combustion.

6.2.3. Résultats des analyses des rejets atmosphériques

Pour le débit gazeux, l'oxygène (O₂) et le dioxyde de carbone (CO₂), les résultats reportés dans le tableau suivant correspondent à la moyenne des trois essais réalisés. Pour le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les poussières et le dioxyde soufre (SO₂), les résultats du tableau correspondent à la moyenne des trois essais après correction à 11 % d'O₂.

Les différents systèmes de traitement des poussières installés sont rappelés dans le tableau suivant pour chaque chaufferie :

- C : Cyclone ;
- MC : Multicyclone ;
- EF : Electrofiltre ;
- FAM : Filtre à manches.

Tableau 6 : Résultats des rejets atmosphériques

Site	Système de traitement	Débit gazeux (Nm ³ sec/h)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO corrigé (mg/Nm ³ sec)	NO _x corrigé (mg/Nm ³ sec)	Poussières corrigé (mg/Nm ³ sec)	SO ₂ corrigé (mg/Nm ³ sec)
1	EF	4 523	7,3	13,6	723	136	11,7	3,7
2	C	1 132	12,7	8,0	482	147	180	0,4
3	C	4 433	7,8	12,7	165	205	132	< 0,2
4	C+FAM	4 393	11,2	9,5	312	157	113	< 0,3
5	EF	4 737	8,4	11,9	41	330	12,8	0,8
6	C+FAM	1 497	9,1	11,7	1 029	149	4,9	0,7
7	C+EF	7 973	8,3	11,5	ND	ND	3,2	< 10,2
8	C	1 578	16,4	4,1	2 131	234	583	21
9	MC	3 447	11,0	9,4	472	132	78,4	2,4
10	MC	4000 (*)	9,7	10,3	41	225	374	208
11	C	3 770	14,5	5,9	669	180	110	< 15,2
12	MC	2 870	13,6	7,3	46	176	38,2	3,8
13	C+FAM	2 178	11,1	9,4	475	133	35	103
14	MC+FAM	4 673	14,8	5,7	< 21	228	6,1	190

ND : non déterminé. Problème technique lors de l'intervention

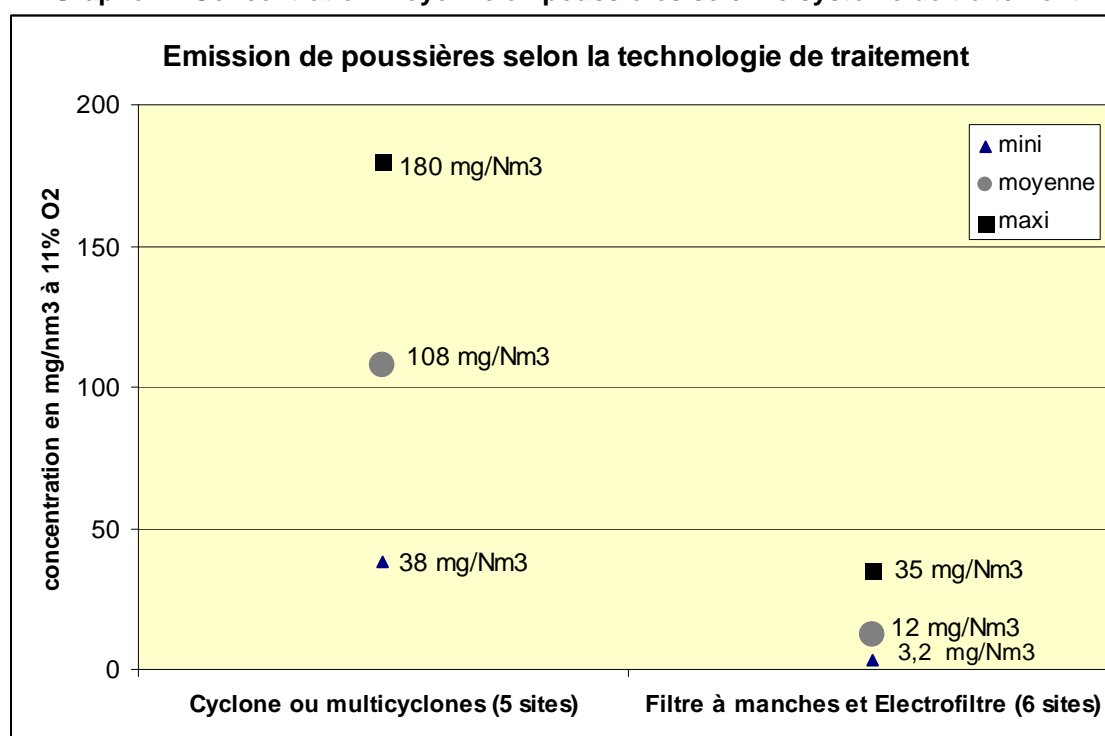
(*) les résultats concernant le site 10 sont issus d'un seul essai concluant qui a été confirmé par les données de dimensionnement fournies par le constructeur

Pour les poussières, l'efficacité du dépoussiérage varie selon les systèmes de traitement mis en place. Les sites disposant de système de traitement par cyclone ou multicyclones sont les moins efficaces. Les systèmes de traitement par électrofiltre et filtres à manches sont les plus performants. Electrofiltres et filtres à manches atteignent des performances comparables. Les résultats obtenus sont dans l'ensemble proches des concentrations habituellement garanties ou conseillées pour chaque système de traitement.

Plusieurs cas spécifiques ont cependant été rencontrés pendant la campagne de mesures. Les concentrations en poussières du site 4 (113 mg/Nm³) sont très élevées par rapport au système de traitement (cyclone et filtre à manches). Après enquête auprès de l'exploitant, il s'est avéré que certaines manches étaient percées lors de notre intervention. Les teneurs en poussières des sites 8 (583 mg/Nm³) et 10 (374 mg/Nm³) équipés de cyclones et multicyclones sont anormalement élevées. Une mauvaise combustion, un mauvais entretien et éventuellement un dysfonctionnement du cyclone peuvent expliquer ces concentrations. Les rejets en poussières du site 12 (38,2 mg/Nm³) sont, à l'inverse, faibles par rapport au traitement par cyclone. Les bonnes conditions de combustion révélées par les faibles émissions des autres polluants, les critères de bonnes performances énergétiques (rendement et taux de charge) et éventuellement une granulométrie de particules adaptées au système de traitement (autour de 20 µm) contribuent à cette faible émission en poussières.

Le graphe suivant présente les concentrations en poussières selon le système de dépoussiérage et permet donc d'évaluer l'efficacité des différents systèmes de traitement. Les résultats anormaux des sites 4, 8 et 10 mentionnés précédemment ont été écartés.

Graphe 1 : Concentration moyenne en poussières selon le système de traitement



On constate que :

- les concentrations observées en sortie de cyclone ou multicyclones sont très dispersées, avec une moyenne des résultats obtenus sur 5 sites égale à 108 mg/Nm³ et une variation entre 38 et 180 mg/Nm³. Notons que ces résultats ne tiennent pas compte de résultats des sites 8 et 10 dont les teneurs anormales ont été écartées ;
- les concentrations observées en sortie d'électrofiltre et de filtre à manches sont toujours inférieures à la valeur de 50 mg/m³ avec une moyenne des résultats obtenus sur 6 sites relativement basse à 12 mg/Nm³.

La réglementation relative aux valeurs limites de rejets en poussières sur ce type d'installation est rappelée dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Réglementation relative aux rejets de poussières (Arrêté du 25 juillet 1997)

Réglementation des poussières (concentration corrigée à 11% d'O ₂)
150 mg/Nm ³ sec pour une chaufferie dont la puissance totale est comprise entre 2 et 4 MW
100 mg/Nm ³ sec pour une chaufferie dont la puissance totale est comprise entre 4 et 20 MW

Excepté les sites 2 et 9 ($P_{\text{totale}} = 2,5$ MW) et 8 ($P_{\text{totale}} = 1,8$ MW), les 11 chaufferies étudiées ont une puissance totale² supérieure à 4 MW et doivent donc respecter une valeur limite d'émission de poussières de 100 mg/Nm³. Les sites 3 (132 mg/Nm³), 4 (113 mg/Nm³), 10 (374 mg/Nm³), 11 (110 mg/Nm³) ne respectent pas cette valeur réglementaire. Mis à part le site 4 où le filtre à manches était défectueux et le site 10 où un fonctionnement anormal de l'installation a été constaté, les deux autres sites n°3 et 11 présentent donc des dépassements des valeurs réglementaires de 32 et 10 mg/Nm³ respectivement. Ce sont chacune des installations disposant d'un traitement des rejets gazeux par cyclone ou multicyclone.

Le site 2 (180 mg/Nm³), équipé également d'un cyclone, montre des résultats en poussières au dessus de la valeur réglementaire fixée à 150 mg/m³ pour cette gamme de puissance tandis que le site 9 (78,4 mg/Nm³) présente des valeurs largement en dessous de l'exigence réglementaire.

Enfin, il n'existe à ce jour pas de valeur réglementaire concernant le site 8 dont la puissance totale est de 1,8 MW et pour lequel un fonctionnement anormal de l'installation a été constaté.

Les performances sont également comparées aux exigences du système d'aide de l'ADEME. Pour rappel, ces exigences sont les suivantes :

- Conformité à la classe 3 de la norme EN 303-5 lorsqu'elle s'applique ou la présence d'un système de dépoussiérage de type cyclonique ;
- Pour les chaufferies de puissance comprise entre 300 et 2 000 kW, la mise en place d'un système de dépoussiérage de type cyclonique permettant de respecter une $VLE_{\text{poussières}} = 150 \text{ mg/m}^3$ à 11% O₂ ;
- Pour les chaufferies de puissance comprise entre 2 000 et 4 000 kW, la mise en place d'un système de dépoussiérage de type cyclonique permettant de respecter une $VLE_{\text{poussières}} = 100 \text{ mg/m}^3$ à 11% O₂ dans les conditions optimales d'opération ;
- Pour les chaufferies de puissance comprise entre 4 000 et 20 000 kW, une $VLE_{\text{poussières}} = 100 \text{ mg/m}^3$ à 11% O₂.

L'exigence de l'ADEME pour les chaufferies de puissance comprise entre 4 000 et 20 000 kW correspond à l'exigence réglementaire d'une valeur limite d'émission égale à 100 mg/Nm³ et concerne 11 sites sur 14. L'exigence de l'ADEME est respectée pour 7 sites sur 11. Parmi les 4 sites non-conformes, deux sites (n°4 et 10) présentent un fonctionnement anormal le jour de la campagne de mesures et les deux autres (sites n°3 et 11), qui sont équipés d'un système de traitement des fumées par cyclone ou multicyclone, présentent des dépassements de 32 et 10 mg/Nm³ respectivement.

Les 2 sites qui ont des puissances comprises entre 2 000 et 4 000 kW (sites n°2 et 9) doivent respecter l'exigence de l'ADEME d'une valeur limite d'émission de poussières égale à 100 mg/Nm³ dans les conditions optimales d'opération. Ils sont équipés d'un système de traitement des poussières de type cyclonique. Cette exigence est respectée pour site 9 (78,4 mg/Nm³) et n'est pas respectée pour le site 2 (180 mg/Nm³).

² puissance de la chaudière bois + puissance de la chaudière d'appoint

Enfin, le site 8 (583 mg/Nm^3) dont la puissance totale est de 1,8 MW et pour lequel un fonctionnement anormal de l'installation a été constaté ne respecte pas l'exigence de l'ADEME d'une valeur limite d'émission de poussières égale à 150 mg/Nm^3 pour cette puissance.

Pour le monoxyde de carbone (CO), les fortes valeurs atteintes pour les chaufferies 1, 6, 8, 11 et dans une moindre mesure pour les sites 2 et 13 s'expliquent par des mauvaises conditions d'oxydation liées notamment à des faibles taux de charge ou de mauvais réglages des paramètres de combustion. La faible charge implique un fonctionnement de l'installation avec des températures de combustion plus faibles entraînant plus d'émissions polluantes. Dans le cas des sites 8 et 11, les teneurs en CO sont élevées malgré des concentrations en oxygène importantes. Ce phénomène contradictoire dénote d'un manque d'homogénéité dans le mélange combustible/comburant. Des nouveaux réglages sont à prévoir par l'exploitant ou le constructeur afin d'obtenir une bonne répartition et un juste dosage de l'apport d'air (primaire et secondaire). Plus généralement, le bon dimensionnement de l'installation, la qualité du combustible, notamment l'humidité, et l'exploitation de l'installation sont des critères de performance d'une bonne combustion.

Les résultats des concentrations en oxydes d'azote (NO_x) sont dispersés et compris entre 132 et 330 mg/Nm^3 à 11% d'O₂ ce qui correspond aux valeurs habituellement observées sur ce type d'installation.

Les concentrations en dioxyde de soufre (SO₂) sont dans l'ensemble très faibles et souvent inférieures au seuil de quantification. 8 sites sur 14 ont des émissions de SO₂ inférieures ou égales à 5 mg/Nm^3 à 11% d'O₂ et 11 sites sur 14 ont des émissions de SO₂ inférieures ou égales à 21 mg/Nm^3 à 11% d'O₂. Des teneurs anormalement élevées ont été mesurées sur les sites 10, 13 et 14. Ce phénomène est certainement lié à une mauvaise qualité de combustible, dont l'origine ne peut pas être à 100% d'origine forestière. L'exploitant du site 10 a déclaré être mécontent de son approvisionnement et les sites 13 et 14 ont chacun les mêmes fournisseurs sur la même région.

6.2.4. Résultats des calculs de facteur d'émission

Les facteurs d'émission (méthode de calcul présentée au § 3.2) ont été déterminés pour les poussières, le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x) et le dioxyde de soufre (SO₂).

Tableau 8 : Résultats des facteurs d'émission

Site	Facteur d'émission poussières (g/GJ)	Facteur d'émission CO (g/GJ)	Facteur d'émission NO _x (g/GJ)	Facteur d'émission SO ₂ (g/GJ)
1	3,6	224	42	1,1
2	100	268	82	0,2
3	78	98	122	< 0,1
4	47	129	65	< 0,1
5	3,9	13	102	0,2
6	3,1	646	84	0,4
7	1,4	ND	ND	< 4,2
8	739	2 701	297	26
9	68	408	114	2,1
10	184	20	110	102
11	31	187	50	< 4,2
12	18	22	84	1,8
13	5,8	78	22	17
14	1,8	< 6	66	55

Le paramètre principal influençant le facteur d'émission est la concentration en polluant mesuré. Les facteurs d'émissions calculés sont donc inscrits dans la logique des résultats du tableau 5 concernant les résultats des rejets atmosphériques.

Ces résultats sont comparés aux facteurs d'émission du CITEPA (2003³) concernant les installations de combustion de puissance inférieure à 50 MW du secteur industriel ou du chauffage collectif. Ces facteurs, qui sont établis à partir de revues bibliographiques et de résultats de campagnes de mesures, sont utilisés pour réaliser les inventaires nationaux annuels des émissions de polluants atmosphériques.

Tableau 9 : Facteurs d'émission du CITEPA pour les installations de combustion de puissance inférieure à 50 MW du secteur industriel ou du chauffage collectif (2003)

Polluant	Facteur d'émission (g/GJ)
poussières	100
monoxyde de carbone (CO)	250
oxydes d'azote (NO _x)	200
dioxyde de soufre (SO ₂)	20

Pour les poussières, au vu des résultats de la campagne de mesures, il est important de différencier les facteurs d'émission selon la technologie de traitement. En écartant les sites 4, 8 et 10 pour les mêmes raisons que précédemment, on obtient les facteurs d'émission suivants :

- **59 g/GJ pour les installations équipées d'un cyclone ou d'un multicyclone (5 sites)**
- **3 g/GJ pour les installations équipées d'un filtre à manches ou électrofiltre (6 sites)**

Ces facteurs sont bien inférieurs à la valeur unique du CITEPA de 100 g/GJ.

En ce qui concerne le monoxyde de carbone (CO), 9 sites ont des facteurs d'émission inférieurs à la valeur du CITEPA (250 g/GJ). Seuls les sites 2, 6, 8 et 9 présentent des facteurs d'émission au dessus des valeurs du CITEPA. En écartant la valeur anormale obtenue sur le site 8, **la moyenne des facteurs d'émission de CO est égale à 175 g/GJ.**

Pour les oxydes d'azote, à l'exception du site 8 en dysfonctionnement le jour de la campagne de mesures, tous les facteurs d'émission sont inférieurs à la valeur du CITEPA (200 g/GJ) et **la moyenne des facteurs d'émission de NO_x est égale à 95 g/GJ.**

Le facteur d'émission moyen de dioxyde de soufre (SO₂) issue de l'étude est égal à 3,7 g/GJ en écartant les sites 10, 13 et 14 qui possèdent des émissions de soufre anormalement élevée du fait d'un combustible inapproprié. La valeur issue de l'étude montre la surestimation par le CITEPA des émissions de SO₂ issues de la combustion de la biomasse forestière en chaufferie collective ou industrielle.

6.3. RECOMMANDATIONS

Si la majorité des 14 chaufferies présente des performances énergétiques et environnementales satisfaisantes, en particulier au niveau des rejets de poussières, un certain nombre de situations particulières et de dysfonctionnements ont été rencontrés qui conduisent à des rejets significatifs de polluants atmosphériques, notamment en monoxyde de carbone (CO), poussières et dioxyde de soufre (SO₂).

Pour les chaufferies de faible puissance, on note aussi que les paramètres de fonctionnement de l'installation sont généralement peu suivis et que les changements de réglages sont effectués par le constructeur, ce qui peut engendrer des délais d'intervention importants.

³ Source : CITEPA, 2003, Evaluation des émissions de polluants liées à la combustion du bois en France

Des formations au personnel exploitant sont recommandées et permettraient de régler en interne les problèmes de combustion et de combler ainsi ce manque de réactivité. La plupart des chaufferies étudiées ayant une exploitation externalisée (86%), une meilleure formation des agents, en particulier sur les réglages de combustion, devrait être mise en place et faire partie intégrante du contrat d'exploitation.

Cette étude met en évidence que les principaux paramètres qui influencent les émissions polluantes sont :

- les caractéristiques du combustible (origine, taux d'humidité, granulométrie, taux de cendres...);
- les caractéristiques techniques de l'appareil de combustion : nature du foyer (distribution de l'air, technologie de combustion...) et qualité de fonctionnement (charge de bois, temps de séjour, gestion de l'air...);
- l'entretien de l'installation;
- la technologie de traitement des rejets gazeux.

Une grande maîtrise et suivi de ces paramètres sont nécessaires pour garantir des émissions réduites de polluants atmosphériques.

Un suivi au moins annuel des émissions est également recommandé.

7. CONCLUSION

Dans l'ensemble, les 14 chaufferies biomasse étudiées présentent de bonnes performances énergétiques et environnementales, avec en particulier de faibles émissions de particules.

Les rendements des installations sont compris entre 75 et 90 %, excepté pour un site, et se situent dans le domaine des valeurs habituellement observées.

Les taux de charge sont en revanche très variables d'une chaufferie à l'autre. Les valeurs calculées sont comprises entre 46% et 97%. A la vue de ces résultats, environ deux chaudières sur trois disposent le jour de la campagne de mesures d'un taux de charge inférieur à 80%, qui est généralement conseillé. Dans certains cas, la principale raison est un surdimensionnement de l'installation par rapport à la demande.

Cette campagne de mesures met aussi en évidence plusieurs dysfonctionnements liés à la nature du combustible et/ou à des conditions anormales de combustion qui conduisent à des rejets significatifs de monoxyde de carbone (CO), de poussières et de dioxyde de soufre (SO₂).

Au regard des performances des systèmes de traitement de poussières, les concentrations observées en sortie de **cyclone ou multicyclones** sont très dispersées, avec une moyenne des résultats obtenus sur 5 sites égale à 108 mg/Nm³ et une variation entre 38 et 180 mg/Nm³. A l'inverse, les concentrations observées en sortie **de filtre à manches et d'électrofiltre** sont toujours inférieures à la valeur de 50 mg/m³ avec une moyenne des résultats obtenus sur 6 sites relativement basse à 12 mg/Nm³. Les filtres à manches et les électrofiltres conduisent à des niveaux d'émission de poussières comparables.

Au regard de la réglementation actuelle (arrêté du 25 juillet 1997) et des exigences de l'ADEME concernant les émissions de poussières, les installations respectent dans l'ensemble les valeurs limites, à savoir 100 mg/Nm³ pour les sites dont la puissance totale est comprise entre 4 et 20 MW. Les non conformités concernent soit des dépassements de 10 à 30 mg/Nm³ (2 sites sur 11 concernés), soit des sites présentant un dysfonctionnement le jour de la campagne (2 sites sur 11 concernés). Pour les 2 sites étudiés de puissance comprise entre 2 000 et 4 000 kW et équipé chacun d'un système de traitement de type cyclonique, un site respecte la valeur limite réglementaire (150 mg/Nm³) et l'exigence de l'ADEME (100 mg/Nm³ dans les conditions optimales d'opération) ; le second site, qui ne la respecte pas, a une concentration de poussières de 180 mg/Nm³. Enfin, le dernier site étudié, de puissance totale égale à 1,8 MW et donc non soumis à la réglementation, ne respecte pas l'exigence de l'ADEME d'une valeur limite d'émission de poussières égale à 150 mg/Nm³ pour cette puissance en raison d'un dysfonctionnement le jour de la campagne.

Pour le monoxyde de carbone (CO), de fortes concentrations ont été mesurées pour 6 installations. Ces teneurs s'expliquent par des mauvaises conditions d'oxydation liées notamment à des faibles taux de charge ou de mauvais réglages des paramètres de combustion. Des nouveaux réglages sont à prévoir par l'exploitant ou le constructeur afin d'obtenir une bonne répartition et un juste dosage de l'apport d'air (primaire et secondaire).

Les résultats des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) sont dispersées et comprises entre 132 et 330 mg/Nm³ à 11% d'O₂ ce qui correspond aux valeurs habituellement observées sur ce type d'installation.

Les concentrations en dioxyde de soufre (SO₂) sont souvent inférieures au seuil de quantification et dans l'ensemble très faibles, avec plus de la moitié des sites qui présente des émissions inférieures à 5 mg/Nm³ à 11% d'O₂. Néanmoins, des concentrations anormalement élevées ont été mesurées au niveau de trois sites et révèlent un approvisionnement en combustible d'origine non forestière inapproprié.

L'étude permet de proposer un facteur d'émission de poussières d'une part pour les installations équipées d'un système de traitement de type cyclone et multicyclone (60 g/GJ) et d'autre part pour les installations équipées de filtres à manches ou électrofiltre (3 g/GJ). Les autres facteurs d'émissions moyens issus de l'étude sont 175 g/GJ pour le monoxyde de

carbone (CO), 95 g/GJ pour les oxydes d'azote (NO_x) et 4 g/GJ pour le dioxyde de soufre (SO_x). Ces valeurs sont systématiquement inférieures aux valeurs utilisées par le CITEPA pour la réalisation des inventaires annuels nationaux des émissions atmosphériques des installations de combustion de puissance inférieure à 50 MW du secteur industriel ou du chauffage collectif, à savoir 100 g/GJ pour les poussières, 250 g/GJ pour le CO, 200 g/GJ pour les NO_x et 20 g/GJ pour les SO_x.

L'ADEME recommande le recours à des systèmes performants de traitement des poussières ainsi que la plus grande vigilance dans la conception et l'exploitation des installations par du personnel qualité et formé.