

Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse

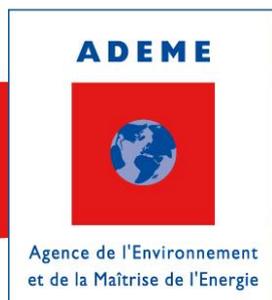
Rapport public

Août 2014

Etude réalisée pour l'ADEME par :
LECES : Philippe LE LOUER - Romain LECLERCQ - Alexandre WANIN
INDDIGO : Marjolaine FORCE - Gaëtan REMOND
Micropolluants Technologie : Adam HACHIMI

Contrat n° 1301C0085

Coordination technique :
Simon THOUIN - Florence PROHARAM - Marina BOUCHER
Département Bioressources
Direction Production et Energie Durables
ADEME Angers



RAPPORT FINAL

Remerciements :

Cette étude a été réalisée avec l'aide du comité de pilotage composé de :

Marina BOUCHER
Florence PROHARAM
Simon THOUIN

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.

Sommaire

1. - GENERALITES	12
1.1. - CONTEXTE DU PROJET	12
1.2. - PRESENTATION DU GROUPEMENT AYANT REALISE D'ETUDE	12
1.2.1. - Présentation de LECES	12
1.2.2. - Présentation de INDDIGO.....	13
1.2.3. - Présentation de MicroPolluants Technologie SA.....	13
1.3. - OBJECTIF DE L'EXPERTISE ET APPROCHE DE LA PROBLEMATIQUE	13
2. - PRESENTATION DES CHAUFFERIES.....	14
3. - PRESENTATION DES MESURES REALISEES	15
3.1. - BILANS ENERGETIQUES.....	15
3.1.1. - Bilans énergétiques instantanés	15
3.1.2. - Bilans sur la saison de chauffe	15
3.2. - CARACTERISATION DES COMBUSTIBLES.....	15
3.3. - CARACTERISATION DES CENDRES.....	16
3.4. - CARACTERISATION DES EMISSIONS POLLUANTES	16
4. - EXPLOITATION DES RESULTATS	17
4.1. - RAPPEL REGLEMENTAIRE.....	17
4.2. - RESULTATS ENERGETIQUES	17
4.2.1. - Bilans énergétiques instantanés	17
4.2.2. - Bilans sur la saison de chauffe	19
4.3. - RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX.....	21
4.3.1. - Caractéristiques des combustibles	21
4.3.2. - Caractéristiques des cendres.....	24
4.3.3. - Rejets atmosphériques	31
4.3.4. - Relations entre les émissions et la marche des installations.....	38
4.4. - SYNTHESE DES EVALUATIONS PAR CHAUFFERIE	39
4.5. - RECOMMANDATION PAR CHAUFFERIE	40
5. - BILAN NATIONAL	41
5.1. - COMPARAISON AUX DONNEES DISPONIBLES SUR LES EMISSIONS.....	41
5.2. - EVALUATION DES RATIOS SPECIFIQUES PAR CHAUDIERE	43
6. - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	45

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des chaufferies expertisées	14
Tableau 2 : Bilans énergétiques instantanés.....	17
Tableau 3 : Analyse des combustibles (métaux en mg/kg MS)	21
Tableau 4 : Analyse des combustibles (autres composés)	22
Tableau 5 : Combustibles – Comparaison avec des valeurs antérieures	23
Tableau 6 : Répartition massique des cendres par chaufferie	24
Tableau 7 : Cendres sous foyer : analyse des métaux	25
Tableau 8 : Cendres sous foyer : analyse des éléments organiques	25
Tableau 9 : Valeurs fertilisantes des cendres sous foyer	26
Tableau 10 : Cendres volantes : analyse des métaux en mg/kg MS	27
Tableau 11 : Cendres volantes : analyse des éléments organiques et humidité	27
Tableau 12 : Radioactivité des cendres	29
Tableau 13 : Comparaison de la radioactivité des cendres avec l'étude de 2007	29
Tableau 14 : Emissions de particules ramenées à 6 % O ₂	31
Tableau 15 : Rejets de particules par type de filtration	33
Tableau 16 : Emissions de métaux ramenées à 6 % O ₂	34
Tableau 17 : Rejets de métaux par type d'épuration.....	34
Tableau 18 : Emissions de gaz majeurs et aérosols acides ramenées à 6 % O ₂	35
Tableau 19 : Emissions de composés organiques ramenés à 6 % O ₂	37
Tableau 20 : Contrôles à réaliser en rubrique 2910	40
Tableau 21 : Comparaison avec les campagnes ADEME précédentes	41
Tableau 22 : Evolution des émissions de poussières par type de filtration depuis 2003	42
Tableau 23 : Facteurs d'émission spécifique par chaufferie	43
Tableau 24 : Facteurs d'émission spécifique par type d'épuration	44
Tableau 25 : Comparatif de facteurs d'émission depuis 2003	44
Tableau 26 : Normes de prélèvement	47
Tableau 27 : Protocoles de prélèvement et limites de quantification	49
Tableau 28 : Durées minimales de prélèvement.....	50
Tableau 29 : Protocoles d'échantillonnage des combustibles	51
Tableau 30 : Limites de quantification analytique des combustibles	52
Tableau 31 : Collecte des cendres par chaudière	53
Tableau 32 : Analyse des cendres	54

Liste des figures

Figure 1 : rendement et taux de charge instantané.....	18
Figure 2 : Rendement annuel des chaudières	19
Figure 3 : Rendement annuel en fonction de la puissance de la chaudière	19
Figure 4 : Rendement annuel et taux de couverture bois	20
Figure 5 : Rendement annuel et taux de charge moyen annuel	20
Figure 6 : Analyse moyenne des combustibles avec les seuils des combustibles b(v) de l'arrêté PG Enregistrement	22
Figure 7 : Analyse des cendres par rapport aux seuils des arrêtés permettant l'épandage	26
Figure 8 : Analyse des cendres par rapport aux seuils de l'arrêté PG Enregistrement	28
Figure 9 : Evolution des niveaux réglementaires de rejets de poussières	31
Figure 10 : Emissions de poussières.....	32
Figure 11 : Performances de filtration en fonction de la taille des particules	33
Figure 12 : Evolution des niveaux réglementaires des rejets de NOx	36
Figure 13 : Emissions de NOx.....	36
Figure 14 : Emissions de PCDD/F.....	38
Figure 15 : Evolution des rejets de poussières, CO, COVNM, NOx, SO ₂ depuis 2003 (mg/m ³ à 6% O ₂)....	41

Liste des annexes

Annexe 1 : Protocoles de mesures
Annexe 2 : Méthode de calcul des bilans énergétiques
Annexe 3 : Synthèse des évaluations et recommandations par chaufferie

Glossaire

As : arsenic
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
B : bore
BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière
Cd : cadmium
CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
CaO : oxyde de calcium
CET : Centre d'Enfouissement Technique
Co : cobalt
CO : Monoxyde de carbone
CO₂ : dioxyde de carbone
COV : Composés Organiques Volatils
COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
Cr : chrome
Cu : cuivre
Groupe I : somme des métaux Cd+Hg+Tl
Groupe II : somme des métaux As+Se+Te
Groupe III : Pb
Groupe IV : Somme des métaux V+Cr+Mn+Co+Cu+Ni+Zn+Sn+Sb
HAP : hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HCB : heachlorobenzène
HCl : acide chlorhydrique
HF : acide fluorhydrique
Hg : mercure
H₂O : humidité
ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
K₂O : dioxyde de potassium
I-TEQ : Facteur d'équivalent toxique pour les PCDD/F selon le référentiel NATO/CCMS
MB : matière brute
MgO : oxyde de magnésium
Mn : manganèse
MS : matière sèche
Na₂O : oxyde de sodium
Ni : nickel
NO₂ : Dioxyde d'azote
NO_x : oxydes d'azote
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
OMS-TEQ : Facteur d'équivalent toxique pour les PCDD/F et les PCB selon le référentiel OMS
P₂O₅ : phosphore
Pb : plomb
PCB : polychlorobiphényles
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PCDD/F : Polychlorodibenzo-p-dioxines / Polychlorodibenzo – furanes
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PCP : pentachlorophénol
PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur
PM1 : particules de diamètre aéraulique inférieur à 1 µm
PM2.5 : particules de diamètre aéraulique inférieur à 2,5 µm
PM10 : particules de diamètre aéraulique inférieur à 10 µm
REFIOM : Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères
US-EPA : United States Environmental Protection Agency
S : soufre
Sb : antimoine
Se : sélénium
Sn : étain
SO₂ : Dioxyde de soufre
Te : Tellure
Tl : thallium
V : vanadium
Zn : zinc

Synthèse

La présente étude a concerné la réalisation d'expertises énergétiques et de mesures de polluants sur 10 installations biomasse de puissance comprise entre 360 kW et 15MW. Les chaudières étaient récentes (démarrées de 2008 à 2013). L'évaluation concerne les compartiments suivants : bilans énergétiques, émissions atmosphériques, combustibles et cendres.

Cette étude complète les investigations réalisées par l'ADEME entre 2003 et 2009.

Elle met en évidence que le respect des bonnes pratiques en termes de conception, d'exploitation, et de suivi de la qualité du combustible, associées à des traitements de fumées performants, permet d'atteindre de très bonnes performances énergétiques et environnementales.

Bilans énergétiques

Les évaluations énergétiques réalisées montrent que globalement les installations sont bien dimensionnées. Les rendements observés s'approchent des 90% et démontre la bonne maîtrise de la combustion.

Sur quelques installations, souvent de plus petite puissance (< 2MWth), le surdimensionnement et donc le fonctionnement à charge réduite peuvent conduire à de mauvaises conditions de combustion. Par rapport aux campagnes précédentes (2007 et 2009), on relève une amélioration notable de l'instrumentation avec en particulier un meilleur suivi des consommations énergétiques.

Combustibles

Les analyses réalisées sur la biomasse ont concerné l'humidité, la granulométrie, le PCI, la teneur en métaux et la recherche de composés organochlorés. La qualité du bois est mal contrôlée sur certains sites : taux de fine et humidité sont très variables. L'humidité peut être parfois importante (plus de 45%). Les réglages de combustion ne sont pas toujours ajustés en fonction de l'humidité.

Les impuretés et indésirables du combustible sont souvent à l'origine d'incidents dans le système d'alimentation (phénomène déjà constaté en 2007) et des pannes constatées sur les chaudières.

Une grande majorité de chaufferies utilise un mélange de plaquettes forestières et de broyat d'emballages bois. Les exploitants interrogés ne sont pas informés de l'évolution de la rubrique ICPE 2910 et du possible reclassement de leur installation sous le régime de l'enregistrement sans changement de combustible. La qualité des combustibles analysés respecte de manière générale les seuils définis par la réglementation ICPE 2910B. La teneur en métaux des combustibles est globalement faible sauf sur un site où la présence de nombreux éléments métalliques a été détectée. Il n'a pas été identifié de composés organochlorés de type pesticide dans les combustibles.

Cendres

Les analyses réalisées sur les cendres ont concerné l'humidité, la granulométrie, les valeurs agronomiques et fertilisantes, la teneur en métaux et en éléments organiques (HAP, PCB) et la radioactivité. Deux types de cendres ont été analysées par chaudière : les cendres collectées sous foyer souvent mélangées avec les cendres issues du multi-cyclone (85 % à 95 % des cendres collectées) et les cendres volantes ou fines d'épuration issues des filtres à manches ou des électrofiltres. Les analyses réalisées ont montré :

- une différence notable de concentrations pour de nombreux éléments (granulométrie, métaux, PCDD/F, radioactivité) entre les cendres sous foyer et les cendres volantes. En effet, ces dernières concentrent les éléments volatiles au cours de la combustion qui se condensent sous forme de fines particules,
- les cendres sous foyer et multi-cyclone respectent globalement les valeurs limites des arrêtés pour un épandage agricole, certaines valeurs agronomiques (pH, teneur en K_2O , CaO) semblent être intéressantes pour une valorisation de ces cendres par plan d'épandage,
- les cendres volantes dépassent parfois les seuils fixés par la réglementation ICPE 2910B, obligeant l'exploitant d'une installation en Enregistrement à intensifier la périodicité du contrôle des combustibles utilisés et des cendres produites.

Emissions atmosphériques

Les polluants recherchés sont des polluants classiques (poussières, gaz minéraux, COV) mais aussi des éléments traces comme les polluants organiques persistants (PCDD/F, PCB, HCB,...), les métaux lourds, les poussières fines et des traceurs de combustion du bois (carbone élémentaire et organique, levoglucosan).

On observe de façon générale des émissions de polluants faibles, notamment au regard des valeurs limites d'émissions (VLE) imposées par les réglementations existantes ou même programmées pour les années à venir.

Concernant les émissions de poussières, un seul site dépasse le seuil de rejets de 50 mg/m_0^3 à 6% O_2 (VLE réglementaire à l'horizon 2018) à cause d'une régulation mettant hors service un électrofiltre. Les deux sites qui sont soumis à un arrêté préfectoral plus contraignant que la réglementation ICPE sont à moins de 5 mg/m_0^3 à 6% O_2 .

Seules deux installations parmi les dix étudiées présentent, à cause de mauvaises conditions d'exploitation, des émissions importantes de CO, COVNM et de composés organiques spécifiques. De par leur taille, ces deux sites ne sont pas soumis à la réglementation ICPE.

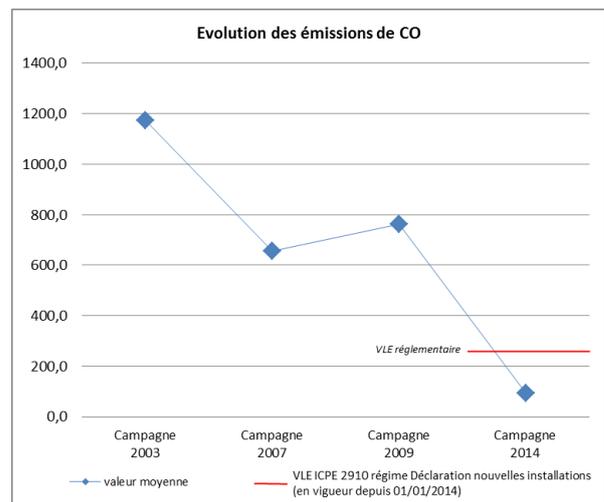
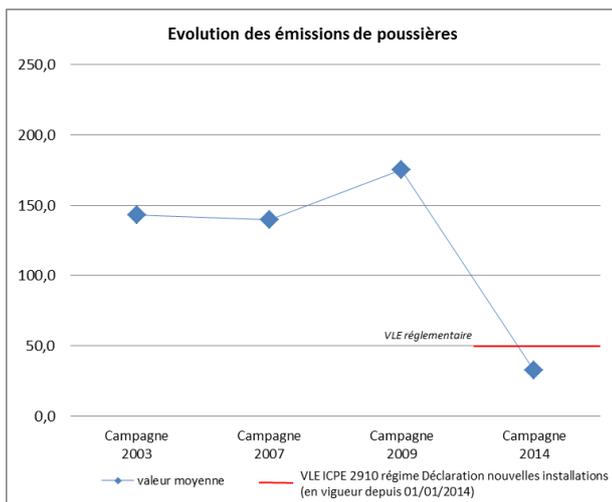
Par ailleurs, un dernier site dépasse la VLE réglementaire de 200 mg/m_0^3 à 6% O_2 pour le CO, en raison d'un dysfonctionnement au niveau de la régulation de l'installation.

Lorsque l'on compare ces résultats aux campagnes de mesures menées en 2003, 2007 et 2009, on observe une baisse significative des rejets atmosphériques.

Le fonds chaleur, mis en place en 2009, a permis d'impulser cette bonne dynamique avec :

- un niveau d'exigence élevé en termes d'émissions de poussières, anticipant la réglementation
- l'utilisation des meilleures technologies disponibles
- l'utilisation de techniques améliorant les performances énergétiques et environnementales, à l'exemple des économiseurs et des condenseurs

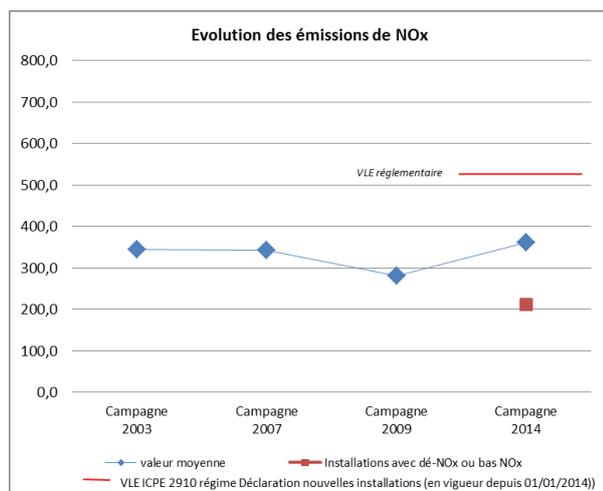
Les figures suivantes présentent l'évolution des rejets de Poussières et CO des différentes Campagnes ADEME (valeurs en mg/Nm^3 à 6% d' O_2)



D'une manière générale, ces évolutions observées sont la conséquence directe :

- pour les poussières, de la mise en place des meilleures technologies disponibles de traitement des fumées (électrofiltres, filtres à manches)
- pour le CO, de l'amélioration de la maîtrise des conditions de combustion par de meilleures régulations et un meilleur usage des équipements,

La figure suivante présente l'évolution des rejets de NOx des différentes Campagnes ADEME (valeurs en mg/Nm3 à 6% d'O2)



Pour les NOx, si l'ensemble ne présente pas d'évolution notable en moyenne, on observe cependant des performances nettement meilleures sur les chaufferies avec un foyer bas-NOx ou équipées de systèmes de dé-NOx.

Le tableau suivant présente les facteurs d'émission évalués au cours de cette campagne ainsi que les données 2005 du CITEPA.

Facteurs d'émission spécifique par type d'épuration

Paramètres	Unité	Médiane 10 unités	Moyenne 10 unités	CITEPA 2005	
				urbain	industrie
Poussières	g/GJ	3,1	12	49	100
PM10	g/GJ	2,2	11	40,9	79,8
PM2.5	g/GJ	2,6	14	35,7	66,5
CO	g/GJ	11,2	34	250	250
CO2	kg/GJ	105	103		
NOx	g/GJ	133	129	167	200
COVNM	g/GJ	0,4	3,0	4,8	4,8
CH4	g/GJ	0,2	0,35	3,2	3,2
SO2	g/GJ	2,1	3,5	10	10
HAP (8)	mg/GJ	0,1	5,9		
HF	g/GJ	0,9	2,4		
HCl	g/GJ	3,4	2,4	40	40
PCDD/F	ng/GJ I-TEQ	0,5	346	8,1	8,1
Cr	mg/GJ	3,1	5,2	47	47
Cu	mg/GJ	8,7	13	31	31
Ni	mg/GJ	1,7	3,5	11	11
Zn	mg/GJ	68	373	290	290
As	mg/GJ	0,7	5,7	9,5	9,5
Se	mg/GJ	2,0	2,8	7	7
Cd	mg/GJ	2,0	3,1	1,4	1,4
Hg	mg/GJ	1,7	1,8	0,8	0,8
Tl	mg/GJ	1,0	1,5		
Pb	mg/GJ	10,6	122	90	90

Les recommandations formulées à la suite de cette étude sont les suivantes :

- Poursuivre la mise en œuvre des meilleures technologies disponibles, à la fois en matière de combustion et de traitement secondaire des émissions,
- Améliorer la maîtrise de la qualité des approvisionnements afin de réduire les incidents de fonctionnement,
- Dimensionner plus finement les installations afin de mieux maîtriser les conditions d'exploitation ou de combustion, en particulier pour les petites chaufferies,
- Promouvoir la mise en place de filières pérennes de valorisation des cendres.

Synthesis

The present study consisted in carrying out energy expertises and measurements of pollutants on 10 wood boilers with an output between 360 kW and 15 MW. Boilers were recent (started from 2008 to 2014). The evaluation covers the following compartments: energy balance, atmospheric emissions, fuels and ashes.

This study complements the investigations carried out by ADEME between 2003 and 2009.

It shows that compliance with the best practices in design, exploitation, and monitoring of fuel quality, combined with best techniques for filtering air emissions, can achieve very high energy and environmental performance.

Energy balances

Energy assessments conducted on boilers show that all yields are in accordance with the manufactures requirements. Facilities of high power (greater than 2 MW) are well-sized and well used.

For some boilers, often smaller power (< 2MWth), oversizing and therefore partial load operation can lead to bad combustion conditions.

From the previous analyses (2003, 2007 and 2009), there was a significant improvement of instrumentation with in particular a better monitoring of energy consumptions.

Fuels

The analyzes performed on the biomass concerned moisture, particle size, fuel capacity index, the metal content and the search for organochlorinated compounds. The quality of wood is poorly controlled on some sites: rate of fines and moisture are highly variable. Moisture can be sometimes significant (over 45%). The combustion settings are not always adjusted according to the moisture.

Impurities and undesirable in the fuel are often the cause of incidents in the power system (a phenomenon already observed in 2007) and failures observed on boilers.

A large majority of boiler uses a mixture of wood chips and crushed of wood packaging. Operators interviewed are not informed of the regulation's evolution and a possible reclassification of their installations within a tougher regulation without any change of fuel. Fuel quality analyzed generally respect the thresholds set by the Regulations ICPE 2910B. The metal content of the fuel is generally low except at one site where the presence of many metal elements was detected. It has not been identified organochlorinated pesticide compounds in fuels.

Ashes

The analyzes performed on ashes concerned moisture, particle size, agronomic and fertilizing values, the metal content, organic compounds (PAHs, PCBs) and radioactivity. Two types of ashes were analyzed by boiler: the ash collected under the furnace often mixed with ashes coming from the multi-cyclone (85% to 95% of collected ash) and fly ash collected from the dedusting equipment: fabric filter or electrostatic precipitator. The analyzes showed:

- a significant difference of concentrations for many elements (dust size distribution, metals, PCDD/F, radioactivity) between the furnace ashes and fly ashes: fly ashes concentrate volatiles emitted during the combustion that condense in the form of fine particles,
- Furnace and multi-cyclone ashes respect lawful thresholds for their valorization in the form of agricultural spreading, agronomic values (pH, K₂O, CaO) appear to be interesting for an amendment: the valuation of these ashes by spreading appears justified,
- Fly ashes sometimes exceed the thresholds set by the Regulations ICPE 2910B, requiring the operator of an installation submitted to this decree to increase the frequency of control of used fuels and produced ashes.

Air emissions

Pollutants of interest are conventional pollutants (dust, mineral gas VOCs) as well as trace elements such as persistent organic pollutants (PCDD/F, PCB, HCB, ...), heavy metals, fine dust and tracers of wood combustion (elemental and organic carbon, levoglucosan).

Compared to previous studies, we observed a significant improvement in air emissions: few sites are beyond the existing limit values or those even planned for the coming years.

One site exceeds the dust threshold emission of 50 mg/m³ at 6% O₂ (TLV regulations 2018). This high emission was initiated by the control that disables an electrostatic precipitator Both sites subject to a more stringent regulation (Authorization) by prefectural order have dust emission below 5 mg/m³.

Only two of the ten installations are studied, because of poor operating conditions, significant emissions of CO, NMVOC and specific organic compounds. Because of their size, these two sites are not subject to ICPE regulations.

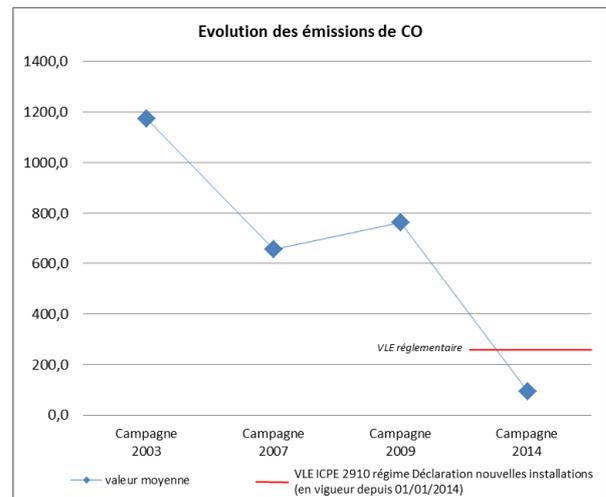
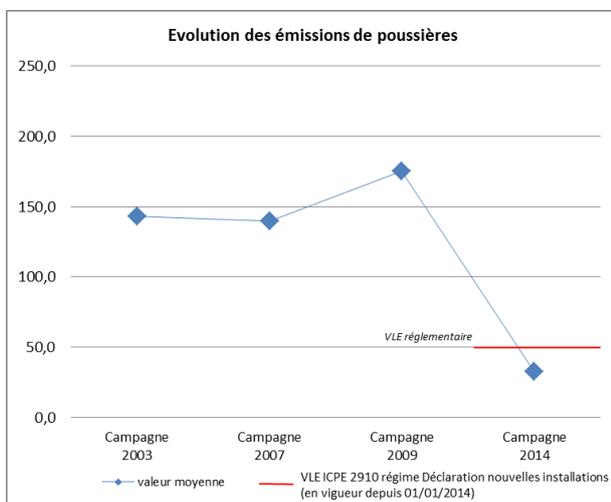
Furthermore, a final site exceeds the prescribed TLV 200 mg / m³ 6% O₂ to CO, due to a malfunction in the control of the installation.

When comparing these results with measurements undertaken in 2003, 2007 and 2009, a significant reduction of air emissions is observed.

The Fonds Chaleur , set up in 2009 , contributed to these improvements with :

- • a high level of requirements in terms of dust emissions , anticipating regulations
- • the use of best available technologies
- • the use of techniques improving the energy and environmental performance , like economizers and condensers

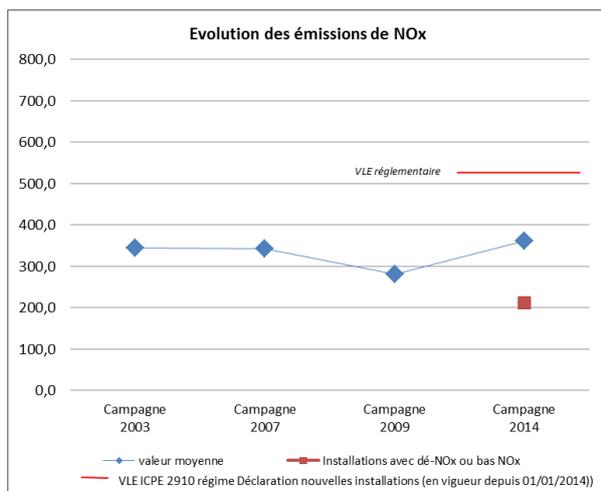
The following figures show the evolution of discharges Dust & CO for different campaigns ADEME (values in mg / Nm³ at 6% O₂)



In general , the observed changes are the direct result :

- for dust, the introduction of more efficient technologies (ESPs, fabric filtration),
- for CO, improved control of combustion conditions through better regulations and better use of equipment.

The following figure shows the evolution of the NOx emissions for different campaigns ADEME (values in mg / Nm3 at 6% O2) :



For NOx, if there is no significant change in average, we notice areas for improvement on new boiler equipped with SNCR or low-NOX design furnaces technology.

The following table shows the emission factors measured during this campaign and the 2005 data CITEPA.

Specific emission factor by dedusting technique

Parameters	Unit	Median 10 units	Average 10 units	CITEPA 2005	
				urban	industry
Poussières	g/GJ	3,05	12	49	100
PM10	g/GJ	2,2	11	40,9	79,8
PM2.5	g/GJ	2,6	14	35,7	66,5
CO	g/GJ	11,5	34	250	250
CO2	kg/GJ	105,5	103		
NOx	g/GJ	133,5	129	167	200
COVNM	g/GJ	0,395	3,0	4,8	4,8
CH4	g/GJ	0,23	0,35	3,2	3,2
SO2	g/GJ	2,15	3,5	10	10
HAP (8)	mg/GJ	0,105	5,9		
HF	g/GJ	0,935	2,4		
HCl	g/GJ	3,35	2,4	40	40
PCDD/F	ng/GJ I-TEQ	0,525	346	8,1	8,1
Cr	mg/GJ	3,05	5,2	47	47
Cu	mg/GJ	8,65	13	31	31
Ni	mg/GJ	1,65	3,5	11	11
Zn	mg/GJ	68,5	373	290	290
As	mg/GJ	0,74	5,7	9,5	9,5
Se	mg/GJ	2	2,8	7	7
Cd	mg/GJ	2	3,1	1,4	1,4
Hg	mg/GJ	1,7	1,8	0,8	0,8
Tl	mg/GJ	1	1,5		
Pb	mg/GJ	10,75	122	90	90

As a result of this study, we recommendate:

- Continue the implementation of best available technology , both in terms of combustion and techniques for filtering air emissions,
- Improve the quality of supply in order to reduce operational occurrences,
- Improve the design of small boilers in order to improve the operating conditions of combustion,
- Promote the development of perennial ash recovery channels.

1. - GENERALITES

1.1. - CONTEXTE DU PROJET

La combustion du bois génère certaines émissions polluantes variables selon la qualité de la combustion, le type de combustible et ses caractéristiques (humidité), la présence d'éléments traces...

Pour certains polluants, la connaissance sur les niveaux d'émission, leur origine et leur mécanisme de formation reste à améliorer. C'est notamment le cas des polluants organiques persistants (HAP, Dioxines / furannes, PCB...), des métaux lourds et des poussières fines pour lesquelles une seule campagne nationale de mesures a été réalisée en 2008. L'ADEME souhaite ainsi compléter sa base de données afin de disposer de valeurs d'émission pour les HAP, dioxines/furannes, PCB, métaux lourds, poussières fines...

Ce projet s'inscrit également dans la continuité de travaux réalisés depuis 2003. Ce projet doit permettre en particulier d'actualiser les connaissances sur les polluants déjà mesurés en 2007 (étude Séchaud) et 2009 (étude IRH).

La campagne de mesures a été programmée sur l'année de chauffe 2013/2014 et sur des chaufferies bois en fonctionnement soutenues financièrement par l'ADEME dans le cadre du Programme Bois Energie.

Cette étude ne comporte pas d'évaluation économique.

1.2. - PRESENTATION DU GROUPEMENT AYANT REALISE D'ETUDE

L'étude a été réalisée par un groupement d'entreprises associant deux bureaux d'étude et un laboratoire d'analyses. Cette association avait pour but de répondre à la fois aux exigences en matière de prélèvement et aux exigences analytiques.

Les sociétés devant réaliser les prestations sont spécialisées et complémentaires dans les différents domaines d'intervention cités dans l'annonce d'appel à candidature.

1.2.1. - Présentation de LECES

LECES est un prestataire de service environnemental comprenant 50 personnes principalement ingénieurs de haut niveau et également des techniciens. La société couvre différents métiers dont un pôle de compétence Air qui couvre en particulier les mesures (émissions, combustibles, ...) et le dimensionnement des équipements relatifs au traitement de l'air.

LECES est implanté à Saint-Julien-lès-Metz et dispose de différentes agences en France. (Seclin près de Lille et Fos-sur-Mer près de Marseille). LECES est accrédité par le COFRAC pour les mesures de poussières, débit, CO, CO₂, O₂, SO₂, NO_x, COV, et les prélèvements de Hg, HCl, HF, SO₂, Métaux lourds, HAP, PCDD/F.

1.2.2. - Présentation de INDDIGO

INDDIGO est une société de conseil et d'ingénierie indépendante intervenant de longue date dans le domaine du bois énergie en France. INDDIGO possède une expérience éprouvée de la conception et du dimensionnement de chaufferies biomasse acquise en tant que maître d'œuvre et une connaissance de terrain des conditions d'exploitation de ces installations dans ses missions de contrôle d'exploitation en tant qu'assistant à maître d'ouvrage.

1.2.3. - Présentation de MicroPolluants Technologie SA

MICROPOLLUANTS TECHNOLOGIE SA est un laboratoire situé à Thionville (57) spécialisé dans l'analyse d'éléments traces sur des matrices environnementales ou agroalimentaires. L'ensemble des appareils d'analyses, propriété de MicroPolluants Technologie, est placé dans la salle d'analyse climatisée et stabilisée. Chaque appareil est suivi par un plan de maintenance préventive du constructeur et un plan de maintenance interne. De même, un plan d'étalonnage pour chaque instrument de mesure est réalisé selon leurs procédures internes.

MICROPOLLUANTS TECHNOLOGIE SA dispose d'un certain nombre d'agrément, de qualifications, de certifications, d'accréditations nécessaires à la réalisation de l'étude.

1.3. - OBJECTIF DE L'EXPERTISE ET APPROCHE DE LA PROBLEMATIQUE

L'étude a pour objectifs de :

- contribuer à l'amélioration des connaissances de la filière du chauffage collectif au bois, avec une actualisation des connaissances des émissions atmosphériques et l'acquisition de nouvelles connaissances des émissions atmosphériques de POP, métaux lourds et poussières fines ;
- pour chaque installation, présenter un bilan annuel des émissions polluantes et proposer des recommandations pour améliorer les bilans énergétique et environnemental ;
- au niveau national, compléter l'état des connaissances pour la filière chauffage collectif au bois, sur les valeurs d'émission des polluants atmosphériques et les caractéristiques des cendres produites, dans la limite des incertitudes liées à l'hétérogénéité des combustibles, des modes de combustion, des dispositifs de traitement des fumées, des méthodes de prélèvement et d'analyses.

Dans le cas présent, une attention particulière est apportée aux points suivants compte tenu d'une forte évolution réglementaire :

- Transcription de la directive IED, et nouvelles définitions de la biomasse
- Modification des rubriques ICPE de combustion (2910 A et B) et publication des arrêtés de prescriptions générales avec évolution programmée des VLE à la baisse, création d'un régime d'enregistrement avec de nouveaux seuils réglementaires pour les combustibles et les cendres, et la distinction des cendres sous foyer et des cendres volantes.
- Sortie du Statut de Déchet (SSD) pour le broyat d'emballages bois,
- Actualisation des valeurs guides utilisées par le CITEPA dans l'approche des différentes sources de pollutions de l'air.

La réalisation de l'étude s'est déroulée en 4 phases :

- Phase 1 : Collecte d'informations,

L'objectif de cette étape consiste à collecter l'ensemble des renseignements, mesures comprises, nécessaires à l'analyse ultérieure et à l'établissement des recommandations permettant d'améliorer les performances des chaufferies.

- Phase 2 : Réalisation des mesures

La phase 2 prévoit la réalisation d'un bilan énergétique instantané et de mesures environnementales pour chaque chaufferie dans différents milieux (à l'émission, dans les cendres, dans les combustibles). Les mesures sont réalisées lorsque les installations sont en fonctionnement représentatif (période hivernale).

- Phase 3 : Exploitation des données

A partir de l'ensemble des données collectées dans les phases 1 et 2, l'exploitation des données comprend les phases suivantes : bilan par chaufferie, proposition de recommandations par chaufferie, bilan national.

- Phase 4 : Valorisation des résultats

2. - PRESENTATION DES CHAUFFERIES

Les 10 chaufferies étudiées sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Présentation des chaufferies expertisées

N° chaufferie	Type chaufferie	Mise en service	Puissance bois MW	Combustible	Régime ICPE actuel	Régime ICPE futur (1)
1	collectif	03/2011	7,6 (2 x 3,8)	PF : 55 % PBFV : 29 % Ecorces : 17 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
2	collectif	12/2008	7,6 (2 x 3,8)	PF : 95 % PBFV : 5 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
3	industrie	07/2012	15 (2 x 7,50)	PF : 93 % « Plaquettes urbaines » : 7 %	2910-A Autorisation Zone PPA	2910-B (ou 2910-A si SSD) Autorisation Zone PPA
4	industrie	10/2012	1,95	PF : 98% Broyat Palettes site : 2 %	Non classée	2910-B Enregistrement ou Non classée (si SSD)
5	industrie	11/2012	1,8	PF : 70% « Bois industriel » : 30 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
6	tertiaire	11/2011	0,8	PF : 30% PBFV : 70 %	Non classée	2910-B Enregistrement ou Non classée (si SSD)
7	collectif	11/2012	2,1	PF : 33% PBFV : 67 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
8	collectif	07/2013	0,35	PF : 100 %	Non classée	Non classée
9	collectif	10/2011	3,3	PF : 45 % PBFV : 55 %	2910-A Déclaration	2910-B Enregistrement ou 2910-A Déclaration (si SSD)
10	collectif	2012	5,3	PF : 92,5% PBFV : 7,5%	2910-A Autorisation	2910-B (ou 2910-A si SSD) Autorisation

(1) : sans changement de combustible

Les installations étudiées sont récentes (mise en service en 2011 et 2012 sauf une installation en 2008). Cela présente l'intérêt d'avoir une photographie actualisée du parc des chaufferies construites en France mais l'inconvénient d'analyser des fonctionnements avec peu de temps de retour.

La gamme des puissances prises en compte couvre 4 chaudières de puissance unitaire inférieures à 2 MW et 6 chaudières comprises entre 2 et 10 MW.

Les remarques générales concernant les systèmes d'épuration des chaufferies sont les suivantes :

- Six sites sont équipés de multi-cyclone et de filtres à manche
- Trois sites sont équipés de multi-cyclone et d'électrofiltres,
- Un site n'est équipé que de multi-cyclone

On relève par ailleurs les deux spécificités suivantes :

- un site est équipé d'un système DENOX SNCR à partir d'injection d'urée (site 3),
- un site est équipé d'une chaudière de technologie bas-NOx (site 4),
- un site est équipé d'un dispositif de condensation des fumées (site 10).

Neuf installations sur 10 ont recours à du broyat d'emballages bois (dénommé bois industriel ou bois fin de vie) en proportion plus ou moins importante dans mix énergétique, qui implique un passage sous la rubrique 2910-B d'ici octobre 2014 ou un changement de combustible pour un broyat d'emballage bois sorti du statut de déchet ou de la biomasse répondant aux définitions de la 2910-A. En conséquence, sans préjuger de la décision des exploitants, nous avons analysé les rejets par rapport aux prescriptions réglementaires spécifiques à l'installation quand elles existent (2 sites en autorisation), et aux prescriptions générales de l'arrêté du 26/08/2013 -Déclaration pour les sites en déclaration ou non classés (1 site) et aux prescriptions générales de l'arrêté du 24/09/2013 -Enregistrement pour les sites actuellement en déclaration ou non classés et utilisant du broyat d'emballages bois (7 sites).

3. - PRESENTATION DES MESURES REALISEES

Le détail des procédures d'échantillonnage ainsi que les normes utilisées pour les mesures sont présentées dans l'annexe 1.

Les mesures réalisées ont visées à compléter les connaissances sur les émissions des chaudières, en particulier sur la granulométrie des rejets et les émissions de micropolluants (métaux, PCDD/F, PCB, HAP). Certains de ces paramètres ont par ailleurs été recherchés dans les combustibles et les cendres dans le but de réaliser des bilans et de mettre en évidence, éventuellement, des phénomènes contribuant à la formation de ces polluants (process) ou à la réduction des émissions (technique d'épuration).

3.1. - BILANS ENERGETIQUES

Les bilans énergétiques sont réalisés selon les méthodologies suivantes :

3.1.1. - Bilans énergétiques instantanés

Le bilan énergétique instantané est réalisé à partir des mesures suivantes :

- le débit normal humide de rejets des fumées,
- le pourcentage de CO₂ et d'O₂ dans les fumées,
- la température des fumées et de l'air ambiant en chaufferie.

La détermination de la puissance bois entrante est déterminée selon les hypothèses suivantes :

- Estimation du débit entrant à partir des émissions de CO₂, du PCI et du taux de carbone mesuré sur le bois.

Le calcul de la puissance effective de l'installation est réalisé en soustrayant les pertes évaluées par la méthode des 4 pertes ou la formule de Siegert.

Les méthodes de calcul utilisées sont présentées dans l'annexe 2.

3.1.2. - Bilans sur la saison de chauffe

Les bilans sur la saison de chauffe ont été évalués à partir des consommations de combustible fournis par le site et des consommations d'énergie enregistrées.

Les indications délivrées par les sites sont plus précis que lors de la précédente étude et généralement les consommations de bois et de combustibles d'appoint annuelles et la production d'énergie annuelle sont disponibles. Sur certains sites, il a été possible d'accéder aux consommations de bois mensuelles, permettant d'affiner le calcul du rendement et du taux de couverture biomasse.

Le calcul du rendement annuel permet de consolider le rendement instantané dans la majorité des cas.

3.2. - CARACTERISATION DES COMBUSTIBLES

Les éléments analysés sont les suivants :

- PCS et PCI,
- taux de cendre,
- granulométrie,
- humidité,
- éléments majeurs (azote, carbone, hydrogène, chlore, soufre),
- teneurs en métaux (B, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Tl, V, Zn),
- PCB indicateurs,
- Pentachlorophénol,
- teneurs en organohalogénés de type pesticides.

La représentativité des analyses de combustibles est limitée. Si l'échantillonnage réalisé lors des campagnes d'analyses (1 ou 2 jours) est pertinent pour rechercher une corrélation entre la qualité des combustibles et les émissions, il n'est pas représentatif d'un combustible variable dans le temps, d'autant plus pour les installations utilisant un mix de combustibles sans homogénéisation au niveau du stockage.

3.3. - CARACTERISATION DES CENDRES

Les analyses réalisées sur les cendres ont été les suivantes :

- Humidité,
- granulométrie,
- valeurs agronomiques et fertilisantes (pH, COT, matière organique, C/N, P₂O₅, CaO, K₂O, Na₂O, MgO, azote total, organique et ammoniacal),
- soufre,
- teneurs en métaux (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Zn),
- PCDD/F,
- PCB indicateurs,
- HAP (benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, fluoranthène),
- radioéléments.

3.4. - CARACTERISATION DES EMISSIONS POLLUANTES

Les mesures réalisées ont concerné :

- Débit des fumées,
- Température de fumées,
- Concentration en CO, CO₂, O₂,
- Concentration en NO_x,
- Concentration en SO₃, SO₂, HCl, HF
- Concentration en COVNM (non méthaniques) et en méthane,
- Concentration en poussières, PM10 et PM2.5,
- Dioxines et furannes
- PCB indicateurs et PCB type dioxines (coplanaires),
- HCB,
- 8 HAP (norme française) et 16 HAP (référentiel US EPA),
- Métaux lourds : Cd, Hg, Tl, As, Se, Te, Pb, Sb, Cr total et CrVI, Co, Cu, Sn, Mn, Ni, V, Zn,
- Levoglucosan et ses isomères,
- Carbone élémentaire et carbone total

Les résultats sont exprimés en valeurs mesurées et en valeurs convertis à un oxygène de référence (6 %).

4. - EXPLOITATION DES RESULTATS

4.1. - RAPPEL REGLEMENTAIRE

Les résultats des mesures sur les combustibles, cendres et rejets atmosphériques sont exploités par chaufferie selon les réglementations locales ou nationales.

Il n'existe pas de réglementation spécifique pour les chaudières de moins de 2 MW. Trois installations parmi celles étudiées sont en dessous de ce seuil : sites n° 4, 6 et 8.

Les autres installations sont soumises aux réglementations suivantes :

- Arrêté préfectoral spécifique pour les chaufferies n°3 et n°10 (le site n°3 étant de plus soumis à un PPA, rejet limité à 20 mg/m³),
- Prescriptions générales de l'arrêté du 26/08/2013 - Déclaration pour les autres chaufferies (sites 1, 2, 5, 7 et 9).

Certaines chaufferies soumises à Déclaration pourraient être requalifiées à Enregistrement selon l'arrêté du 27/09/2013 à cause de l'utilisation de combustible de type b(v) à moins qu'elles ne changent leur approvisionnement en combustible SSD ou en plaquettes forestières.

Ces chaufferies portent les n° 1, 2, 4, 5, 6, 7 et 9.

4.2. - RESULTATS ENERGETIQUES

4.2.1. - Bilans énergétiques instantanés

Les bilans énergétiques instantanés réalisés au cours de la campagne de mesure sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Bilans énergétiques instantanés

Paramètres mesurés	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10
Puissance nominale	kW	3800	3800	7500	1950	1800	800	2100	350	3300	4500
Puissance moyenne	kW	2541	3669	6252	1671	1785	240	817	85	2385	4660
Rendement sur PCI	%	91	86	91	88	90	89	80	84	91	94
Taux de charge	%	67	97	83	86	99	30	39	24	72	104

Les rendements calculés sur une courte période (3 h à 4 h) sont bons. Deux chaudières seulement ont un rendement inférieur à 85 % (n° 6 et 8) ; ces deux chaudières ont un taux de charge particulièrement bas, inférieur à 40 %. Les autres installations se situent entre 86 % et 94 %. On relève toutefois pour la chaudière n°10 un rendement au-dessus de la moyenne à environ 94% (*ce rendement donné sur PCI est sous-estimé car l'installation est équipée d'un dispositif de condensation non pris en compte dans le calcul*).

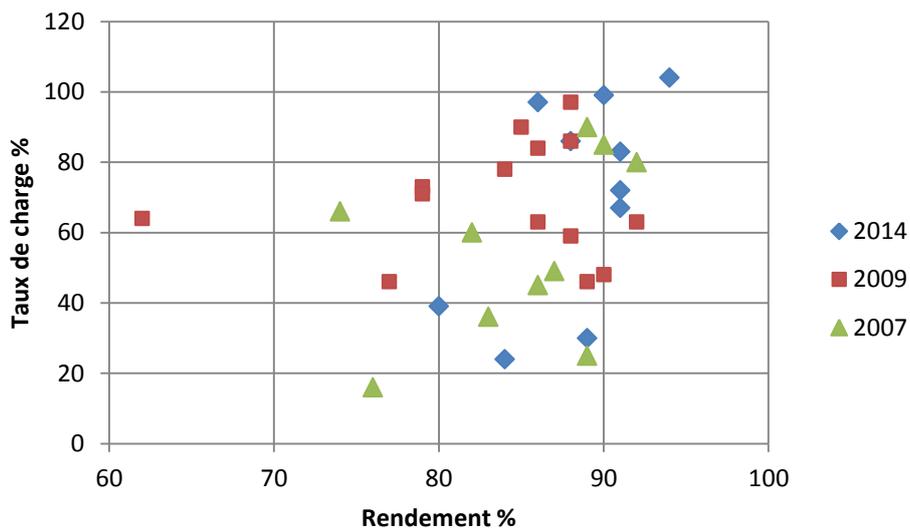
Les taux de charge constatés sont globalement en liaison avec les évaluations annuelles présentées dans le paragraphe suivant. Les chaufferies n° 2, 3, 4, 5, 9 et 10 étaient dans des conditions de fonctionnement habituelles, proche des valeurs nominales. Nous relevons pour certaines chaufferies :

- N°1 : le taux de charge était légèrement inférieur à la moyenne et en baisse constante pendant les mesures à cause d'une température ambiante élevée,
- N°6 : taux de charge bas pendant les mesures (30 %), pics de CO traduisant par moment une mauvaise combustion, image proche du bilan annuel,
- N°7 : taux de charge bas pendant les mesures lié à une température ambiante élevée, le taux de charge instantané a baissé au cours des mesures des la fin de la matinée ; il est inférieur à la moyenne annuelle,
- N°8 : taux de charge très bas, le constat instantané réalisé étant le reflet du fonctionnement moyen annuel.

La figure 1 présente le taux de charge instantané des installations en fonction du rendement pour cette campagne, la campagne LECES de 2007 et la campagne IRH de 2009.

On remarque globalement que le rendement décroît quand le taux de charge diminue. Les taux de charges se sont améliorés depuis 2007 : seulement 30 % des chaudières avaient un taux de charge pendant les mesures supérieur à 80 % en 2007 ; on obtient 50 % en 2014 malgré des conditions de mesure plus délicates à cause d'un hiver très doux.

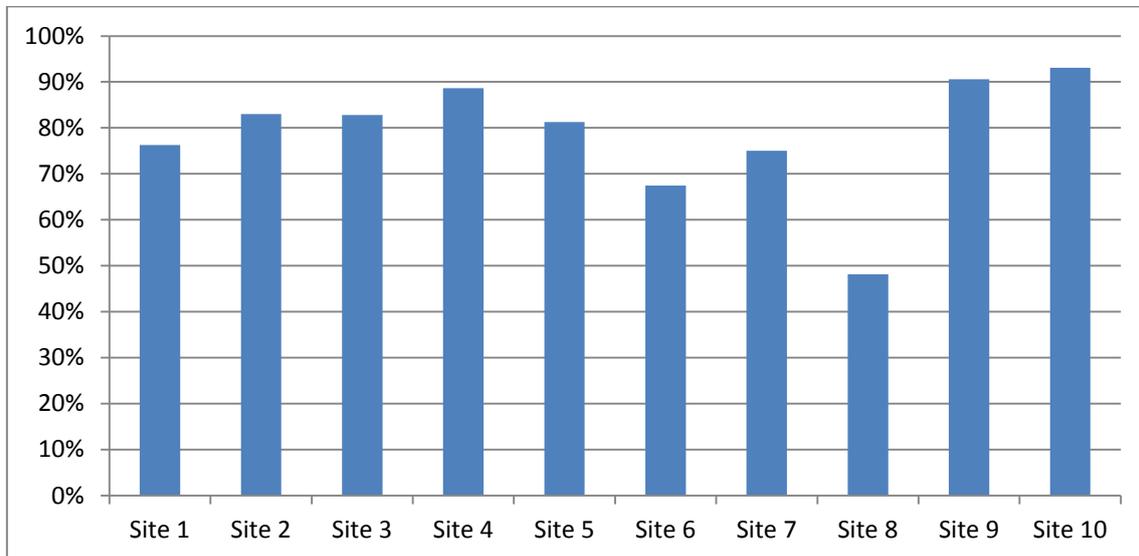
Figure 1 : rendement et taux de charge instantané



4.2.2. - Bilans sur la saison de chauffe

Le rendement annuel est présenté à la figure 2.

Figure 2 : Rendement annuel des chaudières

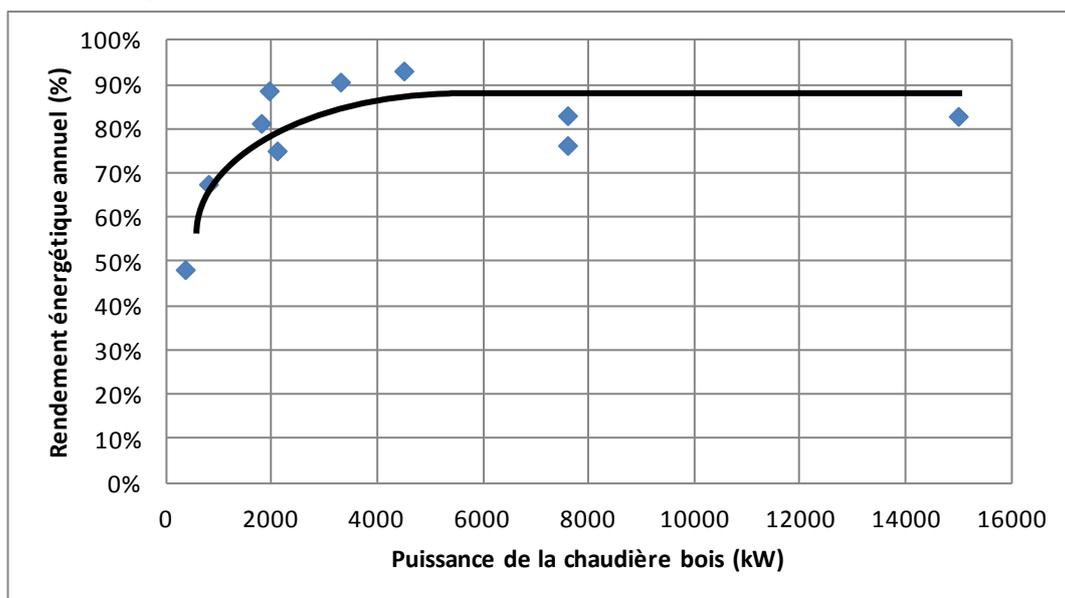


En bilan annuel, le rendement moyen est de 79%, mais laisse apparaître de grandes disparités entre installations, avec une plage de variation de 48 à 93 %.

Les 3 installations industrielles venant suppléer une production fossile avec des besoins relativement constant tout au long de l'année ont des rendements supérieurs à 80 % (site n°3, 4 et 5).

Une corrélation peut être recherchée avec la puissance de la chaudière :

Figure 3 : Rendement annuel en fonction de la puissance de la chaudière



Rappelons ici que le rendement d'une chaudière est dépendant de multiples facteurs liés :

- A la conception (taux de charge, isolation et efficacité de la chaudière, économiseur, condenseur...)
- A l'exploitation (adéquation du combustible en PCI et taux de cendre, optimisation des paramètres de combustion, entretien de la chaudière...).

Ces différents facteurs semblent optimisés dès lors qu'on atteint une puissance de l'ordre de 2 MW.

Il n'existe pas de corrélation évidente entre le taux de couverture bois et le rendement moyen annuel de la chaudière (figure 4). Cela remet en question l'idée répandue qu'un taux de couverture élevé en bois conduit à dégrader le rendement de l'installation à cause de période prolongée à charge faible. En effet une complexité supplémentaire provient de la régularité ou pas des besoins à couvrir et de la part de la chaufferie dans la production globale du site.

Figure 4 : Rendement annuel et taux de couverture bois

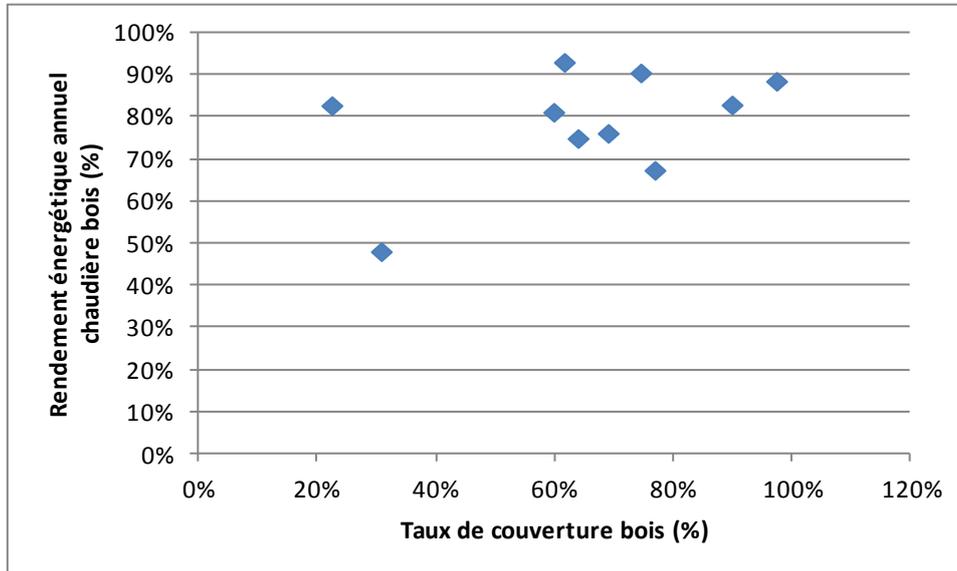
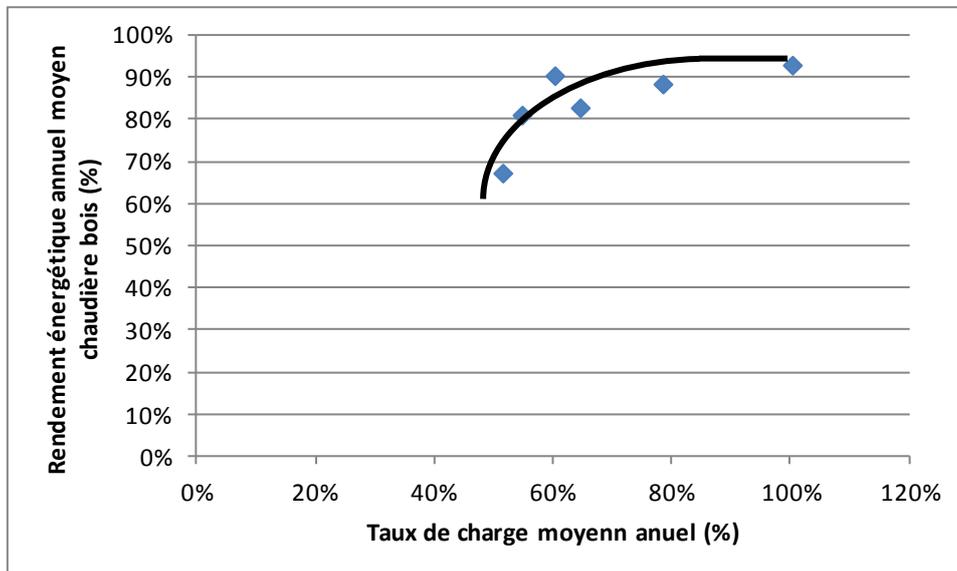


Figure 5 : Rendement annuel et taux de charge moyen annuel



Pour les installations qui le suivent en exploitation, il a été possible de déterminer le taux de charge moyen annuel de la chaudière bois (figure 5). On arrive à une meilleure corrélation pour le rendement énergétique en fonction de ce paramètre.

4.3. - RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX

Les résultats des performances environnementales sont présentés selon les milieux analysés :

- les combustibles,
- les cendres,
- les émissions atmosphériques.

4.3.1. - Caractéristiques des combustibles

Les combustibles ont été prélevés régulièrement pendant les deux jours de mesure par site. Ils sont le reflet des entrées matières pendant les mesures. Ils ne sauraient représenter la moyenne annuelle car ils ne tiennent pas compte d'une variabilité saisonnière du bois et, pour les chaufferies utilisant plusieurs types combustibles, le mix entrant n'est pas forcément représentatif du mix annuel.

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques des combustibles concernant les principaux polluants mesurés. Les médianes et moyennes ont été calculées en assimilant les valeurs inférieures à la limite de quantification du laboratoire à cette dernière.

Le métal le plus représenté (voir tableau 3) est le soufre. Il n'a pas été détecté de bore dans les échantillons. Pour les autres métaux, le métal le plus représenté est le zinc (29,9 mg/kg) suivi du plomb et du cuivre (7,8 et 5,7 mg/kg) puis du vanadium, chrome et nickel (respectivement 1,71, 1,38 et 1,30 mg/kg). Les autres métaux étant en concentration inférieures à 1 mg/kg. Pour les teneurs en plomb, une chaufferie se distingue (27 mg/kg) avec la présence de nombreux corps métalliques dans le combustible

Pour le site n°6, les teneurs élevées en plomb et zinc semblent liées à la forte proportion d'impuretés métalliques observées dans le combustible.

Certains paramètres tels que l'essence et la présence d'écorce peut jouer un rôle important sur la teneur en métaux lourds du combustible. L'essence de bois (résineux ou feuillus) intervient notamment sur les teneurs en Hg, Mn et Zn. La présence d'écorce dans le combustible peut accroître la teneur en métaux lourds du combustible, notamment en Ba, Mn et Zn car la concentration de ces éléments dans les écorces est bien supérieure à celle du bois.

Tableau 3 : Analyse des combustibles (métaux en mg/kg MS)

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)	
Combustible majoritaire		PF	PF	PF	PF	PF	PBFV	PBFV	PF	PBFV	PF				
S	mg/kg MS	195	135	661	268	233	330	282	449	240	442	275	324		
B		<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	50	50	
V		0,56	0,34	1,95	3,23	0,31	0,58	2,83	4,08	2,84	0,35	1,3	1,7		
Cr		1,00	0,29	2,03	1,68	1,47	1,38	3,43	3,15	2,59	0,74	1,6	1,8	30	
Co		0,32	<0,125	0,53	0,51	0,19	0,51	0,82	1,28	0,77	<0,125	0,51	0,56		
Ni		1,02	0,45	1,69	1,40	0,68	0,88	2,76	2,13	1,47	0,52	1,2	1,3		
Cu		7,0	0,6	6,5	2,8	4,1	8,5	10,8	8,1	4,9	4,0	5,7	5,7	30	
Zn		41,1	13,4	42,3	10,8	18,6	39,7	43,6	25,5	32,3	31,7	32	30	200	
As		0,24	0,09	0,52	2,72	0,31	0,55	1,19	2,23	1,35	0,09	0,53	0,93	4	
Se		<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	0	<0,25	<0,25	1	<0,25	<0,25	0,25	0,29		
Mo		2,53	<0,125	0,57	<0,125	<0,125	0,13	0,37	0,19	0,31	<0,125	0,16	0,46		
Cd		0,12	<0,025	0,18	0,18	0,16	0,13	0,23	0,15	0,08	0,16	0,15	0,14	5	
Sn		0,15	<0,125	0,21	<0,125	<0,124	0,20	0,35	0,19	0,18	<0,125	0,17	0,18		
Sb		0,88	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	0,36	0,42	0,23	0,35	<0,125	0,18	0,29		
Tl		<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	0,125	0,125		
Pb		16,0	0,6	5,0	1,9	1,1	26,8	10,2	6,0	9,9	0,7	5,5	7,8	50	
Hg		<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	0,042	0,028	<0,025	<0,025	0,025	0,027	0,2

(1) : valeurs limites précisées de l'arrêté du 24 septembre 2013 pour les combustibles de type b(v)

Pour les autres composés (tableau 6), on relève des PCI et PCS dans les combustibles très voisins, de l'ordre de 11 MJ/kg pour le PCI. L'analyse de carbone donne une teneur de 50,1 % en moyenne, valeur attendu pour le bois, avec une faible dispersion. Il y a 6,2 % d'hydrogène en moyenne et les teneurs en azote sont faibles (< 0,3 % sauf sur deux sites).

L'humidité et le taux de cendre varient selon les chaufferies :

- l'humidité moyenne est de 35,8 % (min 22,6 %, max 46,9 %),
- le taux de cendre moyen est de 1,8 % (min 0,2 %, max 3,8 %).

Concernant les granulométries, seules deux chaufferies présentent des éléments supérieurs à 100 mm. Le taux de fine inférieur à 1 mm varie de 0,6 % à 6,2 % avec une moyenne de 2,9 %.

Il n'a pas été détecté la présence de PCB indicateurs ni de combustibles organochlorés de type pesticide dans les combustibles. Les teneurs en PCP sont inférieures à la limite de quantification (0,025 mg/kg) sauf sur deux sites où cet élément est détecté en faible concentration (0,08 et 0,42 mg/kg).

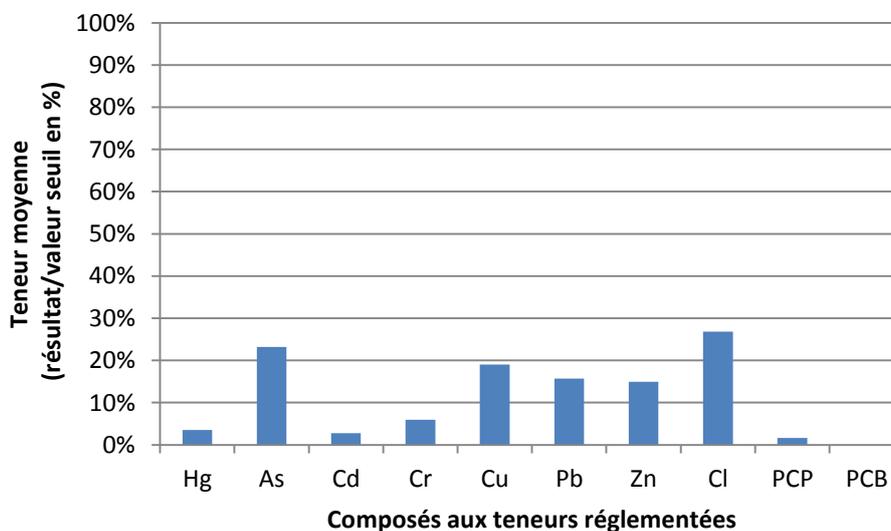
Tableau 4 : Analyse des combustibles (autres composés)

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés
Combustible majoritaire		PF	PF	PF	PF	PF	PBFV	PBFV	PF	PBFV	PF			
PCS	MJ/kg MB	11,0	10,7	11,4	15,1	13,3	16,1	12,6	14,7	12,6	12,0	12,6	12,9	
PCI	MJ/kg MB	9,2	8,8	9,7	13,6	11,8	14,7	10,9	13,1	10,9	10,4	10,9	11,3	
Taux de cendre	% MB	2,9	1,4	1,1	0,7	0,2	1,2	1,3	3,8	4,1	1,2	1,3	1,8	
Humidité	% MB	44,0	45,4	40,7	22,6	33,1	19,0	37,8	28,4	46,9	40,0	38,9	35,8	
Azote total	mg/kg MS	1,1	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,5	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,3	0,4	
Hydrogène total	mg/kg MS	6,1	7,1	6,0	5,9	6,0	5,8	6,5	6,1	6,2	5,9	6,0	6,2	
Carbone total	mg/kg MS	49,3	49,9	49,5	50,1	50,2	49,9	50,8	51,1	50,1	50,5	50,1	50,1	
Chlore total	mg/kg MS	263	394	130	<20	39	141	154	285	951	55	148	243	900
> 100mm	%	0,0	0,0	11,6	0,0	0,0	13,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	
63 à 100 mm	%	4,1	0,0	23,8	3,0	3,6	34,2	1,9	0,0	8,1	3,7	3,7	8,2	
45 à 63 mm	%	8,0	3,7	19,9	4,1	6,3	15,1	9,6	1,4	7,0	4,4	6,7	8,0	
16 à 45 mm	%	53,6	54,7	26,0	62,1	31,8	23,1	62,0	61,7	48,0	41,2	50,8	46,4	
8 à 16 mm	%	18,5	29,6	12,0	17,9	39,5	5,0	20,3	17,9	21,1	29,7	19,4	21,2	
1 à 8 mm	%	11,8	10,1	5,3	11,1	17,4	5,9	5,6	12,8	12,0	15,9	11,5	10,8	
<1 mm	%	4,0	2,0	1,4	1,9	1,3	2,9	0,6	6,2	3,8	5,1	2,5	2,9	
PCB indicateurs	mg/kg MS	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0,07	0,07	2
PCP	mg/kg MS	<0,025	<0,025	<0,025	0,42	<0,030	<0,025	0,08	<0,025	<0,025	<0,027	0,025	0,070	3

(1) : valeurs limites précisées de l'arrêté du 24 septembre 2013 pour les combustibles de type b(v)

La figure 6 présente la teneur moyenne des combustibles analysés par rapport aux seuils de l'arrêté du 24/09/2014 concernant les combustibles de type b(v) : on remarque que les seuils sont globalement respectés.

Figure 6 : Analyse moyenne des combustibles avec les seuils des combustibles b(v) de l'arrêté PG Enregistrement



Le tableau suivant présente les résultats moyens obtenus au cours de cette campagne à ceux obtenus au cours des campagnes précédentes : SECHAUD 2007 et IRH 2009.

Pour les métaux, les teneurs sont voisines des teneurs quantifiées en 2007. On observe cependant une légère augmentation de la dispersion des résultats pour certains métaux.

Les PCS sont similaires à la campagne de SECHAUD 2007 pour une humidité identique. Les PCI sont aussi très voisins de la campagne IRH 2009.

Les taux de cendres sont voisins sur les trois campagnes si on exclut une valeur très élevée au cours de cette campagne (11,9 %).

Tableau 5 : Combustibles – Comparaison avec des valeurs antérieures

Paramètre	Unité	2014	SECHAUD 2007	IRH 2009
V	mg/kg MS	0,31 - 4,08	<0,13 - 0,93	
Cr		0,29 - 3,43	<0,13 - 1,14	
Co		0,19 - 1,28	<0,13 - 0,46	
Ni		0,45 - 2,76	<0,17 - 1,53	
Cu		0,6 - 10,76	<0,40 - 3,30	
Zn		10,8 - 43,6	3,8 - 16,1	
As		0,09 - 2,72	<0,025 - 0,92	
Se		0,42 - 0,52	<0,025 - 0,93	
Cd		0,08 - 0,23	<0,028 - 1,36	
Sn		<0,125 - 0,35	<0,125	
Sb		<0,125 - 0,88	<0,125	
Tl		<0,125 - 0,88	<0,125	
Pb		0,63 - 26,8	0,20 - 1,09	
Hg		<0,025 - 0,042	<0,025	
PCS		MJ/kg MB	10,7 - 16,1	
PCI	MJ/kg MB	8,8 - 14,7		8,03 - 13,21
Taux de cendre	% MB	0,2 - 4,1	0,32 - 3,91	0,60 - 11,9
Humidité	% MB	19 - 46,9	14,3 - 49,5	

4.3.2. - Caractéristiques des cendres

Différents échantillons de cendres ont été récupérés par chaufferie (voir tableau 2) :

- des cendres sous foyer avec ou sans multi-cyclone,
- des cendres de multi-cyclone,
- des cendres volantes de filtres à manches ou électrofiltres

Le tableau suivant présente les pourcentages de cendres collectés par installation (données communiquées par les sites) et leur répartition. Une chaufferie n'a pas communiqué ses données.

La proportion de cendres sous foyer est variable selon les installations : de 0,85 % à 5,27 % avec une moyenne de 1,42 % du combustible.

Les cendres sous foyer (sous foyers et multi-cyclone sauf pour 2 chaufferies) représentent en moyenne 95 % des cendres collectées dans les chaufferies, d'où l'intérêt de trouver des voies de valorisation pour ces cendres.

Tableau 6 : Répartition massique des cendres par chaufferie

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10
Cendres sous foyer		F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F	F+MC	F	F+MC	F+MC
Taux de cendre	%	1,42	2,58	NC	5,27	2,44	1,99	1,68	0,85	1,34	1,42
Cendres volantes		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM
Taux de cendre	%	0,073	0,335	NC	0,119	0,052	0,046	0,082	0,121	0,051	0,073
Ratio Cendres sous foyer / Total	%	95,1	88,5	-	97,8	97,9	97,7	95,4	87,5	96,3	95,1

F : cendres de foyer

FM : cendres de filtre à manches

F+MC : cendres de foyer et multi-cyclone

EF : cendre d'électrofiltre

Les cendres sous foyer recueillies sont constituées :

- d'un mélange de cendres sous foyer et de multi-cyclone (8 installations),
- de cendres sous foyer uniquement (2 installations : sites n°6 et 8)

Il est important de noter qu'il existe une raison technique à grouper les cendres sous foyer et les cendres sous multi-cyclone :

- d'une part, les multi-cyclones sont le plus souvent à la proximité immédiate du foyer, voire intégrés au bloc foyer+chaudière,
- d'autre part, les cendres des multi-cyclones sont incandescentes et doivent être éteintes, au même titre que les cendres sous foyer.

Le retour au sol des cendres n'est pas encadré par les normes. En effet :

- La norme « compost » NFU 44051 interdit les cendres de combustion dans sa liste positive des matières autorisées,
- La norme « engrais » NFU 42001 impose des teneurs minimales en phosphore et en potasse ($N+P_2O_5+K_2O > 7\%$ de la matière brute, $P_2O_5 > 2\%$ de la matière brute, $K_2O > 5\%$ de la matière brute) que les cendres ne peuvent atteindre.

La valorisation agronomique des cendres peut donc se faire dans le cadre d'un plan d'épandage (ou plus rarement d'une homologation). Il n'existe pas de référentiel prédéfini en termes d'éléments fertilisants pour ce dispositif réglementaire, qui exige une justification adaptée au contexte des parcelles.

Néanmoins il est avéré que les cendres apportent des éléments minéraux indispensables à la nutrition (notamment la potasse et le phosphore) et ont une valeur neutralisante (apport de calcium). Les cendres peuvent aussi contenir des éléments traces (métaux, PCB, HAP) qui peut restreindre leur retour au sol.

Pour ces éléments traces, la qualité des cendres a été évaluée d'après les référentiels suivants :

- Arrêté du 26 août 2013 pour les installations soumises à Déclaration.
- Arrêté du 24 septembre 2013 pour les installations soumises à Enregistrement,

Ces arrêtés interdisent la valorisation agronomique des cendres volantes et fixent des seuils limites pour que les cendres sous foyer puissent être valorisées via un plan d'épandage.

Cendres sous foyer

Les résultats par chaufferie sont détaillés dans les tableaux suivants. Les médianes et moyennes ont été calculées en assimilant les valeurs inférieures à la limite de quantification du laboratoire à cette dernière.

Tableau 7 : Cendres sous foyer : analyse des métaux

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)
Cr	mg/kg MS	100	62,6	47,2	431	511	499	54,3	26,5	14,8	18,0	58	176	1000
Ni	mg/kg MS	36,14	11,0	29,5	27,4	37,8	64,6	23,6	7,74	9,0	19,1	25,5	26,6	200
Cu	mg/kg MS	241,8	60,6	191	84,4	144	1656	307	28,1	36,4	86,9	115	284	1000
Zn	mg/kg MS	270,8	171	660	39,6	331	658	767	17,6	124	388	301	343	3000
As	mg/kg MS	9,59	2,9	7,4	22,1	4,6	63,1	13,8	6,3	8,1	1,72	7,7	14,0	
Se	mg/kg MS	1,07	0,50	2,2	1,08	1,82	1,08	1,23	0,86	0,65	1,46	1,1	1,2	
Mo	mg/kg MS	230,8	0,41	6,1	1,53	1,08	5,49	5,09	0,48	0,77	1,81	1,7	25,4	
Cd	mg/kg MS	0,334	3,49	6,7	0,504	8,06	0,16	2,07	0,037	0,72	4,26	1,4	2,6	10
Pb	mg/kg MS	42,5	35,3	129	15,9	17,02	399,3	142	6,93	28,6	16,9	31,9	83,3	800
Hg	mg/kg MS	<0,025	<0,025	0,054	<0,025	0,045	<0,025	0,027	<0,025	0,042	<0,025	0,025	0,032	10
Cr+Cu+Ni+Zn	mg/kg MS	648,74	305	928	583	1023	2878	1151	80	184	512	616	829	4000

(1) : valeurs limites communes à l'arrêté du 26/08/2013-Déclaration et à l'arrêté du 24/09/2013-Enregistrement en dessous desquelles l'épandage (des cendres sous-foyer uniquement) est autorisé

Tableau 8 : Cendres sous foyer : analyse des éléments organiques

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	Arrêtés
PCDD/F	ng l-TEQ/kg MS	4,89	4,00 <4,34	5,27	3,43	0,03 <0,33	65,01	2,07	0,47 <0,82	13,46	4,58	4,89	14,1	
PCB indicateurs	ng/kg MS	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0,07	0,07	0,8
Benzo(a) pyrène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	2
Benzo(b) fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	2,5
Fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,03	0,01	0,01	5

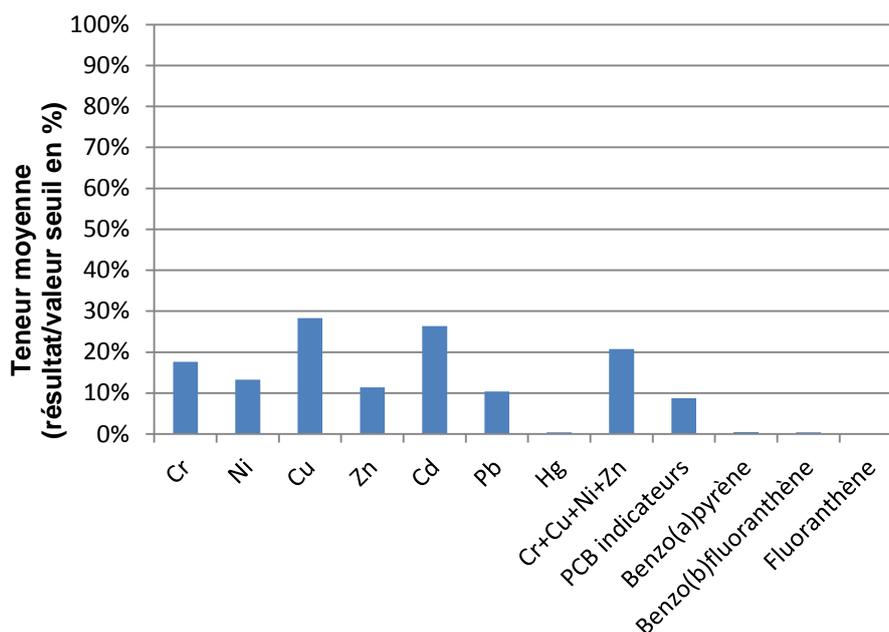
(1) : valeurs limites communes à l'arrêté du 26/08/2013-Déclaration et à l'arrêté du 24/09/2013-Enregistrement en dessous desquelles l'épandage (des cendres sous-foyer uniquement) est autorisé

On remarque que les cendres sous foyer et de multi-cyclone respectent les VLE pour les métaux et les éléments organiques (PCB, HAP) pour une valorisation agronomique. Les résultats du site 6 n'apparaissent pas représentatifs compte tenu d'une marche dégradée pendant les essais ; cela s'observe aussi par une teneur anormal de PCDD/F dans les cendres sous foyer.

Pour les PCDD/F, il n'y a pas de valeurs limites. Les teneurs sont assez faibles et proches de sols peu pollués.

La figure 7 présente en résumé les teneurs moyennes des cendres sous foyer par rapport aux seuils autorisant un épandage vis-à-vis de certains polluants. On remarque qu'en moyenne, les seuils n'imposent pas de restriction à la valorisation de ces cendres.

Figure 7 : Analyse des cendres par rapport aux seuils des arrêtés permettant l'épandage



Les teneurs en éléments échangeables avec le sol sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Valeurs fertilisantes des cendres sous foyer

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne
Humidité	%	15,0	40,7	12,1	67,0	64,8	0,1	32,7	0,0	27,7	29,6	28,7	29,0
pH		12,4	12,6	12,7	10,6	12,9	13,2	12,5	12,6	10,2	12,9	12,6	12,2
Carbone organique	g/kg MS	<5	134	37,3	273	141	<5	30,1	6,5	62,4	68,9	49,9	76,3
Matières organiques	% MS	0,43	21,6	3,6	22,5	29,6	0,2	3,3	0,7	3,6	19	3,6	10,5
C/N	-	33,3	135	77,4	414	58,3	-	177	80,3	156	46,7	80,3	130,9
P2O5	g/kg MS	8,0	10,4	28,1	19,0	31,9	12,2	13,3	14,7	6,1	30,0	14,0	17,4
Na2O	g/kg MS	21,2	1,4	6,0	10,2	4,7	51,0	11,5	12,7	5,8	2,9	8,1	12,7
CaCO3	g/kg MS	178	397	294	305	395	261	510	158	35	348	299	288
CaO	g/kg MS	17,7	30,5	26,1	31,1	48,6	33,3	48,1	14,1	6,6	26,6	28,6	28,3
MgO	g/kg MS	24,2	22,9	50,0	55,4	42,6	53,0	36,7	27,6	12,0	40,7	38,7	36,5
K2O	g/kg MS	0,84	1,714	6,45	1,74	4,209	4,759	2,40	0,54	0,44	5,10	2,07	2,8
Azote Total Kjeldahl (NTK)	g N/kg MS	0,15	0,99	0,48	0,66	2,42	<0,04	0,17	0,08	0,4	1,5	0,44	0,7
Azote organique	g N/kg MS	0,15	0,99	0,48	0,66	2,42	<0,04	0,17	0,08	0,4	1,5	0,44	0,7
Azote amoniacal	mg/kg MB	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	0,44	0,7

Les teneurs en éléments échangeables sont globalement dans la fourchette des données de référence de l'étude ADEME – Solagro 2006 pour les cendres majoritaires (analyse de 40 cendres concernant différents types de bois : propre, faiblement adjuvanté, DIB, plaquettes).

Les résultats de la chaufferie n°9 sont nettement inférieurs aux valeurs des autres chaufferies de cette campagne et du référentiel ADEME 2006.

Les teneurs en matières organiques dans les cendres sont variables : entre 0,2 et 29,6 %. La nature de ces matières organiques restent à déterminer (imbrulés ?).

Conclusion sur la valorisation et l'analyse des cendres sous foyer

La réglementation ICPE dans ces récents arrêtés type relatifs aux installations de combustion biomasse distingue les cendres volantes et les cendres sous foyer et ne catégorise pas spécifiquement les cendres issues du traitement de fumée intermédiaire par multi-cyclone. Le caractère incandescent de ces cendres et leur proximité du foyer font que dans la pratique ces cendres sont mélangées et éteintes avec les cendres provenant du foyer de la chaudière.

Les caractéristiques du mélange de ces deux types de cendres sont compatibles avec les seuils fixés pour une utilisation en épandage agricole.

Cendres volantes

Ces cendres sont des cendres collectées dans les trémies de filtres à manches (6 installations), électrofiltres (3 installations). A titre d'information sont également traitées dans ce chapitre les cendres issues d'un multi-cyclone sur une installation présentant déjà des dépassements pour ses cendres sous foyer.

Selon la réglementation précitée, ces cendres ne peuvent être valorisées par la filière de l'épandage agricole. Certaines chaufferies utilisent du broyat d'emballages bois. L'évolution de la réglementation va les faire passer à Enregistrement à moins qu'elles n'utilisent des broyats SSD. Si elles passent à Enregistrement, elles seront soumises à des VLE concernant les cendres volantes issues de la combustion de ces combustibles de type b(v).

Les tableaux suivants présentent les teneurs en métaux réalisées sur ces cendres. Les médianes et moyennes ont été calculées en assimilant les valeurs inférieures à la limite de quantification du laboratoire à cette dernière.

Tableau 10 : Cendres volantes : analyse des métaux en mg/kg MS

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)
Cr	mg/kg MS	190	350	55	433	1037	365	159	132	245	24	217	299	
Ni	mg/kg MS	67	20,3	18,0	23,2	21,6	26,7	21,0	20,1	29,3	18,9	21,3	26,6	
Cu	mg/kg MS	396	538	382	351	510	919	760	209	1121	286	453	547	
Zn	mg/kg MS	20696	11712	9659	2382	2418	11749	22156	3655	35152	6822	10686	12640	15000
As	mg/kg MS	203	135	62,2	118	24,4	462	146	106	1233	13,3	126,7	250	
Se	mg/kg MS	6,89	9,1	11,7	3,3	7,6	3,7	5,6	11,1	16,0	12,0	8,4	8,7	
Mo	mg/kg MS	1106	6,3	84,1	5,0	10,7	9,3	18,4	4,8	11,5	7,5	10,0	126,4	
Cd	mg/kg MS	74,2	104	29,3	20,0	34,6	39,1	101	15,4	160	35,2	37,1	61,3	130
Pb	mg/kg MS	5865	1466	1422	270	320	4655	5832	385	9304	307	1444	2983	900
Hg	mg/kg MS	3,74	0,036	0,176	0,556	0,074	0,84	0,238	0,16	9,69	0,142	0,21	1,57	
Cr+Cu+Ni+Zn	mg/kg MS	21349	12620	10114	3189	3986	13059	23096	4016	36547	7150	11367	13513	

(1) : valeurs limites précisées dans l'article 8 et l'arrêté du 24 septembre 2013 pour les cendres issues de combustibles type b(v)

Tableau 11 : Cendres volantes : analyse des éléments organiques et humidité

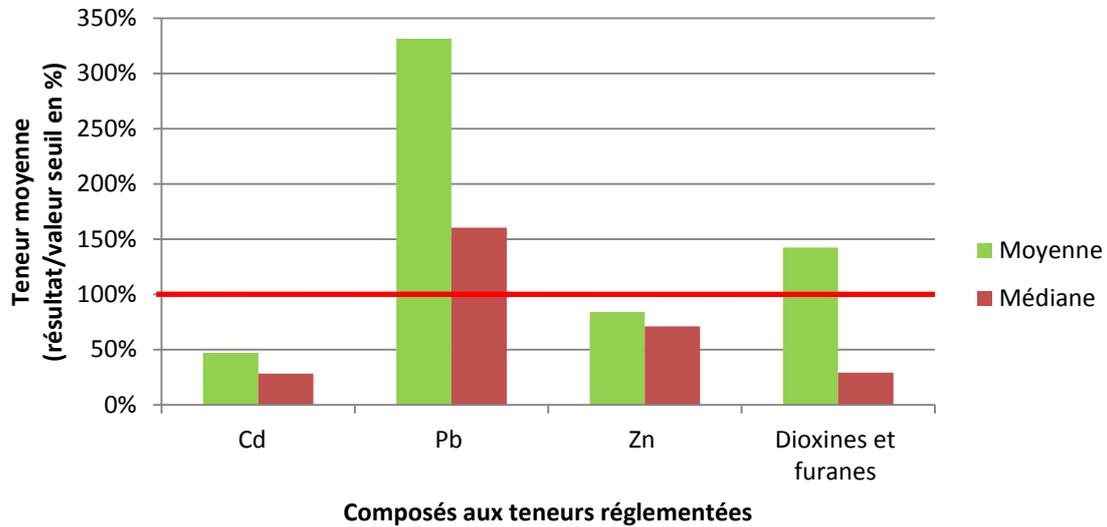
Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)
Humidité	%	0,2	0,5	0,4	17,6	6,1	0,7	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	2,7	
PCDD/F	ng I-TEQ/kg MS	1050	263	53	239	0,05 < 0,07	8505	410	68	2214	26	263	1425	1000
PCB indicateurs	ng/kg MS	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0,07	0,07	
Benzo(a)pyrène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	2,96	<0,01	0,02	0,03	55,64	<0,01	0,2	0,02	5,9	
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	0,07	<0,01	0,04	0,05	24,38	<0,01	0,35	0,03	2,5	
Fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	0,15	0,02	0,02	0,03	0,39	<0,01	40,83	0,02	0,49	0,03	4,2	

(1) : valeurs limites précisées dans l'article 8 de l'arrêté du 24 septembre 2013 pour les cendres issues de combustibles type b(v)

Les teneurs en métaux et en éléments organiques des cendres volantes dépassent nettement les teneurs dans les cendres sous foyer. Les niveaux obtenus expliquent la restriction imposée par la réglementation concernant l'épandage de ces cendres.

Les concentrations en PCDD/F de ces cendres sont variables et peuvent être élevées.

Figure 8 : Analyse des cendres par rapport aux seuils de l'arrêté PG Enregistrement



Les dépassements observés des VLE de l'article 8-II de l'arrêté du 24/09/2013 pour les cendres volantes issues de la combustion du bois de type b(v) sont les suivants :

- Dépassement de la VLE de 15000 mg/kg pour le zinc pour les sites n°1, 7 et 9,
- Dépassement de la VLE de 130 mg/kg pour le cadmium pour le site n°9,
- Dépassement de la VLE de 900 mg/kg pour le plomb pour les sites n°1, 2, 3, 6, 7 et 9,
- Dépassement de la VLE de 400 ng I-TEQ/kg pour les PCDD/F pour les sites n°1, 6 et 9,
- Dépassement des VLE sur les HAP pour le site n°8.

Ces dépassements semblent principalement liés à la volatilité des métaux dans le processus de combustion et à la formation de composés organiques. Ces éléments se condensent progressivement dans le dispositif d'épuration des fumées pour être principalement captés dans le dernier étage de filtration. Il faut rappeler que les cendres volantes constituent une faible partie des cendres collectées (se référer au tableau 6).

Pour ces chaufferies, l'arrêté du 24/09/2013 (article 12) imposerait une information des installations classées et le doublement de la fréquence d'analyse des combustibles utilisés et des cendres volantes jusqu'à avoir deux analyses consécutives conformes.

Radioactivité des cendres

La radioactivité a été recherchée selon les indices suivants : activité α globale et activité β globale. Une spectrométrie gamma a aussi été réalisée pour identifier les composés radioactifs présents qui sont classés en deux catégories : éléments présents de façon naturelle dans les matériaux et le césium 137 provenant des expérimentations humaines (essais nucléaires et incident de Tchernobyl).

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant. Les médianes et moyennes ont été calculées en assimilant les valeurs inférieures à la limite de quantification du laboratoire à cette dernière.

Tableau 12 : Radioactivité des cendres

	Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne
Cendres sous foyer			F+M	F+M	F+M	F+M	F+M	F	F+M	F	F+M	F+M		
Radio activité globale	R α	Bq/kg	-	110	115	115	80	190	100	140	110	125	115	121
	R β	Bq/kg	-	1300	1740	1300	900	2900	1100	2000	1300	1200	1300	1527
Radio activité naturelle	K40	Bq/kg	1250	1100	1900	750	420	2300	800	1700	820	940	1020	1198
	Chaîne Th 232	Bq/kg	787	330	306	417	312	369	180	320	360	273	325	365
	Chaîne U 238	Bq/kg	134	97	69,8	139	82	85	46	120	86	22,2	85,5	88,1
Radio activité naturelle	Cs 137	Bq/kg	14,6	9,1	52	7,1	2,4	50	13	6,3	5,6	37	11,1	19,7
Cendres volantes			FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM	0	0
Radio activité globale	R α	Bq/kg	650	2430	1260	700	1600	280	950	1260	2400	1360	1260	1289
	R β	Bq/kg	4900	15000	14400	6000	12400	2700	9000	5400	22000	10000	9500	10180
Radio activité naturelle	K40	Bq/kg	3140	11000	13000	4800	11000	2000	6600	3700	5600	8000	6100	6884
	Chaîne Th 232	Bq/kg	1004	3544	1644	2200	2051	475	2674	2141	16990	1927	2096	3465
	Chaîne U 238	Bq/kg	190	90	20	221	154	82	44	88	100	26	89	101
Radio activité naturelle	Cs 137	Bq/kg	102	160	370	77	80	86	340	11	130	420	116	178

F : cendres de foyer

F+MC : cendres de foyer et multi-cyclone

FM : cendres de filtre à manches

EF : cendre d'électrofiltre

On remarque que les cendres recueillies dans les trémies des électrofiltres et des filtres à manches en épuration finale présentent des niveaux de radioactivité nettement supérieurs aux cendres sous foyer ou cendre sous foyer et multi-cyclone ; il est par ailleurs difficile de distinguer l'impact du multi-cyclone sur le contenu du mix de cendre.

La combustion a pour effet de concentrer la radioactivité dans les cendres puisque la majorité des éléments ont une température d'ébullition supérieure à la température du foyer de chaudière. La radioactivité se concentre aussi dans les particules fines collectées en fin de chaîne d'épuration, phénomène déjà constaté dans d'autres industries.

On observe ainsi :

- Radioactivité α : des niveaux de 100 à 190 Bq/kg dans les cendres sous foyer et 280 à 2400 Bq/kg dans les cendres volantes,
- Radioactivité β : des niveaux de 1100 à 2900 Bq/kg dans les cendres sous foyer et 2700 à 22000 Bq/kg dans les cendres volantes,
- K40 : des niveaux de 420 à 2300 Bq/kg dans les cendres sous foyer et 2000 à 13000 Bq/kg dans les cendres volantes.

Pour d'autres composés comme le Césium 137, on observe des valeurs similaires pour les deux types de cendre.

L'étude réalisée en 2007 avait concerné des mélanges de cendre et comme il y avait majoritairement des installations avec uniquement un multi-cyclone en traitement de fumée, les valeurs trouvées en 2007 s'apparentent aux cendres sous foyer de cette étude.

Les résultats obtenus en 2014 sont cohérents avec les résultats trouvés en 2007 (voir tableau ci-dessous pour les principaux composés).

Tableau 13 : Comparaison de la radioactivité des cendres avec l'étude de 2007

Etude	R α Bq/kg	R β Bq/kg	K40 Bq/kg	Cs 137 Bq/kg
2014	100 à 190	1100 à 2900	420 à 2300	2,4 à 52
Séchaud 2007	72 à 742	230 à 3730	809 à 4090	3,4 à 225

Il n'existe pas de valeurs limite pour la radioactivité des matériaux. Toutefois, suite à l'incident de Tchernobyl, des valeurs limites ont été spécifiées dans certaines denrées alimentaires dont le césium 137 (arrêté du 31 mai 2006). Une valeur limite de 370 Bq/kg a été introduite pour l'importation de produits laitiers et de 600 Bq/kg pour l'importation d'autres produits. Les valeurs trouvées dans les cendres sont inférieures à ces seuils. A titre indicatif, la teneur en césium 137 de certains sols du tiers-est de la France peut atteindre 200 Bq/kg.

La radioactivité mesurée est légèrement supérieure à la radioactivité trouvée dans les matériaux naturels pour les cendres sous foyer sans toutefois atteindre des valeurs importantes.

Pour les cendres volantes issues de filtration finale, la radioactivité est nettement plus élevée. Des risques de déclenchement de portails de détection radioactifs des CET peuvent exister si ce type de cendre constitue le lot majoritaire d'un camion entrant dans un centre (les seuils de réglage des CET sont de l'ordre de 0,5 μ Sv/h à 1 μ Sv/h).

4.3.3. - Rejets atmosphériques

Les rejets atmosphériques ont été mesurés à la cheminée des installations selon le protocole précisé dans l'annexe 1.

Les principaux résultats concernant les rejets atmosphériques sont présentés dans les tableaux suivants, hors métaux qui sont présentés plus loin. Le détail des analyses réalisées est reporté dans les annexes spécifiques à chaque chaudière. Les chaufferies sont regroupées par groupe de couleur avec leur arrêté correspondant. Il est aussi précisé le type d'épuration finale utilisé (FM : filtre à manches, EF : électrofiltre et MC : multi-cyclone). Une installation (site n°10) est équipée d'un système de récupération d'énergie par condenseur à la sortie du filtre à manche qui participe à l'épuration des fumées.

Emissions de poussières et de particules fines

Le tableau suivant présente les rejets de poussières et de particules fines.

Tableau 14 : Emissions de particules ramenées à 6 % O₂

Paramètres mesurés	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Mediane	Moyenne	VLE 1	VLE 2	VLE 3
		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM					
Poussières	mg/m ³	1,70	6,6	0,3	10,2	14,0	34,8	18,3	238	2,0	0,3	8,4	32,6	50	50	30
PM10	mg/m ³	1,70	3,2	0,3	9,1	14,0	9,2	17,4	236	2,0	0,3	6,2	29,3			
PM2.5	mg/m ³	ND	2,4	ND	6,7	9,8	3,7	4,6	200	ND	ND	5,6	37,9			
PM1	mg/m ³	ND	1,8	ND	2,9	2,0	1,0	1,8	182	ND	ND	1,9	31,9			
Carbone organique	µg/m ³	122	446	19	859	722	5725	222	3423	28,2	18,4	334	1158			

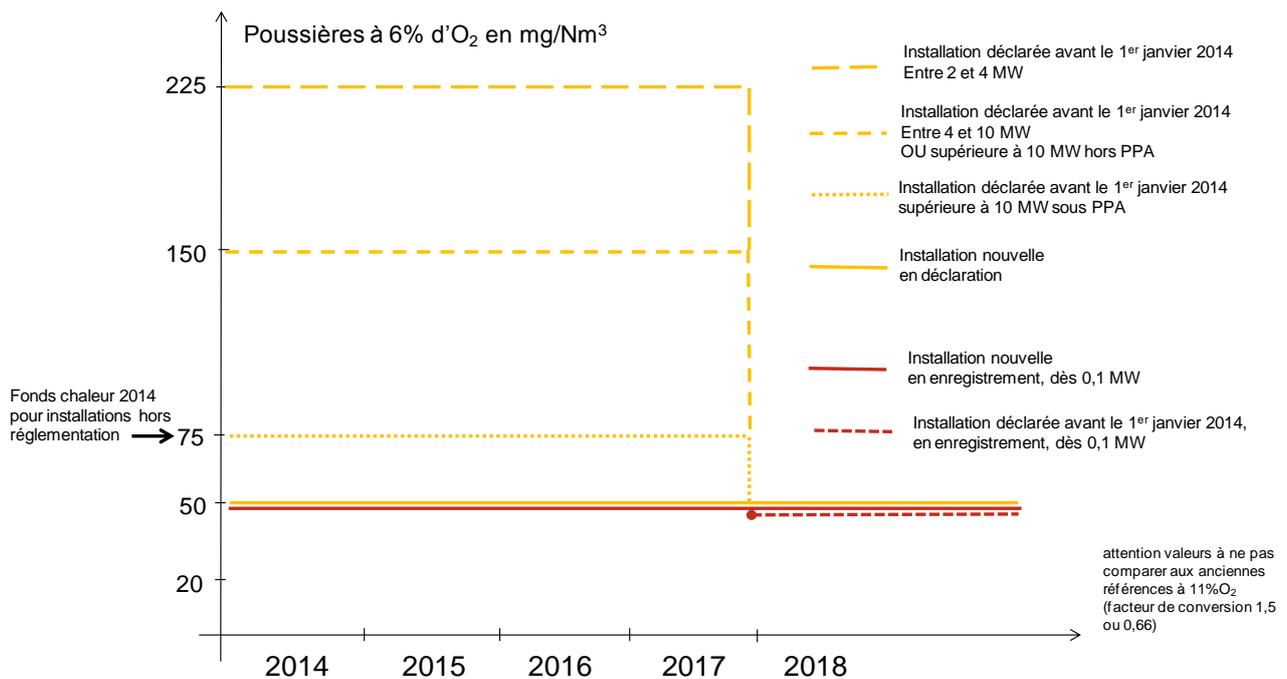
VLE 1 : arrêté du 26/08/2013 – Déclaration à l'horizon 2018 ou pour les nouvelles installations

VLE 2 : arrêté du 14/09/2013 – Enregistrement à l'horizon 2018 ou pour les nouvelles installations

VLE 3 : arrêté du 26/08/2013 – Autorisation

La réglementation a programmé une évolution des niveaux de rejet dans les années à venir pour les installations soumises à déclaration ou enregistrement :

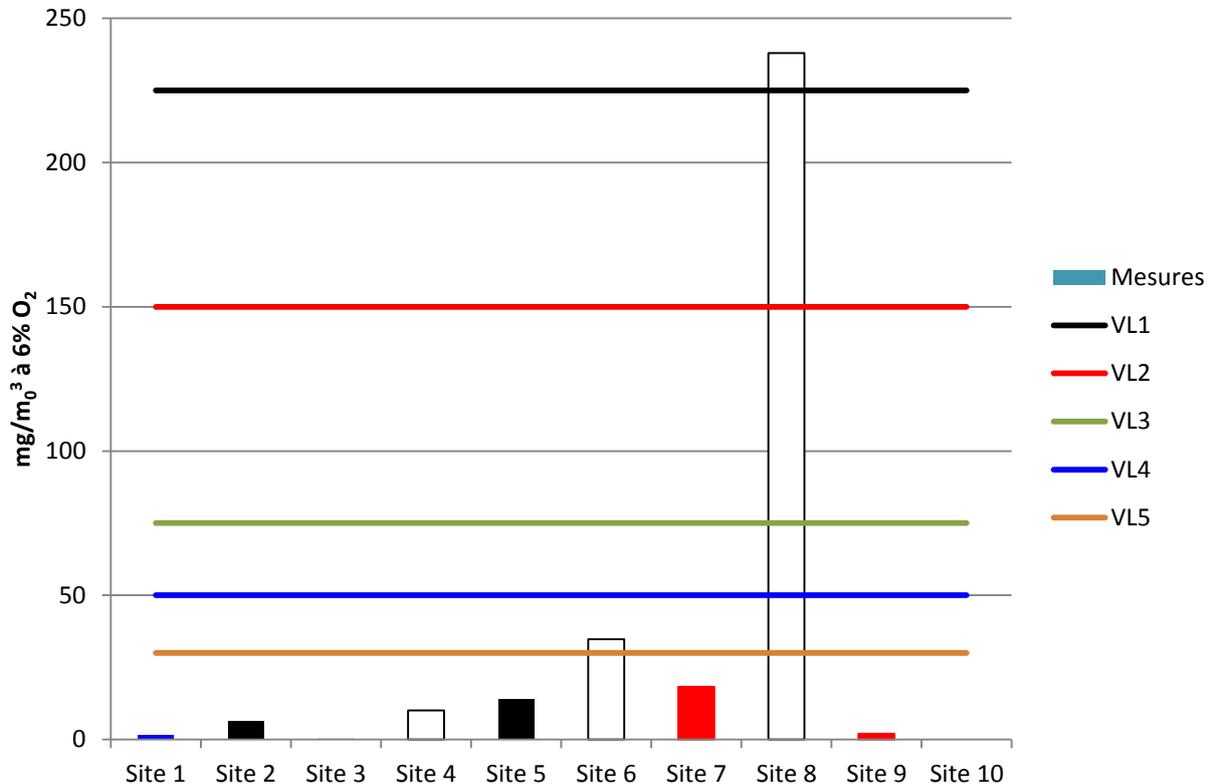
Figure 9 : Evolution des niveaux réglementaires de rejets de poussières



Il faut par ailleurs mentionner que pour les zones PPA, des valeurs limites plus sévères peuvent être imposées.

La figure 10 présente les rejets de poussières et montre que globalement, hors un point très élevé, les rejets de poussières sont bien maîtrisés sur les installations et conformes à la réglementation et à son évolution (les chaufferies actuelles soumises à Déclaration ou celles qui passeront à Enregistrement seront soumises à une VLE de 50 mg/m_0^3 à 6% O_2 à l'horizon 2018.). Les deux chaufferies soumises à autorisation sont caractérisées par des rejets particulièrement bas.

Figure 10 : Emissions de poussières



VL1 : Installations déclarées avant le 1^{er} janvier 2014 entre 2 et 4 MW

VL2 : Installations déclarées avant le 1^{er} janvier 2014 entre 4 et 10 MW ou supérieure à 10 MW hors PPA

VL3 : Installations déclarées avant le 1^{er} janvier 2014 supérieures à 10 MW sous PPA

VL4 : Installations soumises à déclaration ou enregistrement dès 0,1 MW (installations existantes à partir de 2018)

VL5 : Installations soumises à autorisation hors PPA

La chaufferie n°8 présente des rejets qui sont élevés et traduisent un mauvais réglage de l'électrofiltre et/ou une mauvaise maîtrise de la combustion, confirmée par une teneur en O_2 élevée dans les fumées. Cette teneur en O_2 élevée pénalise les résultats de la chaufferie lorsqu'ils sont ramenés à 6% O_2

Toutes les chaufferies respectent leurs valeurs réglementaires, la chaufferie présentant un important écart n'étant pas soumise à une VLE poussières (hors ICPE). A l'exception des deux chaufferies soumises à Autorisation, toutes les chaufferies devront respectées à l'horizon 2018 une VLE de 50 mg/m_0^3 à 6 % O_2 (VL4 sur le graphe). On remarque qu'elles respecteront sans difficulté cette VLE à l'exception du site n°8 pour les raisons évoquées ci-dessus.

On peut noter que la chaufferie n°6 respecterait une VLE de 50 mg/m_0^3 avec seulement un multi-cyclone comme dépoussiérage. Ce résultat a été obtenu avec un faible taux de charge (30 %) et il n'est pas certain que ce niveau de concentration soit maintenu si la charge augmente.

Les rejets de poussières sont caractérisés par une proportion importante de particules fines : les PM10 représentent 90 % en moyenne des rejets. Pour quatre chaufferies il n'a pas été possible de faire des mesures à causes de rejets de poussières très faibles à la sortie de filtres à manches. Dans ce cas, nous considérons que l'intégralité des rejets est sous forme de PM10.

Pour les 6 autres chaufferies, les rejets de PM2.5 représentent 41 % des poussières totales et les PM1 17 % des poussières totales.

Le tableau suivant présente les résultats par type d'épuration. Le site n°6 a été écarté de cette synthèse à cause du fonctionnement dégradé de l'électrofiltre pendant les essais.

Les rejets moyens des filtres à manches sont en dessous de 5 mg/m_0^3 . Les électrofiltres suivent avec 12 mg/m_0^3 mais avec seulement 2 unités prises en comptes. On remarque évidemment que les rejets issus du multi-cyclone sont plus importants qu'après électrofiltre ou filtre à manches.

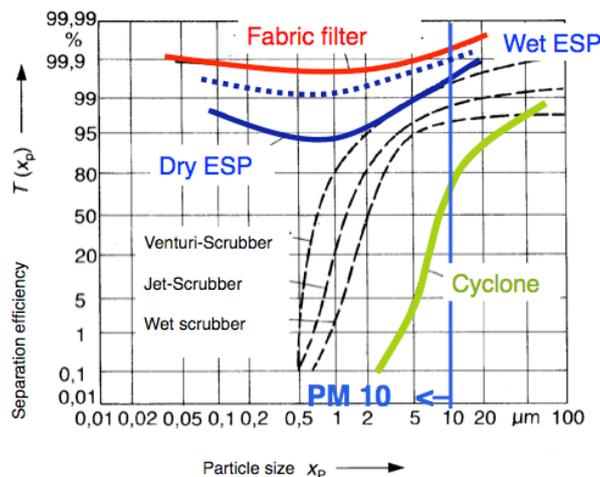
Tableau 15 : Rejets de particules par type de filtration

Paramètres mesurés	Unité	Moyenne 9 unités	Electrofiltre (2 unités)	Filtre à manches	Multi-cyclone (1 unité)
Poussières	mg/m_0^3 sec	9,8	12,1	4,9	35
PM10	%	84	95	91	26
PM2.5*	%	41	68	30	11
PM1*	%	17	21	19	3

* : résultats sur 2 unités pour PM2.5 et PM1

Normalement les filtres à manches sont plus performants que les électrofiltres sur les petites particules (cf. graphe ci-dessous).

Figure 11 : Performances de filtration en fonction de la taille des particules



Source : évaluation technico-économique des systèmes de réduction des émissions de particules des chaudières biomasse, ADEME, juin 2012

Dans le cas présent, les PM2.5 et PM1 n'ont été mesurés que sur 2 unités pour les filtres à manches : celles qui avaient les rejets les plus élevées et permettaient une mesure massique des particules fines émises. On observe alors que la granulométrie est supérieure à celle des deux électrofiltres : ce phénomène peut provenir de manches moins étanches que sur les installations les plus performantes laissant passer des agrégats de particules.

Emissions de métaux

Le tableau suivant présente les rejets de métaux avec les mêmes conventions de couleur.

Les valeurs limites des différents arrêtés sont respectées sur tous les sites. On remarque aussi ici que les petites chaufferies se distinguent par des émissions en concentration particulièrement élevées (sites n°6 et 8).

Tableau 16 : Emissions de métaux ramenées à 6 % O₂

Paramètres mesurés	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Mediane	Moyenne	VLE1	VLE 2	VLE3
Filtration finale		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM					
CrVI	µg/m ³	0,5	0,8	0,7	9,4	9,3	1,0	1,0	5,6	0,4	0,5	0,9	2,9			
V	µg/m ³	3,7	3,3	2,6	2,1	3,6	5,7	8,7	11,8	2,9	1,2	3,5	4,6			
Cr	µg/m ³	4,2	5,8	3,8	15,6	20,6	27,1	10,6	52,2	6,6	2,2	8,6	14,9			
Mn	µg/m ³	128	116	5,6	170	68,9	2909	120	258	133	10,3	124	392			
Co	µg/m ³	3,6	2,2	2,5	2,0	3,5	5,2	8,7	8,0	2,8	1,2	3,2	4,0			
Ni	µg/m ³	3,7	3,4	3,0	5,2	25,2	9,6	33,7	12,4	4,8	1,5	5,0	10,2			
Cu	µg/m ³	23,6	9,4	3,1	37,0	16,3	155,5	22,7	53,3	44,7	1,4	23,2	36,7			
Zn	µg/m ³	158	226	42	192	107	8133	343	1021	214	16	203	1045			
As	µg/m ³	1,0	1,5	0,6	6,2	0,9	113,8	3,9	28,5	2,8	0,2	2,2	15,9			
Se	µg/m ³	7,2	4,5	5,0	3,9	6,9	10,8	17,2	15,9	5,5	2,4	6,2	7,9			
Cd	µg/m ³	9,4	1,4	16,4	8,5	1,3	25,0	2,5	15,1	3,1	1,6	5,8	8,4		50	50
Sn	µg/m ³	3,7	2,2	3,0	2,4	3,5	27,1	10,7	18,2	4,0	1,4	3,6	7,6			
Sb	µg/m ³	3,9	2,4	2,6	2,1	3,5	55,9	9,9	12,1	3,5	1,2	3,5	9,7			
Te	µg/m ³	3,6	2,3	2,5	1,9	3,4	5,4	8,6	7,0	2,7	1,2	3,1	3,9			
Tl	µg/m ³	3,6	2,6	2,5	2,2	3,5	6,1	8,9	9,1	2,9	1,2	3,2	4,3		50	50
Pb	µg/m ³	25	52	4	24	12	2951	94	220	37	1	30,7	342		1000	1000
Hg	µg/m ³	0,0	13,6	0,2	1,0	0,8	7,6	6,5	7,9	6,3	0,1	3,6	4,4		50	50
Groupe I	µg/m ³	13,0	17,6	19,1	11,7	5,6	38,8	17,9	32,1	12,3	2,9	15,3	17,1		100	100
Groupe II	µg/m ³	11,8	8,3	8,1	12,1	11,2	129,9	29,8	51,4	11,0	3,8	11,5	27,7		1000	1000
Groupe III	µg/m ³	24,8	52,1	4,4	23,9	11,7	2951	93,7	220,4	36,6	1,0	30,7	342		1000	1000
Groupe IV	µg/m ³	332	371	68	428	252	11328	567	1447	416	36	394	1525		20000	20000

VLE 1 : arrêté du 26/08/2013 – Déclaration

VLE 2 : arrêté du 14/09/2013 – Enregistrement

VLE 3 : arrêté du 26/08/2013 – Autorisation

On remarque des teneurs élevées en métaux dans les rejets pour le site n°6 : ces émissions sont en relation avec les teneurs élevées mesurées dans les combustibles : ce site n'étant par ailleurs équipé que d'un multi-cyclone.

A l'inverse on remarque que les sites équipés de systèmes de filtration performants, ont des teneurs faibles en métaux.

Le tableau suivant présente pour les principaux métaux émis les valeurs moyennes par type de filtration. Le site n°8 a été écarté de cette synthèse à cause du fonctionnement dégradé de l'électrofiltre pendant les essais.

Tableau 17 : Rejets de métaux par type d'épuration

Paramètres mesurés	Unité	Moyenne 9 unités	Electrofiltre (2 unités)	Filtre à manches (6 unités)	Multi-cyclone (1 unité)
Cr	µg/m ³ sec	11	18	5,5	27
Mn	µg/m ³ sec	407	120	85	2909
Ni	µg/m ³ sec	10	15	8,3	10
Cu	µg/m ³ sec	35	27	18	156
Zn	µg/m ³ sec	1048	149	166	8133
As	µg/m ³ sec	15	3,6	1,7	114
Cd	µg/m ³ sec	7,7	4,9	5,7	25
Sb	µg/m ³ sec	9,4	2,8	3,9	56
Pb	µg/m ³ sec	355	18	35,4	2951
Groupe I	µg/m ³ sec	15	9	14	39
Groupe II	µg/m ³ sec	25	12	12	130
Groupe III	µg/m ³ sec	355	18	35	2951
Groupe IV	µg/m ³ sec	1533	340	298	11328

Comme pour les rejets de poussières, on note la bonne efficacité des filtres à manches et des électrofiltres. Le résultat pour le multi-cyclone lié au fonctionnement de l'installation du site n°6 est peu représentatif.

Emissions de gaz majeurs et aérosols acides

Tableau 18 : Emissions de gaz majeurs et aérosols acides ramenées à 6 % O₂

Paramètres mesurés	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Mediane	Moyenne	VLE 1	VLE 2	VLE 3	VLE 4
DENOX		-	-	SNCR	Conception bas NOx	-	-	-	-	-	-						
CO ₂	% vol sec	14,6	14,9	14,5	15,0	14,5	14,4	14,8	14,5	14,2	14,4	14,5	14,6				
CO	mg/m ₀ ³	32,8	69,0	8,9	1,9	23,3	140	20,8	324	30,8	266	31,8	91,8	250	250	250	200
NOx	mg/m ₀ ³	568	330	190	234	188	486	406	376	494	347	361	362	750	525	525	400
SO ₃	mg/m ₀ ³	0,03	0,1	0,3	0,2	0,5	0,05	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2				
SO ₂	mg/m ₀ ³	21	0,21	19	0,3	1,2	7,3	4,6	22	22	0,1	6,0	9,8	300	225	225	200
HF	mg/m ₀ ³	0,2	0,3	0,1	0,1	80,8	0,4	0,6	0,3	2,0	0,1	0,3	8,5			25	5-25
HCl	mg/m ₀ ³	3,5	0,5	4,4	0,9	1,3	0,1	35,1	9,3	8,9	1,4	2,4	6,5			30	10-30

VLE 1 : Déclaration pour les installations démarrées avant le 01/01/2014

VLE 2 : Déclaration pour les nouvelles installations

VLE 3 : Enregistrement pour les nouvelles installations

VLE 4 : Autorisation

Pour les paramètres reportés ci-dessus, on retrouve un dépassement de VLE :

- Au site n°10 pour le CO : ce dépassement est étonnant, car il devrait être le signe d'une mauvaise combustion. Hors la chaufferie présentait de bons réglages lors des essais (teneur en O₂ et CO₂ correctes par ailleurs). Cette chaufferie est équipée d'un condenseur et rejette ses fumées à 57 °C lors des essais, il serait intéressant d'investiguer plus en avant l'incidence du condenseur sur la composition chimique des fumées.

Les émissions de SO₃ sont à la limite de quantification et HF est en dessous de 1 mg/m₀³ (à l'exception de du site n°5 où la valeur d'HF paraît singulière et mériterait d'être confirmée). Les rejets de HCl et SO₂ sont plus variables, entre 0,1 et 35 mg/m₀³ pour HCl et entre 0,3 et 22 mg/m₀³ pour SO₂.

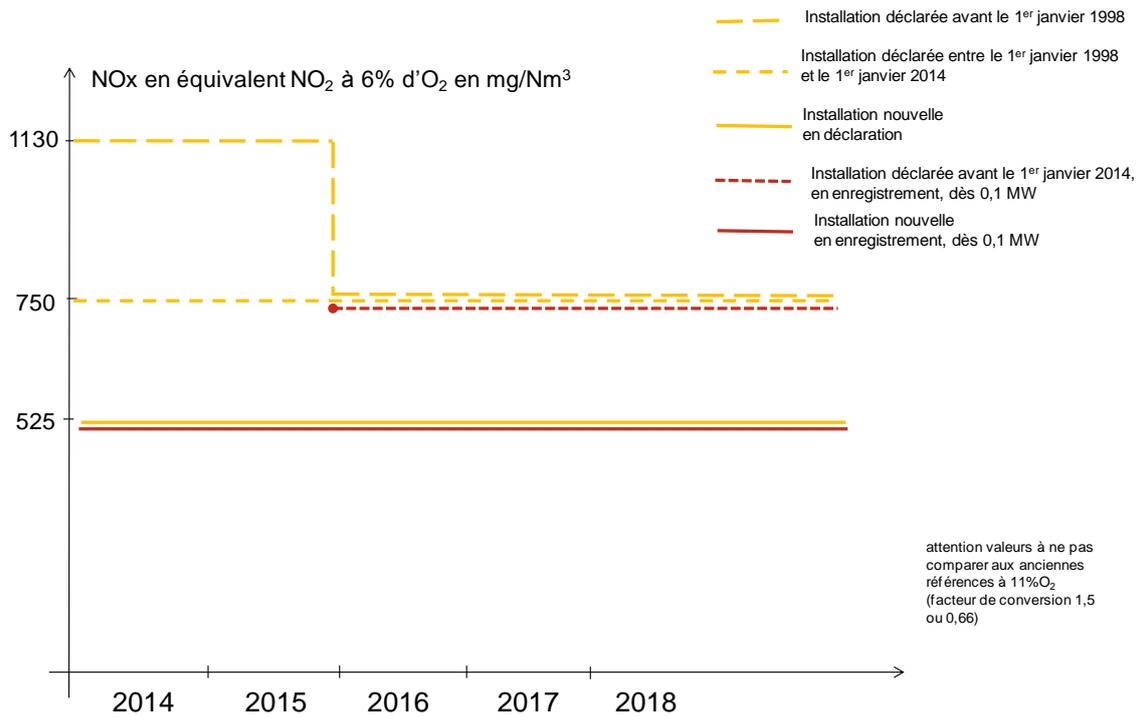
Les émissions de CO₂ sont stables ramenées à 6 % O₂ et traduisent des modes de combustion identiques quelque soit la taille des chaufferies.

Les rejets de CO varient selon les installations. Ils sont généralement assez faibles sauf aux sites n°8 et 10 et dans une moindre mesure au site n°6. Pour les sites n°6 et 8, le taux de charge était très faible pendant les mesures et la combustion mal réglée. Pour le site n°10, c'est le seul point négatif observé sur cette chaufferie bien dimensionnée et suivie (cf. ci-dessus).

Les émissions de NOx varient entre 188 et 568 mg/m₀³, et sont inférieures pour tous les sites à la réglementation.

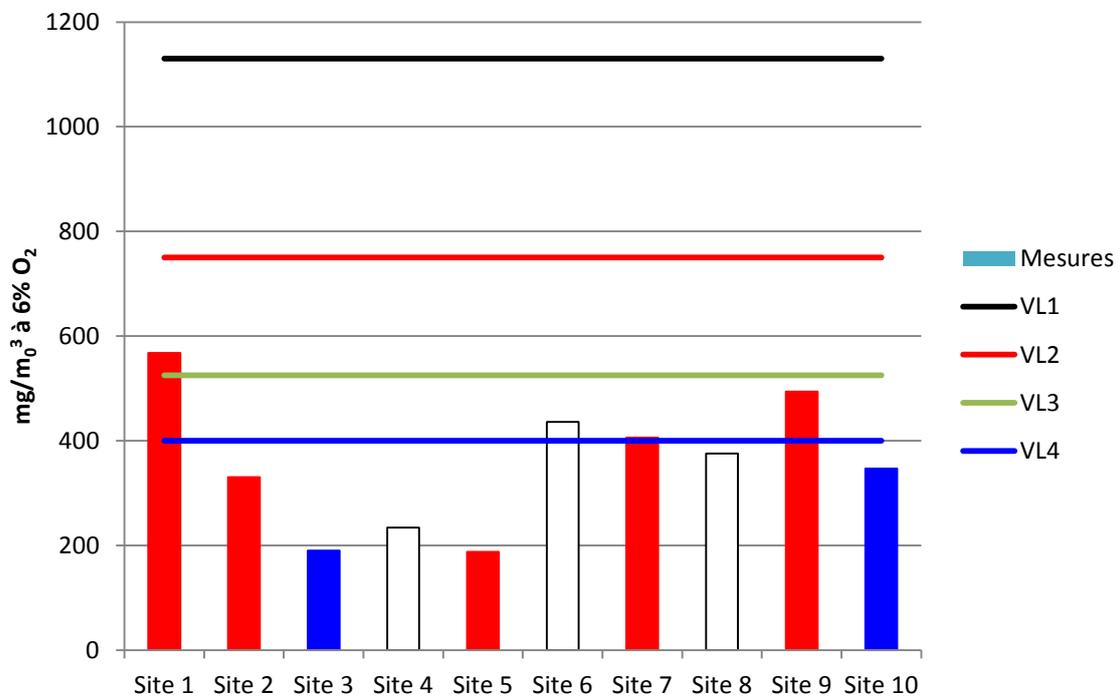
On remarque que trois chaufferies ont des émissions de l'ordre de 200 mg/m₀³ (sites n°3, 4, 5). Pour le site n°3, ce résultat est obtenu avec un système DENOX lui permettant de respecter son arrêté préfectoral avec une VLE de 200 mg/m₀³. Pour le site n°4, il semble que ce bon résultat soit obtenu à partir de la conception particulière de la chaudière limitant les émissions de NOx. Pour le site n°5, nous n'avons pas identifié de paramètres spécifiques expliquant ce bon résultat par rapports aux autres chaufferies.

Figure 12 : Evolution des niveaux réglementaires des rejets de NOx



La figure 13 présente ces émissions par chaudière avec les différentes VLE. Toutes respectent leur valeur limite quand elles existent.

Figure 13 : Emissions de NOx



VL1 : Installations déclarées avant le 1^{er} janvier 1998
 VL2 : Installations déclarées avant le 1^{er} janvier 2014
 VL3 : Installations soumises à déclaration ou enregistrement dès 0,1 MW après le 1^{er} janvier 2014
 VL4 : Installations soumises à autorisation hors PPA

Emissions de composés organiques

Cette rubrique regroupe de nombreux composés mesurés au cours de cette campagne :

- les gaz COVNM et CH₄,
- les rejets de PCDD/F,
- les rejets de PCB coplanaires et indicateur,
- l'hexachlorobenzène HCB,
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP,
- le levoglucosan et ses isomères,
- le carbone organique et le carbone élémentaire mesuré sur les filtres.

Les PCDD/F sont exprimés en équivalent toxique (I-TEQ) selon le référentiel NATO-CCMS utilisé pour les rejets à l'émission dans les réglementations française et internationale.

Les PCB coplanaires sont exprimés en équivalent toxique (OMS-TEQ) selon le référentiel OMS.

Les HAP ont été quantifiés selon la norme française à l'émission NFX-43329 (prise en compte de 8 HAP). Les différents textes réglementaires français concernant les émissions atmosphériques se réfèrent à cette norme.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 19 : Emissions de composés organiques ramenés à 6 % O₂

Paramètres mesurés	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Mediane	Moyenne	VLE 1	VLE 2	VLE 3
		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM					
COVNM	mg/m ₀ ³	5,7	0,8	0,7	0,2	0,8	67	1,7	4,8	1,6	0,7	1,2	8,4	50	50	50
CH ₄	mg/m ₀ ³	0,2	0,1	0,5	0,2	0,2	1,8	0,3	2,3	0,1	0,2	0,2	0,6			
PCDD/F	ng/m ₀ ³ I-TEQ	0,009	0,003	0,003	0,009	0,331	7,900	0,017	1,477	0,007	0,005	0,009	0,976	0,1	0,1	0,1
PCB Dioxin-Like	ng/m ₀ ³ OMS-TEQ	0,001	0,001	0,001	0,001	0,007	0,185	0,001	0,051	0,001	0,001	0,001	0,025			
PCB indicateurs	ng/m ₀ ³	14,5	7,4	16,9	10,6	26,3	5,3	15,1	45,7	11,5	20,9	14,8	17,4			
HCB	µg/m ₀ ³	0,011	0,009	0,004	0,010	0,025	0,007	0,009	0,026	0,005	0,04	0,010	0,014			
TOTAL HAP8	µg/m ₀ ³	3,51	0,44	0,18	0,83	7,74	0,70	0,86	141,6	7,57	1,95	1,4	16,5		100	10
Levoglucosan et isomères	µg/m ₀ ³	0,09	9,46	0,15	5,7	4,81	14,9	9,9	167	0,39	0,12	4,7	166			
Levoglucosan et isomères	mg/kg pous.	56	1435	429	563	344	407	540	700	193	434	581	12873			
Carbone élémentaire	µg/m ₀ ³	68	446	9,3	358	256	4089	33	12121	14,1	9,2	162	1740			
Carbone organique	µg/m ₀ ³	122	446	19	859	722	5725	222	3423	28,2	18,4	334	1158			

VLE 1 : arrêté du 26/08/2013 – Déclaration

VLE 2 : arrêté du 14/09/2013 – Enregistrement

VLE 3 : arrêté du 26/08/2013 – Autorisation

Toutes les installations respectent leur VLE sauf le site n°5 qui dépasse légèrement le seuil de 0,1 ng/m₀³ I-TEQ pour les PCDD/F. Pour ce site, il n'a pas été trouvé d'explication rationnelle à cette valeur car les émissions des autres composés organiques (HAP, COV) sont faibles.

Les PCB coplanaires sont à des teneurs très faibles et la somme des 7 PCB indicateurs en dessous de 50 ng/m₀³ pour toutes les chaufferies.

L'hexachlorobenzène a été recherché dans les émissions. Ce composé n'a pas été détecté.

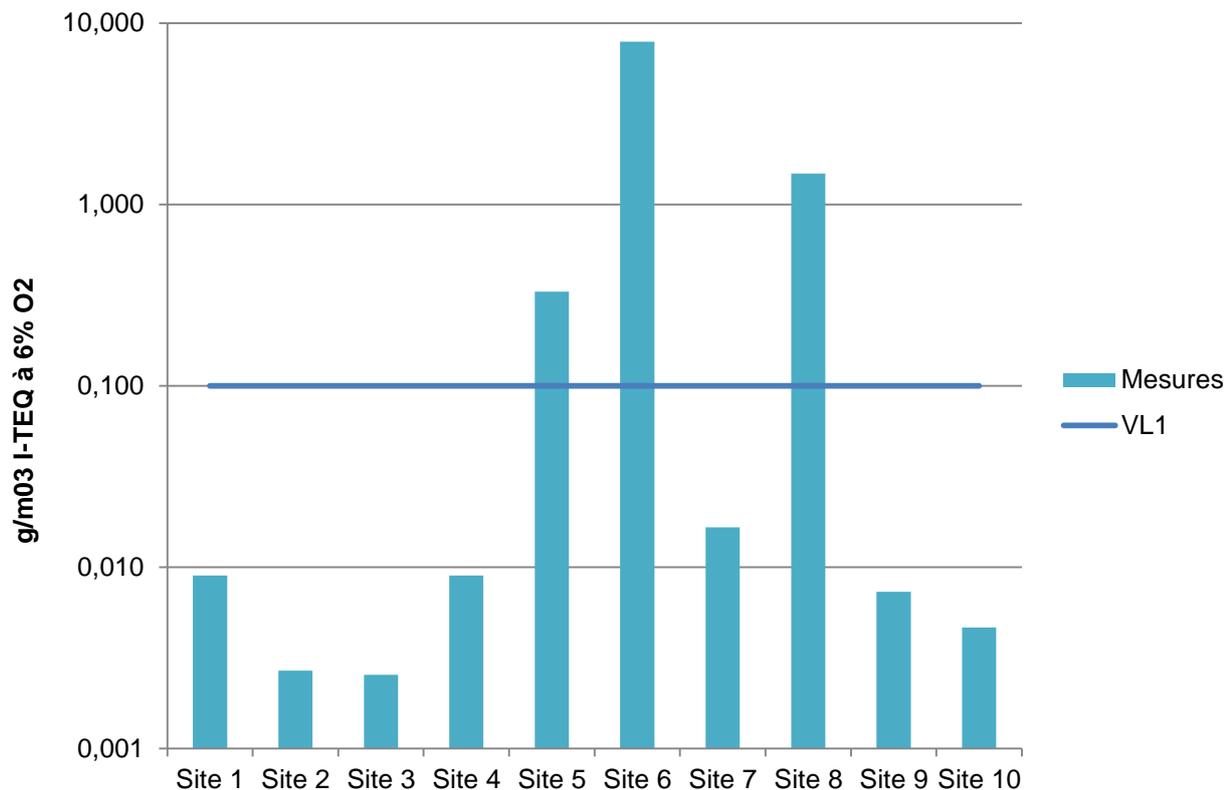
Les rejets de HAP (8) sont plus dispersés. Une installation dépasse 100 µg/m₀³ : site n°8 avec 141 µg/m₀³.

Les rejets de carbone élémentaire et organiques sont variables mais du même ordre de grandeur par chaudière. Ils sont plus élevés sur les deux installations ayant les émissions de particules les plus élevées : sites n°6 et 8.

La méthode d'analyse du levoglucosan a été développée au cours de l'étude par le laboratoire Micropolluants-Technologies. La méthode développée est précisée dans l'annexe 1. Les résultats présentés dans le tableau 21 concernent le levoglucosan et ses isomères : il n'a pas été possible de séparer les pics des différents isomères au cours de l'analyse.

La figure 14 présente les rejets de PCDD/F. On peut remarquer que les petites chaufferies (sites n°6, et 8) se démarquent des autres avec des rejets élevés. Le site n°5 dépasse légèrement sa VLE. Les sites actuels soumis à Déclaration et qui pourraient passer à Enregistrement respectent la VLE de 0,1 ng I-TEQ/m³.

Figure 14 : Emissions de PCDD/F



VL1 : valeur limite pour les installations soumises à enregistrement ou autorisation

Pour les sites n°6 et 8, les valeurs élevées des rejets de PCDD/F semblent principalement liées aux mauvaises conditions de combustion pendant les mesures liées à un faible taux de charge. Pour le site n°6, une formation de novo est aussi possible compte tenu de la teneur élevée en cuivre des cendres (formation possible à partir de structures macromoléculaires issues d'une combustion incomplète et riches en éléments carbonés avec présence de chlore).

Pour le site n°5, nous notons aussi une valeur élevée de HAP8. Une analyse plus fine de la combustion est à réaliser si le résultat trouvé au cours de cette étude est confirmé par une autre mesure.

4.3.4. - Relations entre les émissions et la marche des installations

Les émissions observées dépendent pour de nombreux paramètres :

- des conditions de combustion dans le corps de chauffe,
- des caractéristiques des combustibles utilisées,
- des performances des dispositifs d'épuration (principalement électrofiltres ou filtres à manches).

Pour les chaufferies ayant de bonnes conditions de combustion, des épurations performantes et de biomasses de qualité (par exemple sites 3, 4 et 10). Il est difficile de trouver des relations entre les combustibles et les émissions.

Pour d'autres chaufferies, on peut identifier des relations qui pourraient nécessiter des plans d'action pour être corrigées.

- La chaufferie n°6 se distingue par des émissions atmosphériques élevées de métaux : ces émissions sont liées pour partie à la charge métallique introduite par les combustibles (la teneur en plomb des entrants est particulièrement élevée) et par le système d'épuration peu performant : les rejets de métaux volatiles comme Zn et Pb sont très élevés. Par ailleurs, le chlore joue un rôle sur les émissions de métaux : une augmentation de la teneur en chlore des déchets favorisant une plus forte volatilisation de certains métaux lors de la combustion
- Le taux de chlore de la biomasse est un paramètre important mais pas déterminant sur les émissions de dioxines et furanes : la forme dans laquelle il se trouve organique ou minérale, la présence de précurseurs organiques (structures aromatiques telles que dérivées du benzène ou HAP) jouant un rôle plus important. Comme l'indique les essais menés sur des biomasses plus riches en chlore que le bois naturel, il semble que le taux de chlore doit être élevé, supérieur à 1500 mg/kg, pour être à l'origine d'une augmentation franche des émissions de dioxines. Dans le cas présent, on identifie deux chaufferies ayant des rejets élevés de PCDD/F : sites n° 6 et 8. Pour ces deux chaufferies, l'origine des émissions semble plutôt à rechercher dans les conditions de combustion des installations au moment des mesures (faibles taux de charge, instabilités dans les réglages) plutôt que dans la nature des combustibles.

4.4. - SYNTHÈSE DES ÉVALUATIONS PAR CHAUFFERIE

De manière générale, les installations de biomasse auditées démontrent une forte progression en termes de rejet gazeux. Les technologies récentes de chaudière (foyers) et les équipements de filtration poussée de type filtres à manches et électrofiltres leur permettent de maîtriser les émissions de polluants souvent associées à la biomasse : les poussières et NOx, et ce dans les différentes gammes de puissance.

Certaines problématiques de la filière demeurent et demandent de poursuivre les efforts de professionnalisation de la filière :

- Adéquation des conditions de réception, stockage et manutention de la biomasse : plusieurs problèmes de conception et dimensionnement affectent la disponibilité et donc le rendement global des installations,
- Maîtrise de la qualité des combustibles : la contractualisation de la qualité et son contrôle en routine se développent mais pas suffisamment pour stabiliser le fonctionnement des installations (adaptation des réglages) et protéger les installations d'avaries en lien avec des indésirables,
- Adéquation aux besoins thermiques : les technologies de chaudières ont fortement progressé dans leur performance de fonctionnement à des taux de charge réduits ; des pistes d'amélioration demeurent dans les équilibrages hydrauliques entre chaudières biomasse et chaudières d'appoint et en régulation de la distribution
- La gestion des cendres reste souvent mal anticipée.

Le détail de la synthèse des évaluations par chaufferie est présenté dans l'annexe 3.

4.5. - RECOMMANDATION PAR CHAUFFERIE

De manière générale, l'utilisation de combustible issu de broyat d'emballages bois impose un reclassement des installations en rubrique 2910-B, sous le régime d'enregistrement. Ce régime implique de nombreux contrôles d'exploitation supplémentaires.

Tableau 20 : Contrôles à réaliser en rubrique 2910

	Rubrique 2910 - Installation de combustion	
	Déclaration (Arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997)	Enregistrement (Arrêté du 24 septembre 2013)
Contrôle de la qualité des combustibles déchets de bois	Non	Toutes les 1000 tonnes ou une fois par an : Analyse 10 composants : Hg, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Cl, PCP, PCB Fréquence doublée en cas d'écart
Contrôle de la qualité des cendres volantes	Non	Deux fois par an : Analyse de 3 métaux + dioxines et furanes Fréquence doublée en cas d'écart
Contrôle des rejets aqueux pour rejet en réseaux d'assainissement	Une fois tous les 3 ans : Echantillon moyen 1/2h ou 2 prélèvements instantanés Volume de rejet (mesuré ou estimé), température et pH, Hydrocarbures totaux, MES et DCO	Quotidiennement : Débit, température et pH Deux fois par an : échantillons moyens 24h Eaux usées : MES, DCO, DBO5, Azote, Phosphore, halogènes, hydrocarbures, 7 métaux lourds Eaux pluviales : MES, DCO et hydrocarbures
Emissions dans l'air	En continu si > 10 MW Opacimétrie (et SOx si combustible soufré ou désulfuration) Une fois tous les deux ans : Débit de fumée, O ₂ , SOx, poussières, CO, COV, NOx, dioxines et furanes	En continu : Débit de fumée et opacimétrie Quatre fois par an : Sox, Nox Deux fois par an : Poussières, CO, HAP, COVNM, HCl, HF, dioxines et furanes, 4 familles de métaux
Valeurs limites de bruits	Une fois tous les 3 ans : Emergence et limites de propriété	Une fois tous les 3 ans : Emergence et limites de propriété
Si épandage des cendres sous foyer	Plan d'épandage possible dans la limite de 5000 t/an 1 fois par lot d'épandage : Analyse MS, pH, Phosphore total, potassium total, calcium total, magnésium total, oligo éléments, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, PCB, Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(a)pyrène	Plan d'épandage possible dans la limite de 5000 t/an 1 fois par lot d'épandage : Analyse MS, pH, Phosphore total, potassium total, calcium total, magnésium total, oligo éléments, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, PCB, Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(a)pyrène

Source : Inddigo

Les exploitants devront rapidement se positionner face à l'évolution de cette réglementation ICPE :

- Soit en abandonnant ce combustible, au profit de combustible « biomasse naturelle »,
- Soit en exigeant auprès de leurs fournisseurs du broyat d'emballages bois Sorti du Statut de Déchets (SSD), ce qui impose des contraintes particulières au fournisseur qui doit garantir la qualité de son produit,
- Soit en adaptant leurs installations et leurs modalités de fonctionnement pour les rendre conformes au régime enregistrement.

La contractualisation de la qualité du combustible et son contrôle en routine est une autre recommandation valable pour tous les sites audités. C'est un puissant levier pour améliorer la performance technique des installations (disponibilité et pérennité) et les résultats économiques. Si la variabilité d'un approvisionnement ou d'un mix énergétique est inévitable, des pistes de progrès importantes existent dans une exploitation quotidienne qui adapte les réglages de combustion à la qualité du combustible, de manière plus ou moins automatisée selon la taille des installations.

Le détail de la synthèse des recommandations par chaufferie est présenté dans l'annexe 3.

5. - BILAN NATIONAL

5.1. - COMPARAISON AUX DONNEES DISPONIBLES SUR LES EMISSIONS

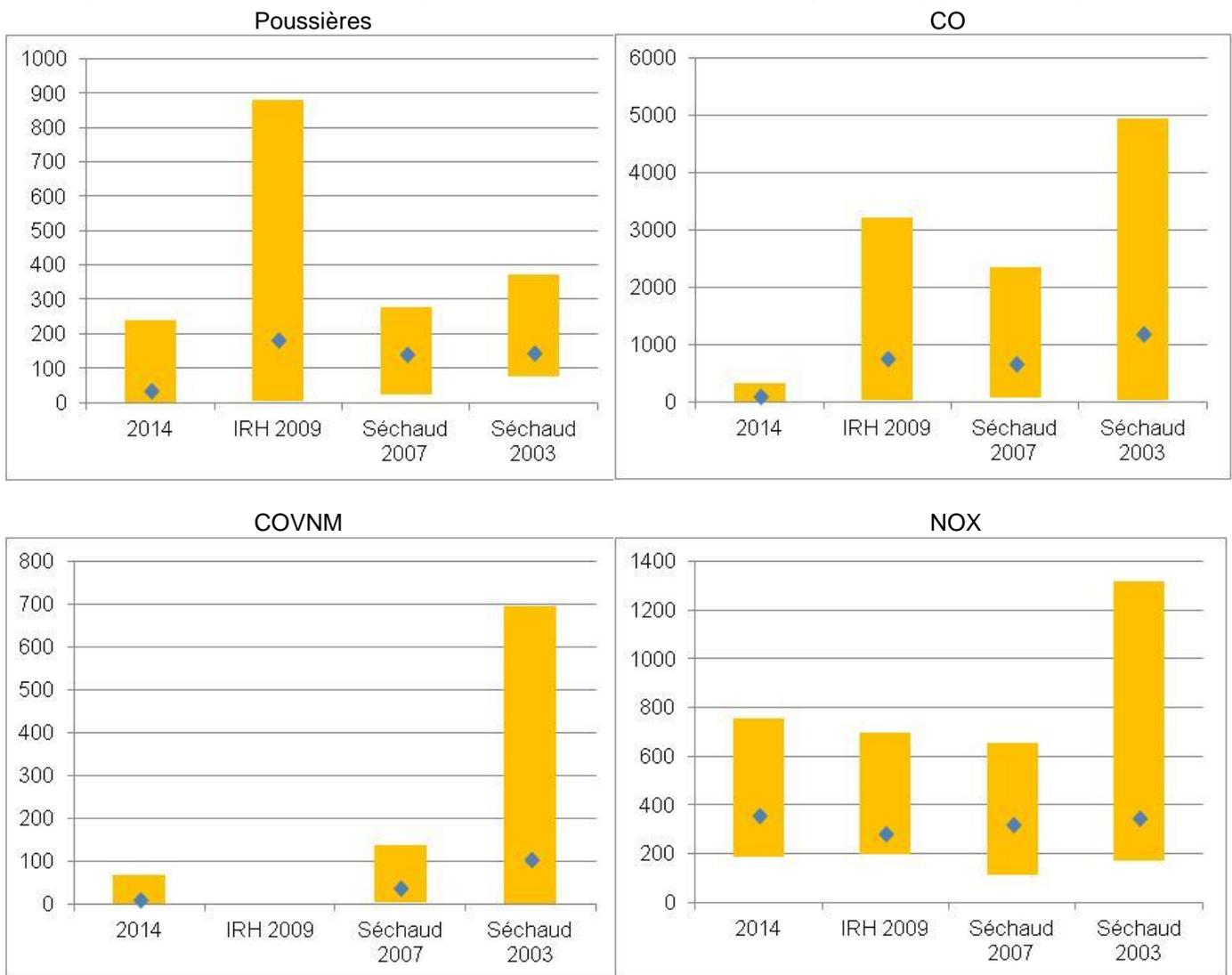
Le tableau suivant présente les résultats obtenus au cours de cette campagne avec les polluants mesurés au cours de 4 campagnes antérieures.

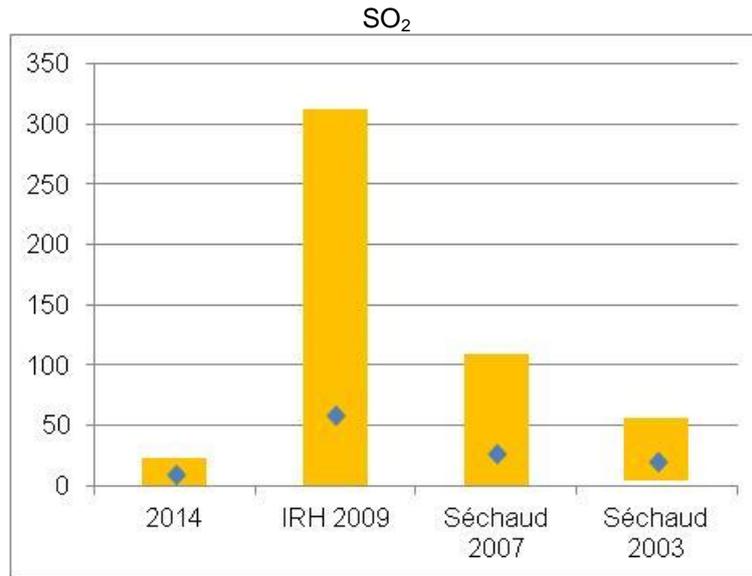
Tableau 21 : Comparaison avec les campagnes ADEME précédentes

Paramètre	Unité	2014					IRH 2009					Séchaud 2007					Séchaud 2003			
		Nb inst.	Med	Moy.	Min.	Max.	Nb inst.	Med	Moy.	Min.	Max.	Nb inst.	Med	Moy.	Min.	Max.	Nb inst.	Moy.	Min.	Max.
Poussières	mg/m ³	10	8	33	0,3	238	14	87	180	5	875	10	128	127	24	254	9	143	75	297
CO	mg/m ³	10	32	92	19	324	13	708	761	17	3197	8	240	656	65	2280	10	1173	17	4914
COVNM	mg/m ³	10	1,2	8,4	0,2	67	-	-	-	-	-	8	7	37	2	135	10	102	2	693
NOx	mg/m ³	10	361	357	188	568	13	264	281	198	495	10	285	316	113	539	10	345	168	1151
SO ₂	mg/m ³	10	6,0	9,8	0,1	22	14	6	59	0,2	312	10	8	23	0	110	7	19,5	4,5	51

La figure suivante présente ces résultats sous forme graphique (le losange représente la valeur moyenne et les rectangles l'étendue des mesures).

Figure 15 : Evolution des rejets de poussières, CO, COVNM, NOx, SO₂ depuis 2003 (mg/m³ à 6% O₂)





D'une façon générale, on remarque une baisse significative des rejets par rapport aux autres campagnes, à l'exception des NOx. Les causes identifiées sont les suivantes :

- pour les poussières, la mise en place d'épurations plus performantes (électrofiltres, filtres à manches),
- pour les COVNM et le CO, l'amélioration de la maîtrise des conditions de combustion par de meilleures régulations et un meilleur usage des équipements,

Pour SO₂, l'origine est certainement à rechercher au niveau des combustibles : il n'y a pas d'agrocombustible dans les biomasses utilisées au cours de cette campagne.

L'amélioration des émissions de CO et des COVNM est certainement liée à des conditions de combustion mieux maîtrisées. Pour le SO₂, on remarque aussi une baisse alors que la campagne 2009 de l'IRH avait donné les résultats les plus élevés.

Pour les poussières, on peut considérer que les résultats de 2003 étaient uniquement avec multi-cyclone. On peut alors établir le classement suivant.

Tableau 22 : Evolution des émissions de poussières par type de filtration depuis 2003

	Unité	Moyenne	Electrofiltre	Filtre à manches	Multi-cyclone
2014	mg/m ₀ ³ à 6% O ₂	33	12-87*	5	35
IRH 2009		180	14	60	320
Séchaud 2007		127	27	17	172
Séchaud 2003		143	-	-	143

* : 12 mg/m₀³ sans le site n°8

On remarque le bon comportement des filtres à manches, surtout au cours de cette campagne. Le résultat pour les électrofiltres est voisin de la campagne IRH2009 si on écarte la valeur du site n°8.

Pour la seule mesure par multi-cyclone réalisée au cours de cette campagne, le résultat obtenu est faible par rapport aux résultats précédents. Il est fort probable qu'il s'agit d'un point singulier lié au faible taux de charge de l'installation en 2014.

Pour les NOx, si l'ensemble ne présente pas d'évolution notable en moyenne, on observe cependant des voies de progrès sur les nouvelles chaufferies équipées SNCR ou avec la conception de fours de technologie bas-NOx.

5.2. - ÉVALUATION DES RATIOS SPECIFIQUES PAR CHAUDIERE

Le tableau suivant présente les valeurs d'émission spécifiques par chaufferie avec les données actuelles du CITEPA.

Au cours de cette étude, les facteurs d'émission FE sont calculés de la façon suivante :

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

Avec :
 C x concentration moyenne du paramètre x
 Q débit de fumées moyen
 Conso débit horaire de bois brut
 PCI PCI du bois brut

Tableau 23 : Facteurs d'émission spécifique par chaufferie

Paramètres	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	Données CITEPA 2005	
		FM	FM	FM	EF	EF	MC	FM	EF	FM	FM			urbain	industrie
Poussières	g/GJ	0,64	2,5	0,14	3,6	4,0	13	6,7	85	0,65	0,11	3,1	11,7	49	100
PM10	g/GJ	0,64	1,2	0,13	3,2	4,0	12	6,4	84	0,65	0,11	2,2	11,3	40,9	79,8
PM2.5	g/GJ		0,91		2,4	2,8	3,3	1,7	72			2,6	13,8	35,7	66,5
CO	g/GJ	13	27	3,5	2,8	6,6	50	7,6	116	10	101	11,2	33,7	250	250
CO2	kg/GJ	110	113	111	105	81	101	106	102	89	107	105	103		
NOx	g/GJ	217	128	74	83	54	156	149	135	159	132	133	129	167	200
COVNM	g/GJ	2,2	0,29	0,27	0,072	0,22	24	0,62	1,7	0,50	0,14	0,4	3,0	4,8	4,8
CH4	g/GJ	0,66	0,041	0,18	0,072	0,044	0,66	0,66	0,82	0,039	0,28	0,2	0,3	3,2	3,2
SO2	g/GJ	8,2	0,082	7,3	0,095	0,34	2,6	1,7	8,0	7,0	0,06	2,1	3,5	10	10
HF	g/GJ	0,071	0,11	0,047	0,051	23	0,13	0,21	0,10	0,63	0,026	0,1	2,4		
HCl	g/GJ	1,35	0,18	1,7	0,31	0,39	0,053	13	3,3	2,9	0,52	0,9	2,4		
PCDD/F	ng/GJ I-TEQ	3,5	1,0	1,0	3,2	95	2819	6,1	529	2,4	1,8	3,4	346	40	40
HAP (8)	mg/GJ	1,34	0,17	0,071	0,30	2,2	0,25	0,31	51	2,4	0,74	0,5	5,9	8,1	8,1
Cr	mg/GJ	1,6	2,2	1,5	5,5	5,9	10	3,9	19	2,1	0,83	3,1	5,2	47	47
Cu	mg/GJ	9,0	3,6	1,2	13	4,7	56	8,3	19	14	0,52	8,7	12,9	31	31
Ni	mg/GJ	1,4	1,3	1,2	1,8	7,2	3,4	12,4	4,4	1,5	0,56	1,7	3,5	11	11
Zn	mg/GJ	60	88	16	68	31	2903	126	366	69	5,9	68	373	290	290
As	mg/GJ	0,36	0,59	0,22	2,2	0,26	41	1,4	10	0,89	0,093	0,7	5,7	9,5	9,5
Se	mg/GJ	2,8	1,7	2,0	1,4	2,0	3,8	6,3	5,7	1,8	0,90	2,0	2,8	7	7
Cd	mg/GJ	3,6	0,53	6,4	3,0	0,37	8,9	0,91	5,4	1,0	0,60	2,0	3,1	1,4	1,4
Hg	mg/GJ	1,4	5,2	0,086	0,34	0,23	2,7	2,4	2,8	2,0	0,53	1,7	1,8	0,8	0,8
Tl	mg/GJ	1,5	1,0	1,0	0,77	1,0	2,2	3,3	3,2	0,93	0,45	1,0	1,5		
Pb	mg/GJ	9,5	20	1,7	8,5	3,4	1053	34	79	12	0,37	10,6	122	90	90

On relève pour les poussières et particules fines des valeurs nettement plus basses au cours de cette campagne que les données prises en compte par le CITEPA.

Les émissions de CO et de COVNM sont aussi inférieures aux données CITEPA. Il est vrai que les émissions de ces composés étaient bien maîtrisées sur toutes les chaufferies étudiées ; ce qui n'était pas le cas les années précédentes.

Les émissions de NOx sont légèrement inférieures aux données du CITEPA.

Les émissions d'HF et de HCl ne sont pas référencées au CITEPA. Les émissions spécifiques de SO₂ sont variables mais se situent dans la gamme des données CITEPA.

Les émissions de PCDD/F et HAP sont inférieures au référentiel CITEPA : les sites n°6 et 8 étant des points singuliers.

Pour les métaux, on observe globalement des valeurs homogènes avec le CITEPA.

Si on se réfère pour certains éléments à l'influence de la filtration, on obtient.

Tableau 24 : Facteurs d'émission spécifique par type d'épuration

Paramètres	Unité	Médiane 10 unités	Moyenne 10 unités	Electrofiltre	Filtre à manches	Multi- cyclone	CITEPA 2005	
							urbain	industrie
Poussières	g/GJ	3,1	12	31	1,8	13	49	100
PM10	g/GJ	2,2	11	31	1,5	12	40,9	79,8
PM2.5	g/GJ	2,6	14	26	1,3	3,3	35,7	66,5
CO	g/GJ	11,2	34	42	27	50	250	250
CO2	kg/GJ	105	103	96	106	101		
NOx	g/GJ	133	129	90	143	156	167	200
COVNM	g/GJ	0,4	3,0	0,67	0,67	24	4,8	4,8
CH ₄	g/GJ	0,2	0,35	0,31	0,31	0,66	3,2	3,2
SO ₂	g/GJ	2,1	3,5	2,8	4,1	2,6	10	10
HAP (8)	mg/GJ	0,1	5,9	17,8	0,85	0,25		
HF	g/GJ	0,9	2,4	7,8	0,18	0,13		
HCl	g/GJ	3,4	2,4	1,3	3,2	0,053	40	40
PCDD/F	ng/GJ I-TEQ	0,5	346	209	2,6	2819	8,1	8,1
Cr	mg/GJ	3,1	5,2	10	2,0	10	47	47
Cu	mg/GJ	8,7	13	12	6,2	56	31	31
Ni	mg/GJ	1,7	3,5	4,5	3,1	3,4	11	11
Zn	mg/GJ	68	373	155	61	2903	290	290
As	mg/GJ	0,7	5,7	4,2	0,60	41	9,5	9,5
Se	mg/GJ	2,0	2,8	3,0	2,6	3,8	7	7
Cd	mg/GJ	2,0	3,1	2,9	2,2	8,9	1,4	1,4
Hg	mg/GJ	1,7	1,8	1,1	1,9	2,7	0,8	0,8
Tl	mg/GJ	1,0	1,5	1,7	1,4	2,2		
Pb	mg/GJ	10,6	122	30	13	1053	90	90

On confirme pour les rejets de poussières, métaux et PCDD/F le bon comportement des installations équipées de filtre à manches.

Par rapports aux facteurs d'émissions moyens obtenus au cours des campagnes précédentes, on peut établir ceux de cette campagne en supprimant les deux installations ayant un très faible taux de charge et des émissions singulières : sites n°6 et 8. On obtient alors des facteurs d'émission représentatifs de 6 unités avec filtre à manches et 2 unités avec électrofiltre. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant avec le rappel des campagnes précédentes.

Tableau 25 : Comparatif de facteurs d'émission depuis 2003

Paramètre	Unité	2014		IRH 2009		Séchaud 2007	
		FM	ESP	FM-ESP	MC	FM-ESP	MC
Filtration finale							
Poussières	g/GJ	1,8	3,8	3	59	12,5	74
CO	g/GJ	27	4,7	175		120	288
NOx	g/GJ	143	68	95		183	124
COVNM	g/GJ	0,67	0,1			19	20
SO ₂	g/GJ	4,06	0,2	3,7		0,06	5,1
HAP (8)	mg/GJ	0,85	1,3			1,6	4,5
PCDD/F	ng/GJ	2,6	49			7,1	36
Cr	mg/GJ	2,0	5,7			4,2	11,2
Cu	mg/GJ	6,2	8,9			3,5	14
Ni	mg/GJ	3,1	4,5			14,6	21,4
Zn	mg/GJ	61	49			30	186
As	mg/GJ	0,60	1,2			0,03	8,14
Se	mg/GJ	2,6	1,7			0,03	1,07
Cd	mg/GJ	2,2	1,7			n.d.	0,6
Hg	mg/GJ	1,9	0,3			0,37	2,26
Tl	mg/GJ	1,4	0,9			n.d.	0,66
Pb	mg/GJ	13	5,9			8,9	19,3

On remarque une baisse notable des émissions de poussières, CO et COVNM.

6. - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La campagne de mesure réalisée sur dix chaudières de différentes puissances a permis de compléter les inventaires existants et d'apporter des informations sur de nouveaux polluants.

Les principales conclusions sont les suivantes :

▪ Combustible :

Les combustibles sont globalement de qualité conforme; un point important à surveiller étant l'humidité. Les seuils de qualité établis pour le régime enregistrement de la 2910-B sont globalement respectés. Il a été trouvé peu de métaux dans les combustibles à l'exception d'un site (présence de parties métalliques avec le bois). L'humidité et la qualité des combustibles (dimension, indésirables) sont la cause des principaux incidents de fonctionnement observés sur les chaudières. Les exploitants rencontrés ne sont pas informés de l'évolution du statut des broyats d'emballages bois et n'ont pas de positionnement à ce stade.

▪ Cendres :

Les cendres sous foyer sont généralement collectées avec les cendres de multi-cyclone. Les analyses réalisées montrent qu'elles respectent les seuils définis pour une valorisation agronomique par plan d'épandage agricole.

Les cendres volantes (filtres à manches, électrofiltres) présentent des concentrations en métaux souvent élevées et parfois en éléments organiques (PCDD/F), souvent au dessus des seuils définis pour le régime enregistrement, imposant une information des services des installations classées et une périodicité plus forte pour l'analyse des combustibles et des cendres pour les installations concernées.

▪ Emissions atmosphériques :

Les valeurs mesurées donnent des résultats en nette progression par rapport aux inventaires précédemment réalisés, les raisons étant une meilleure maîtrise de la combustion avec un meilleur usage des chaudières et la présence de traitement des fumées plus performants (électrofiltres, filtres à manches). On relève ainsi :

- des émissions de poussières en dessous de 50 mg/m_0^3 sauf sur un site,
- peu de dépassements des principaux polluants réglementés : CO (1 dépassement), PCDD/F (3 dépassements du seuil de $0,1 \text{ ng/m}_0^3$),

On relève cependant deux installations inférieures à 2 MW qui se distinguent avec des rejets nettement plus élevés que les autres installations pour de nombreux polluants.

▪ Efficiences énergétique :

Le rendement instantané des installations s'approche du nominal (90 %) dès que le taux de charge des installations est suffisant (en général au-delà de 40 %).

Les grosses installations (au-delà de 2 MW) ont généralement des taux de charge élevés et apparaissent bien dimensionnées. Parmi les petites chaudières étudiées, une seule semble nettement surdimensionnée : le site n°8.

Les installations étudiées sont récentes et il y a encore peu de retour sur la maintenance des installations : certaines ont cependant présentés de nombreux incidents de démarrage y compris parmi les grosses chaufferies.

Les recommandations que nous pouvons formuler concernent une amélioration des différents critères évoqués ci-dessus avec :

- Améliorer la connaissance (actualisation des standards, suivi du dispositif SSD) et la maîtrise (contractualisation et contrôle) de la qualité des approvisionnements,
- Améliorer la conception et le dimensionnement des dispositifs de réception, stockage et manutention de la biomasse, une perte de performance globale étant due à des défaillances du transfert du combustible depuis le stockage jusqu'à la chaudière,
- Améliorer l'exploitation quotidienne (réglages adaptés au combustible et suivi de l'efficacité énergétique globale), par des accompagnements spécifiques sur les petites installations
- Analyser les conditions de rénovation d'installations plus anciennes pour les amener au niveau des installations récentes auditées,
- Eclaircir le statut réglementaire des cendres de multi-cyclones et participer à la structuration de filières locales de valorisation des cendres

Références

1. Expertise de 10 chaufferies collectives au bois – analyse et recommandations – Etude SECHAUD Energie pour l'ADEME – 2003
2. Expertise de 10 chaufferies collectives au bois – analyse et recommandations – Etude SECHAUD Environnement pour l'ADEME – 2007
3. Campagne de mesures de particules à l'émission de chaufferies biomasse Etude IRH pour l'ADEME – 2009
4. Evaluation technico-économique des systèmes de réduction des émissions de particules des chaudières biomasse – INDDIGO - 2012
5. Prospective d'évolution des facteurs d'émission des chaufferies collectives bois – Etude CITEPA - (transmission d'un document partiel par l'ADEME)
6. Gestion et valorisation des cendres de chaufferies bois : Etude Solagro-Aquasol pour l'ADEME – 2006
7. Arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion)
8. Arrêté du 24 septembre 2013 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2910-B de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
9. Arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931
10. NFU 44-095 : Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux
11. NFU 44-051 : Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage
12. Note sur l'assimilation d'un produit (bois faiblement adjuvanté) à un combustible de référence et sur la surveillance des installations classées dans la rubrique 2910B - INERIS - 2012

Annexe 1 : Protocoles de mesures

1. METHODES DE PRELEVEMENT ET DE MESURES POUR LES REJETS ATMOSPHERIQUES

Les méthodes de prélèvement et de mesure utilisées pour la réalisation des essais sont présentées dans le tableau 28.

Tableau 26 : Normes de prélèvement

PRELEVEMENT		
Paramètres	Méthodes et appareillages	Normes
Emissions de sources fixes	Mesurage des émissions de sources fixes : « Exigences relatives aux sections et aux sites de mesurage et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesurage »	NF EN 15259
Vitesse / Débit	Détermination manuelle et automatique de la vitesse et du débit-volume d'écoulement dans les conduits — Partie 1 : Méthode de référence manuelle	NF EN ISO 16911-1 (*)
Poussière canalisée	Prélèvement isocinétique sur filtre plan Détermination gravimétrique des poussières sur filtre et solution de rinçage de sonde	NF X 44-052
Poussière canalisée	Prélèvement isocinétique sur filtre plan Détermination gravimétrique des poussières sur filtre et solution de rinçage de sonde	NF EN 13284-1
Humidité	Prélèvement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux Détermination de la masse de vapeur d'eau piégée par pesage Piégeage de la vapeur d'eau par condensation et adsorption	NF EN 14 790
Concentration en O ₂	Détermination de la concentration en Oxygène (O ₂) Mesure par méthode paramagnétique	NF EN 14789
Concentration en Composés Organiques Volatils (COV)	Détermination de la concentration en C.O.T à faibles et fortes concentrations	NF EN 12619
Concentration en Composés Organiques Volatils (COVt et CH ₄)	Détermination de la concentration massique en composés organiques volatils non méthaniques dans les effluents gazeux, à partir des mesures des composés organiques volatils totaux et du méthane	XP X 43-554
Concentration en NOx	Détermination de la concentration massique en oxydes d'azote (NOx)	NF EN 14792
Concentration en monoxyde de carbone CO	Détermination de la concentration massique en monoxyde de carbone (CO) par infrarouge	NF EN 15058
Concentration en dioxyde de carbone CO ₂	Détermination de la concentration massique en dioxyde de carbone (CO ₂) par infrarouge	NF X 20-301
Concentration en mercure total (Hg)	Prélèvement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux Collecte des particules sur filtre et passage du flux gazeux à travers une solution d'absorption Minéralisation du filtre Traitement des solutions d'absorption et de rinçage	NF EN 13211 Méthode interne selon NF ISO 17852
Concentration en acide chlorhydrique (HCl)	Prélèvement d'un échantillon gazeux par barbotage dans une solution d'eau déminéralisée. Dosage par chromatographie ionique	NF EN 1911
Concentration en acide fluorhydrique (HF)	Prélèvement d'un échantillon solide sur filtre plan et d'un échantillon gazeux par barbotage dans une solution de NaOH Extraction basique du filtre (et fusion alcaline) Traitement des solutions de rinçage et d'absorption Dosage par ionométrie	NF X 43-304
Concentration en dioxyde de soufre (SO ₂)	Prélèvement d'un échantillon gazeux par barbotage dans une solution de H ₂ O ₂ Dosage par chromatographie ionique	NF EN 14791
Analyse de la teneur en métaux lourds et autres éléments spécifiques	Prélèvement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux Collecte des particules sur filtre et passage du flux gazeux à travers une solution d'absorption Métaux concernés (Al, Fe, Zn, Ba, Se, Sn Mo, Ti, As, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, V) Dosage par ICP/AES et ICP/MS	NF EN 14385

PRELEVEMENT		
Paramètres	Méthodes et appareillages	Normes
Concentration en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	Prélèvement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux Collecte des particules sur filtre et collecte de la phase gazeuse sur adsorbant solide et dans un flacon à condensat HAP concernés (Acénaphthène, Acénaphthylène, Anthracène, Benzo(a)anthracène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(g,h,i)pérylène, Benzo(a)pyrène, Chrysène, Dibenz(a,h)anthracène, Fluoranthène, Fluorène, Indéno(1,2,3-cd)pyrène, Naphtalène, Phénanthrène, Pyrène) <i>Extraction des filtres, résines et condensats</i> <i>Extraction solide/liquide et dosage par GC/MS</i>	NF X 43-329
Concentration en dioxines et furanes (PCDD/F)	Prélèvement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux Collecte des particules sur filtre et collecte de la phase gazeuse sur adsorbant solide et dans un flacon à condensat Extraction des filtres, résines et condensats Concentration, purification et dosage par HRGC/HRMS	NF EN 1948-1
Concentration en PCB Dioxin Like	Echantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2) Purification et dosage par HRGC/HRMS	NF EN 1948-1
Concentration en PCB Indicateurs	Echantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2) Purification et dosage par HRGC/HRMS	NF EN 1948-1
Concentration en HCB	Echantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2) Dosage par chromatographie gaz /Masse	Méthode interne, selon le principe de la norme NF X 43-329
Granulométrie PM10 et 2,5	Prélèvement par impacteur DEKATI Classification en quatre tranches (< 1 µm, de 1 à 2,5 µm, de 2,5 à 10 µm et > 10 µm) Mesurage à des faibles concentrations au moyen d'impacteurs	NF EN ISO 23210
Concentration en Cr ^{VI}	Prélèvement sur filtre Téflon et sur barboteur d'eau déminéralisée Analyse par Spectrophotométrie	NF EN 14385 Méthode interne selon NF T 900043
Concentration en SO _x	Prélèvement et conditionnement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux Analyse par un laboratoire extérieur Passage du flux gazeux au-travers une solution d'absorption à 80% d'Isopropanol Dosage par chromatographie ionique	Selon le principe de la norme NF EN 14791
Carbone élémentaire	Echantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre en fibres de quartz. Analyse par coulométrie	Méthode interne selon Méthode Métropole 038
Lévoglucosan et isomères	Echantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre en fibres de quartz. Dosage par chromatographie liquide / Masse / Masse	Selon le principe des normes NF X 44-052 ou NF EN 13284-1 Méthode interne selon XP X 43-059

(*) en remplacement de la norme ISO 10 780.

La méthode d'analyse du levoglucosan a été développée au cours de l'étude par le laboratoire Micropolluants Technologies, les analyses de levoglucosan n'étant réalisées par aucun laboratoire prestataire de service en France. Le protocole utilisé est le suivant :

Processus d'extraction : 2 protocoles testés sur filtre quartz dopé (extraction au solvant sous pression à chaud d'une part et extraction aux ultra-sons d'autre part)

De ces 2 protocoles, c'est l'extraction par ultra-sons qui a conduit aux résultats les plus reproductibles. Le protocole retenu est donc le suivant : le filtre est recouvert de méthanol et placé aux ultra-sons pendant 45 min. Le méthanol est récupéré puis concentré 1 mL. L'extrait ainsi obtenu est ensuite injecté en LCMSMS.

Méthode analytique : L'analyse par LCMSMS a été préférée à l'analyse par GCMS car cette dernière, bien que plus couramment décrite dans la littérature nécessite une dérivation qui est une étape complexe à mettre en œuvre et qui contribue fortement à l'incertitude globale sur le résultat.

La séparation chromatographique a été optimisée sur un équipement capable de travailler en mode ultra-haute pression, qui est à ce jour le système de séparation le plus performant. Plusieurs colonnes ont été

testées pour parvenir à une séparation du levoglucosan et de ses isomères. 4 chimies de colonne différentes ont été testées :

- une colonne phase inverse,
- une colonne phase normale de type Hilic,
- une colonne chirale de type cellulosique,
- une colonne greffée de type amino.

De ces 4 colonnes, seule la colonne amino est parvenue à apporter une rétention suffisante de ces espèces très polaires. C'est donc cette colonne que le laboratoire a retenu pour poursuivre ses investigations. Au stade actuel de nos travaux, le levoglucosan et ses isomères n'étaient pas tous distinctement séparés ; c'est pourquoi les résultats ont été exprimés en somme, sachant que le manosan et le galactosan ne contribuent généralement pas pour plus de 10 % de la valeur totale de l'ensemble des isomères dans les fumées de bois.

Les limites de quantification sont présentées dans le tableau 29.

Tableau 27 : Protocoles de prélèvement et limites de quantification

Nature de la mesure	Durée ou volume de prélèvement	Limite de quantification ou incertitude
Débit / température / humidité	Sur la durée des prélèvements sous couvert de trappes suffisantes en nombre	1m/s
poussières	1,5m ³	1,86 mg/m ³
O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x , COV totaux, COV nm	en même temps que les prélèvements	0,7% (gamme 0-25%) 6 ppm (gamme 100ppm) 1,1 % (gamme 0-25%) 6 ppm (gamme 100ppm) 6 ppm (gamme 100ppm) 8 ppm (gamme 100ppm)
SO _x et SO ₂	0,120m ³	0,125 mg/m ³
PCDD/PCDF	3m ³ minimum	0,002 ng/m ³
HAP	3m ³ minimum	0,007µg/m ³
PCB indicateur et type Dioxine	3m ³ minimum	0,002 ng/m ³
HCB	3m ³ minimum	0,070µg/m ³
HCl	Phase gazeuse : 0,060	0,29 mg/m ³
HF	Phase particulaire : 1m ³ Phase gazeuse : 0,060m ³	0,30 mg/m ³
Métaux lourds	Phase particulaire : 2m ³ Phase gazeuse : 0,120m ³	0,64µg/m ³
Cr ^{VI}	Phase particulaire : 2m ³ Phase gazeuse : 0,120m ³	6µg/m ³
Carbone élémentaire	Phase particulaire : 1m ³	15µg/m ³
Levoglucosan et isomères	Phase particulaire : 1m ³	0,5 µg/m ³

Le volume minimal prélevé est une donnée non contractuelle, c'est un guide pour les intervenants afin que les limites de quantification soient inférieures au 1/10ème des VLE respectives ; exigence LAB REF 22. Les textes réglementaires de référence retenus sont l'arrêté du 26/08/13 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion) et en l'absence d'arrêté pour les installations soumises à enregistrement, l'arrêté du 26/08/13 relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910.

Compte tenu des visites réalisées, il s'avère que peu d'installations disposent de piquages en nombre suffisant pour réaliser des mesures simultanées avec plusieurs sondes. Selon le programme d'essai prévu, 9 séries de mesures différentes sont à réaliser. Le séquençement envisagé a été le suivant :

1. vitesse, T fumées : en continu si le nb de piquage le permet, sinon faire un pointer au début de chaque mesure pour vérifier si les conditions d'écoulement varient.
2. Poussières, HF, HCl : prélèvement sur filtre en fibre de verre. Avant analyse HF, une pesée du filtre sera réalisée pour calculer un indice pondéral.
3. Poussières, Métaux, Hg : prélèvement sur filtre quartz avec barboteurs pour les phases gaz. Avant analyse, une pesée du filtre sera réalisée pour calculer un indice pondéral.
4. PCDD/F, HAP, PCB indicateur, PCB dioxin like, HCB : prélèvement sur résine XAD2. Pesage du condensat pour calculer l'humidité.
5. Poussières, Cr^{VI} : prélèvement sur filtre quartz et barboteur avec eau déminéralisée. L'analyse sur barboteur étant moins sensible que sur le filtre. L'analyse du barboteur ne sera réalisée que si une quantité significative de Cr^{VI} est trouvée sur le filtre. Avant analyse, une pesée du filtre sera réalisée pour calculer un indice pondéral.
6. Levoglucozan et isomères, SO₃ et SO₂ : prélèvement sur filtre quartz suivi d'un barboteur (80% isopropanol, 20 % eau demi) + barboteur vide + barboteurs pour SO₂ (H₂O₂ 3%)
7. PM10, PM2.5 : mesure par impacteur Dekati
8. Carbone élémentaire, carbone organique : prélèvement type HdT sur K7 FQ calciné (méthode HDT).
9. O₂, CO, CO₂, NO_x, COVT, COVNM par méthode automatique : prélèvement par sonde chauffée et analyse par dispositif automatique Horiba PG250, JUM 109L ou Environnement SA Graphite 52M.

En conséquence, le protocole sera adapté par l'équipe sur le terrain. Des prélèvements séquentiels dont les durées minimales sont reportées dans le tableau suivant seront réalisés.

Tableau 28 : Durées minimales de prélèvement

Paramètres	Mesure en continu	Mesure séquentielle
Pression atmosphérique	X	X
Température des fumées	X	X
Température ambiante dans la chaufferie	X	X
Température extérieure nord protégée du soleil		X
Vitesse	X	X
Humidité	-	3 h
Poussières, HF, HCl	-	1 h à 1,5h
Poussières, Métaux, Hg	-	1 h à 1,5h
PCDD/F, HAP, PCB indicateur, PCB dioxin like, HCB	-	3 h
Levoglucozan et isomères, SO ₃ et SO ₂	-	1 h à 1,5h
Poussières, Cr ^{VI}	-	1 h à 1,5h
PM10-PM2,5	-	0,5 à 1 h
Carbone élémentaire, carbone organique	-	0,5 h
Concentration en O ₂	X	-
Concentration en monoxyde de carbone CO	X	-
Concentration en dioxyde de carbone CO ₂	X	-
Concentration en NO _x	X	-
COV totaux et non méthanique	X	-

X : les mesures en continu seront réalisées sur a minima 4 h

2. PROTOCOLES DE MESURES UTILISES POUR LES COMBUSTIBLES

Le protocole utilisé est celui présenté dans la norme NF EN 14778.

Pour le combustible, il est prévu de réaliser a minima 5 prélèvements pendant les mesures pour recueillir un échantillon représentatif. Certains sites pourraient faire les prélèvements.

Le protocole visera à recueillir pour les besoins des analyses 4 kg de combustible. Compte nu d'une densité moyenne de 0,5 kg/L, 8 litres de combustible seront recueillies.

LECES réalisera un 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, puis division en quatre parties égales et prélèvement dans chacune des quatre parties.

Les échantillons seront conditionnés dans des bouteilles en PET de grande contenance à usage unique.

Les différents types de combustibles utilisés par les chaufferies ainsi que les protocoles d'échantillonnage mis en place sont représentés dans le tableau 31. Une feuille Excel a été conçue pour permettre à l'équipe de calculer les volumes élémentaires de prélèvement sur site.

Tableau 29 : Protocoles d'échantillonnage des combustibles

N° chaufferie	Type de combustible	Taille maximale mm	Nombre de prélèvements élémentaires	Volume élémentaire (litre)	Volume total (litre)	Facteur de réduction du quartage
1	NC	100	5	1,6	8	4
2		50	5	2,5	12,5	2
3	P100	100	5	5	25	4
4	NC	100	5	1,6	8	4
5	G50	120	5	6	30	4
6	G50	120	5	6	30	4
7	Type 2	80	5	4	20	3
8	G50	120	5	6	30	4
9	P63	63	5	3,15	15,75	2
10	P100	100	5	5	25	4

Les méthodes et les limites de quantification utilisées pour la réalisation des essais sont présentées dans le tableau 32.

Tableau 30 : Limites de quantification analytique des combustibles

Élément	Technique	Norme	Limite de Quantification
PCI/PCS	Bombe calorimétrique avec mesure élévation température	NF EN 14918	/
Taux de cendres	Calcination à 815 °C, gravimétrie	ISO 1171	/
Granulométrique	Tamassage avec ou sans destruction des agrégats	NF E N 15149	/
Humidité		EN 14774-1	/
PCB indicateurs	GC-MSD	Méthode interne	10 µg/kg
Organo-halogénés	GC-MS	Méthode interne	0,1 mg/kg
4,4'-DDD			
4,4'-DDE			
4,4'-DDT			
aldrine			
dieldrine			
endrine			
endosulfan Alpha			
endosulfan beta			
endosulfan total			
HCH alpha			
HCH beta			
HCH gamma			
HCH delta			
heptachlore			
heptachlore epoxyde exo cis			
hexachlorobenzène			
trifluraline			
perméthrine			
deltaméthrine			
cyperméthrine			
azaconazole			
tebuconazole			
propiconazole			
dichlofluanide			
As	ICP-MS	Minéralisation ICP-MS selon NF EN ISO 17294-2	0,2 mg/kg
Cd			0,2 mg/kg
Co			1 mg/kg
Cr			1 mg/kg
Cu			1 mg/kg
Hg			0,2 mg/kg
Mo			1 mg/kg
Ni			1 mg/kg
Pb			0,2 mg/kg
Sb			1 mg/kg
Se			2 mg/kg
Sn			1 mg/kg
Tl			1 mg/kg
V			1 mg/kg
Zn	2 mg/kg		
S	ICP-AES	Minéralisation ICP-AES selon NF EN ISO 11185	mg/kg
B			mg/kg
Hg	AFS	Méthode interne	0,2 mg/kg
PCP - Chlorophénol	GC MSD	Méthode interne	500 µg/kg
Azote total	Microanalyseur	NF EN 15104	0,1 %
Carbone	Microanalyseur CHN	NF EN 15407	0,1 %
hydrogène	Microanalyseur	NF EN 15104	0,1 %
Chlore total	Chromatographie ionique	NF EN 15289	20 mg/kg

3. PROTOCOLES UTILISES POUR LES CENDRES

Les échantillons de cendres ont été recueillis au cours des campagnes de mesure. Pour les cendres, le prélèvement est réalisé de l'une des deux façons suivantes :

- dans une benne ou un big bag avec un échantillon représentatif de l'essai suivi (prélèvement au dessus, en fin d'essai),
- en mettant un bac spécifique collectant les cendres pendant l'essai.

Trois types de cendres sont produits par les chaufferies :

- les cendres sous foyer,
- les cendres des multi-cyclone,
- les cendres des unités de filtration (électrofiltre, filtre à manches).

La majorité des sites (8 sur 10) sont équipés d'un système de collecte commun pour les cendres sous foyer et celles de multi-cyclone. Les cendres des filtres (électrofiltres ou filtres à manches) sont collectées à part, généralement dans des big bags.

Le site 6 n'est pas équipé de filtration finale et possède une collecte séparée des cendres sous foyer et des cendres du multi-cyclone.

Le site 8 est équipé de 3 collectes : cendres sous foyer, cendres de multi-cyclone et cendres de filtres à manches. Au cours des essais, il n'a pu être collecté que 2 types de cendres : le bac à cendres issues du multi-cyclone étant vide.

Les cendres ont été récupérées selon le tableau suivant :

Tableau 31 : Collecte des cendres par chaudière

Chaufferie	Cendres sous foyer & multi-cyclone	Cendres sous foyer	Cendres multi-cyclone	Cendres électrofiltre	Cendres filtre à manches
1	X				X
2	X				X
3	X				X
4	X			X	
5	X			X	
6		X	X		
7	X				X
8		X		X	
9	X				X
10	X				X

Les analyses réalisées seront les suivantes.

Tableau 32 : Analyse des cendres

Élément	Technique	Norme	Limite de Quantification
Granulométrie et indésirables	Tamisage avec ou sans destruction des agrégats	NF EN 15149	/
Humidité	Gravimétrie	EN 11465	0,1 %
Teneurs en imbrûlés		NFM 07045	/
pH	Potentiométrie	Méthode interne	
Carbone organique	Spectrophotométrie – COT	NF EN 13137 – NF ISO 14235	1 g/kg
Matières organiques à 550°C	Gravimétrie – perte au feu	NF ISO 15169	1 g/kg
C/N			
P ₂ O ₅			
Na ₂ O			
S			
CaO			
MgO			
K ₂ O			
Azote Total Kjeldhal (NTK)	Titrimétrie-NTK	Méthode interne selon EN 25663	1 g N/kg
Azote ammoniacal		Méthode interne	10 mg/kg
As	ICP-MS		0,2 mg/kg
Cd	ICP-MS		0,2 mg/kg
Cr	ICP-MS		1 mg/kg
Cu	ICP-MS		1 mg/kg
Mo	ICP-MS		1 mg/kg
Ni	ICP-MS		1 mg/kg
Pb	ICP-MS		0,2 mg/kg
Se	ICP-MS		2 mg/kg
Zn	ICP-MS		2 mg/kg
Hg	AFS	Méthode interne	0,2 mg/kg
PCB indicateurs	GC-MSD	Méthode interne	10 µg/kg
HAP (fluoranthène, benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène)	GC-MSD	Extraction selon NF EN 15527	10 µg/kg
PCDD/F	GC-MS		5 pg I-TEQ/échantillon
Radioéléments	Spectrométrie gamma	/	/

Annexe 2 : Méthode de calcul des bilans énergétiques

Méthode des pertes

Le calcul de rendement (R) est établi à partir :

- des pertes par fumées (P_f),
- des pertes par les imbrûlés (P_i),
- des pertes par rayonnement ou par convection thermique (P_r).

La formule de rendement est la formule suivante :

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

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

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 ».

$$P_i = C \times \frac{8133}{PCI} \text{ avec } C = C_0 \times \frac{I}{100 - I}$$

Avec :

C	Teneur en carbone des déchets solides en % du poids du combustible
C_0	Teneur en cendres du combustible brut en %
I	Teneur moyenne en carbone des résidus solides en %
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieure en KWh/kg

Le calcul des pertes par convection est évalué selon le tableau suivant :

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 %

Formule de Siegert

La formule de Siegert fait appel à un coefficient spécifique à chaque combustible.

Cette méthode de calcul du rendement est plus simple que la méthode des 4 pertes et ne fait pas appel à des mesures complexes ou à l'humidité du bois.

La formule est la suivante (résultat en %) :

$$\eta_c = 100 - f \times (T_f - T_a) / (\% \text{ CO}_2)$$

T_f : Température des fumées,

T_a : Température ambiante,

f est un facteur qui dépend du combustible : $f = 0,78$ pour le bois.

Annexe 3 : Synthèse des évaluations et recommandations par chaufferie

Evaluations

Chaufferie	Synthèse des évaluations
Site 1	<p>Combustibles : Il a été constaté que la forte proportion d'écorces conduit à un colmatage plus rapide des filtres à manches, en particulier au niveau de la trémie. Cette présence d'écorces pourrait aussi expliquer les dépassements en NOx des fumées.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins Les chaudières bois sont bien sollicitées sur la saison de chauffe avec un fonctionnement proche du régime nominal continu ce qui montre qu'il n'y a pas eu de surdimensionnement. Une analyse plus fine du taux de charge en période estivale pourrait permettre de déceler un éventuel intérêt à ne pas les faire fonctionner pour prévenir une usure prématurée due à un fonctionnement prolongé à régime réduit.</p> <p>Causes génératrices de pannes et dysfonctionnements Plusieurs grosses interventions ont déjà été réalisées notamment à deux reprises le remplacement de la pompe de centrale hydraulique d'injection pour les vérins des chaudières, le remplacement de la chaîne du convoyeur bois et de la chaîne du convoyeur cendres suite à une casse. Les échelles carrossables présente un problème de conception, il manque environ 1m dans chaque entrée pour qu'un camion puisse ouvrir ses portes. Il a été aussi constaté un problème d'automatisme du grappin qui perd ses points de repère lors de brouillard et de fortes humidités.</p> <p>Systèmes de traitement des fumées Le couplage multi-cyclone et filtre à manches permet d'atteindre les VLE réglementaires. Les filtres à manches sont by-passés lors des démarrages des chaudières. Le cordon chauffant du filtre à manches a été remplacé par un cordon deux fois plus long afin d'augmenter la puissance et ainsi diminuer les colmatages</p>
Site 2	<p>Combustibles : Il a été constaté, que l'approvisionnement était irrégulier, avec un taux d'humidité variable et parfois très élevé (proche de 55%). De plus l'approvisionnement en PBFV est de mauvaise qualité, présence de déchets de meubles avec contreplaqué, bois exotique, ce qui entraîne la production de mâchefer. L'augmentation de la production de cendres et des fines a été bien remarquée lorsque du PBFV est utilisé.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins Les deux chaudières bois ont couvert sur l'année 2013 environ 90% des besoins en fonctionnant à un régime moyen de 63% de leur charge nominale ce qui laisse penser que leur dimensionnement est correct.</p> <p>Mode de régulation lié à la fourniture de chaleur La gestion de la cascade entre les chaudières bois et gaz se fait en série et permet d'éviter tout démarrage intempestif des chaudières gaz. La régulation propre aux chaudières pourrait être améliorée en s'appuyant davantage sur les programmes de combustion (à réajuster) avec ajout éventuel d'un détecteur d'humidité.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes Plusieurs grosses interventions ont déjà été réalisées notamment la réfection du capotage du convoyeur, la réparation de vérins due aux accumulations de combustible dans les angles morts. Régulièrement les soudures sont à refaire sur les échelles en fond de silo. Il a été aussi constaté un problème de prise de feu dans les big-bags du filtre à manches. Les problèmes sur les échelles et les vérins peuvent provenir d'un combustible trop humide qui est alors plus lourd. La prise de feu dans le big bag peut provenir de fines encore incandescentes (contrôler les débits et T° de fumée) ou d'une réaction d'extinction de chaux vive en quantité trop importante dans les cendres.</p> <p>Systèmes de traitement des fumées Le couplage multi-cyclone et filtre à manches permet d'atteindre les VLE réglementaires. Les conditions de by-pass des filtres à manches ne sont pas bien connues (risque en été lorsque la charge baisse). Les manches ont été changées avec mise en place de manches 100% PTFE pour augmenter leur durée de vie.</p> <p>Appréciation générale La chaufferie fonctionne bien malgré quelques problèmes d'exploitation : grosse variation d'humidité sur le bois, et PBFV de mauvaise qualité, liée à la difficulté par l'exploitant de refuser les camions d'approvisionnement. L'installation est bien exploitée mais il y a un manque de suivi sur site concernant les éléments clés de la chaufferie (tonnage bois, cendres, analyse des fumées...)</p>
Site 3	<p>Combustibles : Les livraisons de bois sont toutes acceptées et le contrôle qualité s'effectue une fois le combustible déchargé. Le système de dépotage et de convoyage est adapté mais des problèmes de soudure des échelles en fond de silo ont provoqué de la casse dans les convoyeurs en aval. Le grappin sur pont roulant fonctionne bien.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins Les chaudières bois n'ont pas pour objectif de se substituer majoritairement au gaz. Elles couvrent actuellement environ 23% des besoins soit 65 GWh pour un engagement à 78 GWh dans la convention ADEME. Les engagements de production devraient pouvoir être tenus avec une diminution des pannes et casses dues à la première année de fonctionnement.</p> <p>Analyse du mode de régulation lié à la fourniture de chaleur Les deux chaudières bois sont en parallèle. Leur cascade est gérée manuellement du fait d'une présence 24/24 d'opérateurs. Elles sont supposées fonctionner à pleine charge en permanence (participation à hauteur de 20 à 30% du mix énergétique). La régulation de chaque chaudière se fait à partir des automates qui leur sont propres et</p>

Chaufferie	Synthèse des évaluations
	<p>des programmes de combustion qui sont choisis en fonction de l'humidité mesurée dans les fumées.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes Qualité du bois : le bois utilisé présente à la fois des taux d'humidité très variables et des valeurs hautes très élevées (58%) induisant des interventions régulières pour régler les paramètres de combustion et la production de mâchefer (qui peuvent bloquer la grille du foyer). Des indésirables sont parfois présents (bûches, glaçons de 80 cm x 80 cm...) provoquant de la casse dans les convoyeurs.</p> <p>Systèmes de traitement des fumées Le couplage multi-cyclone et filtre à manches fonctionne bien. Les filtres à manches sont by-passés lors des démarrages des chaudières. Le système de traitement des NOx est obligatoire pour tenir les VLE imposées mais il y a des problèmes de concentration en NH3 du fait de la difficulté à réguler l'injection d'urée: un analyseur en continu de NH3 va être mis en place pour améliorer l'injection d'urée.</p> <p>Analyse de l'état général de l'installation La chaufferie est récente mais a présenté de nombreux problèmes lors de sa première année d'exploitation : défaut sur matériel mis en place (casse échelles, remplacement grille foyer,...), et utilise du bois de mauvaise qualité. Ces incidents et pannes ont fortement dégradé le nombre d'heures de fonctionnement prévues mais devraient pouvoir être réglés dans les années à venir pour obtenir les performances attendues.</p>
Site 4	<p>Combustibles Le contrôle de qualité est fait de façon aléatoire. Lorsqu'il est fait, c'est pour vérifier la qualité du combustible et mesurer le taux d'humidité. Lors de la livraison, est indiqué le taux d'humidité sur le bon de commande, mais peu de mesures sont effectuées. Malgré les peu de contrôle, la qualité du bois est conforme à celle requise par la chaudière. La chaudière fonctionne avec 98% de plaquettes forestières, cependant il a été installé un broyeur fixe sur le silo afin de broyer les palettes et cagette produits sur le site.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins Le dimensionnement de la chaudière bois est parfait et la chaudière fortement sollicitée (taux de charge à 78%). L'installation est bien conçue au niveau du silo qui est profond avec une bonne contenance.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes A ce jour, aucune grosse intervention n'a été réalisée, ni aucune panne constatée. Il est prévu le remplacement de réfractaire au niveau du pousoir. Cette intervention sera réalisée par le chaudiériste sous garantie.</p> <p>Analyse des systèmes de récupération d'énergie A noter le bon fonctionnement de l'économiseur de fumées</p> <p>Analyse de l'état général de l'installation La chaufferie est récente et son installation fonctionne très correctement. L'exploitant est très satisfait de l'installation. La chaufferie est installée sur un site isolé en campagne donc sans problématique de vis-à-vis. Le bâtiment est simple, propre et correctement dimensionné en taille. Néanmoins, la méconnaissance des normes et réglementations liés à la chaudière bois fait défaut (mesures, vérification par organisme, traitement des cendres, recours à des palettes...). Les cendres sous foyer et issues du multi-cyclone sont récupérées dans une benne extérieure et sont stockées à l'extérieur sur un tas de remblais. L'exploitant est à la recherche d'une valorisation agricole. Les suies de l'électrofiltre sont récupérées dans les big-bags, qui sont ensuite entreposés à l'extérieur, à ce jour un stock de 4 big-bags, soit un an d'exploitation. L'exploitant n'a pas fait de démarche particulière pour leurs traitements mais il a l'intention de faire les analyses nécessaire pour cela.</p>
Site 5	<p>Combustibles Malgré un contrôle assez succinct, il y a un bon fonctionnement de l'approvisionnement, et pas de problème lié à la qualité du bois. Le maître d'ouvrage a prévu l'acquisition prochaine d'un analyseur d'humidité du combustible, afin que le contrôle soit aussi vérifié par le client et pas seulement par le fournisseur.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins La chaudière bois à couvert sur la saison de chauffe 2013 environ 5,5% des besoins. Le taux de charge est proche de 60%. Le taux de couverture est très dégradé en 2013 et inférieur au prévisionnel, à cause des pannes répétées sur la chaudière bois. La chaudière bois fonctionne actuellement en heures pleine charge environ 2 260 heures et uniquement en période hivernale. Il est prévu un système de stockage d'énergie, mais non réalisé à ce jour car le réseau de chaleur contient déjà 200m3 d'eau.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes Bien que la chaufferie soit récente, plusieurs grosses interventions ont déjà été réalisées : remplacements soupape et sécurité thermostatique, tête d'électrovanne avec hydro chaudière, sonde lambda, volets d'air primaire, maillons de grille, moteur hydraulique du convoyeur, carte électronique du filtre électrostatique. A quatre reprises une réparation a été faite à cause de fuites hydrauliques, aussi un rallongement de la butée de grille a été réalisé</p> <p>Analyse des systèmes de traitement des fumées Le couplage multi-cyclone et électrofiltre permet un bon traitement de fumées. L'humidité des cendres sous foyer est cependant très élevée : 65 %. Une amélioration de la gestion de l'eau de refroidissement pourrait être envisagée.</p> <p>Analyse de l'état général de l'installation La chaufferie est récente mais a déjà subi plusieurs grosses interventions. Les pannes répétées sur la chaudière ont dégradé le taux de couverture en 2013. L'expertise du constructeur a constaté quelques points faibles et de nombreux dysfonctionnements. En lien avec ces dysfonctionnements, le personnel a passé beaucoup de temps sur l'installation.</p>

Chaufferie	Synthèse des évaluations
Site 6	<p>Combustibles Le contrôle de la qualité est assez succinct, il se fait uniquement sur le taux d'humidité et par contrôle visuel. Il n'y a pas de contrôle plus poussé sur les combustibles. La mauvaise qualité du combustible engendre des pannes récurrentes de la chaufferie (présence de corps étrangers, mâchefers). L'exploitant a des difficultés pour trouver une qualité de bois correcte, constante et adaptée à la chaudière.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins La conception du silo n'est pas optimale, le volume de stockage est un peu faible surtout pour des semis, malgré une hauteur rehaussée par des plaques de contreplaqué. Le rendement de la chaudière est faible (67%) et inférieur aux attentes. La chaudière est surdimensionnée, avec un taux de charge annuel proche de 51%.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes Bien que la chaufferie soit récente, plusieurs grosses interventions ont déjà été réalisées, notamment les remplacements :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Convoyeur (corps étrangers dans le combustible) • Barreaux de plancher de grille (formation de mâchefers liés au combustible) • Montants latéraux du foyer • Voutes partie haute et basse (humidité du combustible) • Tasseaux tordus ou manquants sur le convoyeur <p>Des pannes récurrentes des vis et du convoyeur se sont produites, liées à la mauvaise qualité du combustible. Ces pannes se sont réduites en 2013 avec le changement d'un des fournisseurs de bois. Toutefois les corps étrangers restent nombreux au niveau des plaquettes forestières livrées actuellement. Le remplacement des réfractaires (latéraux et voute) a été accéléré par la mauvaise qualité du bois des dernières années (taux d'humidité allant jusqu'à 47 %, aujourd'hui le combustible est beaucoup plus sec).</p>
Site 7	<p>Combustibles Le contrôle qualité est bien réalisé (mesure d'humidité à chaque livraison). La qualité du bois est moyenne, l'humidité moyenne est correct (~33%), mais il contient beaucoup de fines, ce qui donne un taux élevés de cendres : supérieur à 5%. Le système de convoyage est adapté mais la chaufferie a du faire face à la casse du convoyeur bien que celle-ci soit récente. La consommation d'électricité 2 fois plus élevée que l'estimation, mais notre analyse montre que ces consommations sont cohérentes pour ce type d'installation</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins Le temps de fonctionnement équivalent pleine puissance semble indiquer une installation surdimensionnée par rapport aux besoins. Cette analyse repose sur une seule saison de fonctionnement, elle devra donc être validée sur les saisons suivantes.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes Les pannes constatées sur le convoyeur ne semblent pas liées à la qualité du bois, mais à une usure prématurée des équipements ou un défaut de conception.</p> <p>Analyse du système de traitement des fumées Le couplage multi-cyclone et filtre à manches fonctionne bien. Le filtre à manches est by-passé dans certaines conditions (T° trop faible < 115°C et T° trop élevée). Le système de traitement garantit des rejets < 20 mg/m03. Les premières mesures réalisées par un organisme de contrôle indique des rejets < 5mg/m03. Les mesures réalisées au cours de cette campagne ont donnés des résultats conformes. On remarque que les rejets de poussières sont plus élevés par rapport au premier contrôle (18 mg/m03 à 6% O2). L'état des manches filtrantes est à suivre. Le rejet de HCl élevé serait à confirmer par une autre mesure car il n'est pas expliqué.</p> <p>Analyse de l'état général de l'installation La chaufferie est récente mais a présenté des problèmes lors de sa première année d'exploitation qui ont nécessité des arrêts sur l'installation défaut sur matériel mis en place (casse du convoyeur, des guides vérins,...), qualité de bois moyenne.</p>
Site 8	<p>Combustibles Le contrôle qualité est bien réalisé. Le système de convoyage du combustible fonctionne bien malgré la chaîne du convoyeur bois qui a déjà cassé à plusieurs reprises suite à des indésirables dans le bois (longueurs trop importantes).</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins La chaudière bois apparait aujourd'hui un peu trop puissante (d'autant plus avec l'économiseur) pour la charge du réseau. Son fonctionnement en été implique un taux de charge très réduit dégradant fortement les performances environnementales et énergétiques de l'installation. La cascade bois/gaz fonctionne bien, la vanne 3-voie sur la chaudière bois permet de la protéger et d'optimiser son fonctionnement.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes L'élargissement de la trémie avant le pousoir en entrée de la chaudière a permis d'éviter les blocages de combustible à ce niveau et donc des efforts sur la chaîne. Il a été constaté que les opérations de maintenance où la chaîne du convoyeur cendres en voie humide était laissée hors d'eau avaient tendance à la fragiliser : casse régulière au redémarrage. Les problèmes de condensation sur l'économiseur peuvent provenir d'une ou plusieurs causes combinées : température de retour réseau trop faible, surdimensionnement de l'économiseur pour des gammes de débit de fumée trop faibles, phénomènes de condensation sur parois froides liées à un manque d'isolation de l'économiseur et une ventilation forte de la chaufferie avec des températures extérieures froides. Les condensats récupérés sont chargés et ne sont pas traités avant rejet au réseau d'eau usées.</p> <p>Analyse du système de traitement des fumées La chaîne de filtration fonctionne bien quand l'installation est bien en charge, par contre, en dehors de la saison de chauffe, quand la chaudière est en sous charge le filtre à manches est by-passé dégradant fortement le niveau de polluants émis par les fumées.</p> <p>Analyse de l'état général de l'installation La chaufferie a deux saisons de chauffe de fonctionnement mais a présenté quelques problèmes lors de ses deux premières années d'exploitation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elargissement de la trémie entrée chaudière

Chaufferie	Synthèse des évaluations
	<ul style="list-style-type: none"> • Casse des chaînes de convoyeur bois et cendres • Problème de condensation sur économiseur • Difficultés à atteindre les taux de couverture attendues
Site 9	<p>Combustibles Les livraisons de bois sont vérifiées par un contrôle visuel. Un contrôle d'humidité par four micro-ondes va être mis en place. Il n'y a pas de contrôle de granulométrie du combustible ce qui occasionne des fractions de fines importantes. De plus, quelques queues de déchetage sont parfois présentes pouvant endommager le système de transfert. Il est impossible de faire livrer le combustible dans le silo par des semi-remorques comme prévu initialement, le volume mort a été mal évalué. La livraison se fait donc par bennes basculantes de 60 m³. Pour vider complètement le silo, la chaudière doit être arrêtée, et cette durée d'arrêt est importante et a dû se faire à plusieurs reprises (après vis cassée par des indésirables). Le renvoi d'angle, entre les bras rotatifs et la vis d'extraction est une pièce sur laquelle s'exercent beaucoup d'efforts et qui présente donc une fragilité particulière.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins La mise en service récente ne permet pas encore d'apprécier le bon dimensionnement de la chaudière bois. Le faible taux de charge laisse cependant penser à une inadéquation de la puissance disponible par rapport aux besoins.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes Plusieurs grosses interventions ont déjà été réalisées notamment le remplacement de la vis de récupération due à des plaquettes forestières de mauvaise qualité (queue de déchetage). Du fait de l'absence de séparateur d'air, le compresseur a dû être remplacé. La chaudière bois a été plusieurs fois en arrêt du fait du déclenchement intempestif du capteur de bourrage de la vis de transfert et de problèmes d'adéquation entre la pression dans le foyer et le réglage des clapets coupe-feu. A la sortie de l'électrofiltre, une formation de goudron a été constatée (surtout l'été) probablement due à un problème de fonctionnement en sous-charge de la chaudière impliquant l'arrêt de l'électrofiltre qui n'est pas by-passé. Il est également constaté la formation de mâchefers dans les cendres de la chaudière qui sont certainement dus à une température trop élevée dans le foyer et une quantité de fines trop importante dans le bois.</p> <p>Analyse des systèmes de traitement des fumées Le traitement des fumées s'effectue par un multi-cyclone qui est intégré à la chaudière et par un électrofiltre. L'électrofiltre est by-passé en cas d'encrassement détecté par une chute de tension. Le ramonage de l'électrofiltre implique de la part de l'exploitant de manipuler les fines très volatiles et potentiellement toxiques. Les rejets élevés mesurés au moment de l'étude traduisent un mauvais fonctionnement de l'électrofiltre avec des arrêts intempestifs non compatibles avec une exploitation normale.</p> <p>Analyse de l'état général de l'installation La chaufferie est récente mais a présenté de nombreux problèmes lors de sa première année d'exploitation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise qualité de bois (queues de déchetage, forte proportion de fines) • Défaut sur matériel mis en place (compresseur à remplacer) • Problème de réglage et de pression • Gestion des cendres et fines (stockage en tas dans la chaufferie) <p>Des actions ont été mises en place pour remédier à ces problèmes et un suivi plus précis des paramètres va permettre de mieux apprécier la performance de l'installation. Lors de l'intervention de LECES, il a été constaté que le personnel commençait à se former à l'installation.</p>
Site 10	<p>Combustibles Les livraisons de bois sont bien contrôlées (refus systématique de la livraison si > 50% d'humidité) ce qui permet d'avoir un bois de qualité. Le contrôle qualité s'effectue à l'arrivée du camion avec une canne, puis en étuve après livraison. Le contrôle de la granulométrie se fait sur un camion sur quatre.</p> <p>Analyse du dimensionnement par rapport aux besoins La chaudière bois a couvert sur la saison de chauffe 2012-2013 environ 77% des besoins. Elle a un taux de charge élevé ce qui montre qu'elle fonctionne régulièrement proche de son régime nominal et qu'il n'y a pas de problèmes de surdimensionnement. Sans l'unité de cogénération et la logique financière qui l'accompagne, la chaudière bois pourrait fonctionner un plus grand nombre d'heure dans l'année.</p> <p>Analyse du mode de régulation lié à la fourniture de chaleur Les réglages de combustion de la chaudière bois se font sur détecteur d'humidité, et permettent un bon contrôle des paramètres de combustion et la minimisation des imbrulés.</p> <p>Identification de causes génératrices de pannes La chaufferie fonctionne bien, seule une intervention pour le remplacement des poches du filtre à manches suite à un arrosage causé par un défaut de sonde de température a dû être nécessaire. La sonde hygrométrique mise en place pour l'automatisation des modifications de réglages de combustion a été très bénéfique. Lors de son fonctionnement, le grappin a tendance à frotter sur les murs séparatifs pour éviter au maximum les volumes morts provoquant des traces qui restent toutefois sans danger structurel.</p> <p>Analyse des systèmes de récupération d'énergie Le condenseur de 800 kW fonctionne bien en dessous de 7°C extérieurs et selon les conditions de température retour, il peut amener plus de 800 kW. Le régime de température du réseau est de 70/50 (pas de production d'ECS à partir du réseau dans les sous-stations) ce qui permet le bon fonctionnement du condenseur sans pompe à chaleur intermédiaire.</p> <p>Analyse des systèmes de traitement des fumées Le couplage multi-cyclone et filtre à manches permet d'atteindre les VLE réglementaires. Les filtres à manches sont by-passés lors des démarrages des chaudières. La forte teneur en CO est inexpliquée.</p> <p>Analyse de l'état général de l'installation La chaufferie est récente et ne présente pas de problèmes particuliers. Le bon contrôle du combustible et la bonne exploitation qui en est faite permettent de garantir de bonnes performances. Seule une accumulation de poussières pouvant à terme présenter un risque ATEX est à relever.</p>

Recommandations

Chaufferie	Synthèse de recommandations
Site 1	<p>La chaudière fonctionne toute l'année. Elle est utilisée dans de bonnes conditions l'hiver (sous réserve de la disponibilité des chaudières) mais son taux de charge semble faible sur la période estivale.</p> <p>Les rejets atmosphériques mesurés en fonctionnement nominal sont faibles. Les valeurs limites en vigueur ou à venir sont respectées, hormis la teneur en NOx qui devraient pouvoir se régler en agissant sur la qualité du combustible (présence d'écorces). L'exclusion complète des écorces permettrait d'améliorer les performances de l'ensemble chaudière/filtration en particulier en diminuant les encrassements. Les analyses de granulométrie pourraient être effectuées de façon un peu plus régulière (3 à 4 fois par an), éventuellement directement par l'exploitant avec un tamis.</p> <p>Les difficultés rencontrées au niveau du grappin et de la perte de ses repères due à la formation de condensation dans le silo devraient être réglées par la mise en place d'une ventilation forcée d'air chaud depuis la chaufferie comme prévu.</p> <p>La mise en place d'un détecteur d'humidité sur les chaudières asservi à leur régulation permettrait un réglage plus régulier des paramètres de combustion et donc une meilleure maîtrise des rendements et des émissions de polluants. Une optimisation des régimes de fonctionnement semble envisageable en mi-saison et en période hivernale pour augmenter le taux de couverture biomasse.</p> <p>Les teneurs en zinc, cadmium, plomb et PCDD/F dépassent la teneur maximale des cendres volantes pour les combustibles de type b(v). Un processus de suivi plus poussé du combustible et de ces cendres sera à envisager en cas de passage sous le régime enregistrement.</p>
Site 2	<p>Les chaudières fonctionnent sur toute l'année. Elles sont bien dimensionnées avec un taux de charge correct sur l'année.</p> <p>Pour mieux contrôler la combustion, la mise en place d'un détecteur d'humidité et l'utilisation des programmes de combustion serait intéressante.</p> <p>Les émissions de la chaudière sont bien maîtrisées. Elles respectent les valeurs réglementaires de la rubrique 2910B pour l'Enregistrement.</p> <p>Concernant les cendres volantes, nous observons un dépassement de la teneur en cadmium imposé pour les combustibles de type b(v). Un processus de suivi plus poussé du combustible et de ces cendres serait à envisager, et obligatoire en cas de passage sous le régime enregistrement.</p>
Site 3	<p>Les deux chaudières fonctionnent en complément d'autres installations délivrant une puissance nettement plus importantes que les chaudières bois. Elles sont utilisées dans de bonnes conditions avec un fonctionnement stable : un taux de charge et un rendement élevés. La chaufferie bois a moins de 2 ans de fonctionnement : elle a rencontré de nombreux incidents de fiabilité au cours de la première année. Il conviendra de faire un bilan après plusieurs années de fonctionnement.</p> <p>Le contrôle avant livraison de l'humidité du combustible permettrait de refuser les camions qui sont à plus de 50% d'humidité. Un système de canne ou de seau autrichien permettrait un contrôle rapide avant acceptation des camions.</p> <p>Le suivi du nombre d'heures de fonctionnement et de la charge des chaudières permettrait de mieux analyser les performances des chaudières et de mieux optimiser leur fonctionnement.</p> <p>La protection des bennes à cendres du froid (paroi coupe-vent ou cordon chauffant) permettrait d'éviter tout risque de gel ayant pour conséquence un possible arrêt d'une chaudière en période hivernale où les besoins sont au maximum.</p> <p>Les émissions sont bien maîtrisées sur cette installation. Il n'a pas été détecté de paramètre en dehors des prescriptions de leur arrêté préfectoral et des VL de l'arrêté du 26/08/2013 Autorisation.</p>

Chaufferie	Synthèse de recommandations
Site 4	<p>L'exploitant n'est pas informé des nouveaux textes réglementaires. L'exploitation et la gestion des cendres, ne sont pas conformes à la réglementation. Un abandon du recours aux palettes du site en combustible vu leur faible proportion et la faible puissance du site serait à envisager pour éviter une requalification du site en enregistrement.</p> <p>Nous recommandons également de faire un suivi plus précis de l'humidité du bois (mesures plus systématiques).</p> <p>Il serait intéressant de relever la production mensuelle de chaleur de la chaudière bois et de suivre le fonctionnement de la chaudière propane. Il serait enfin judicieux de suivre les consommations d'électricité et d'eau de la chaufferie.</p>
Site 5	<p>Le maître d'ouvrage n'est pas au courant des nouveaux textes réglementaires. Le maître d'ouvrage n'a pas eu de retour de la préfecture sur les VLE suite à son dépôt du dossier ICPE lié à la chaufferie. Un éclaircissement du statut réglementaire du « bois industriel » est à prévoir au regard de la 2910.</p> <p>Le maître d'ouvrage a prévu l'acquisition prochaine d'un analyseur d'humidité du combustible, afin que le contrôle d'humidité du combustible soit aussi vérifié par le client et pas seulement par le fournisseur. La mise en place d'un contrôle plus précis sur le combustible est conseillée : test d'humidité à chaque livraison et test de granulométrie avec des tamis de façon aléatoire pour diminuer la quantité de fines.</p> <p>Nous suggérons enfin de compléter le cahier des charges sur la granulométrie du combustible : le respect d'une classe de granulométrie C1 ou C2 (classification du CIBE) est à ajouter en complément des caractéristiques déjà précisées.</p> <p>Le fournisseur de chaudière doit encore revoir certains points de l'installation défectueux : calorifugeage du boîtier électrique de l'électrofiltre extérieur pour éviter les condensations à ce niveau, et vibreur à mettre en place sur la goulotte de récupération des cendres du multi-cyclone car son colmatage est régulier.</p> <p>La mise en place d'un détecteur d'humidité avec régulation des programmes de combustion de la chaudière pourrait permettre une combustion mieux maîtrisée et donc d'atteindre de meilleurs rendements de combustion. La mise en place de programmes de combustion sur la chaudière en fonction de l'humidité et de la qualité du bois serait intéressante pour améliorer les performances énergétiques et environnementales.</p> <p>La teneur en cadmium dépasse la teneur maximale des cendres volantes issues des combustibles de type b(v). Un processus de suivi plus poussé du combustible et de ces cendres sera à envisager en cas de passage sous le régime enregistrement.</p>
Site 6	<p>La mise en place d'un contrôle plus précis sur le combustible est conseillée : plusieurs échantillonnages pour vérification de l'absence de corps étrangers (refus de livraison le cas échéant), test d'humidité à chaque livraison et test de granulométrie avec des tamis de façon aléatoire pour diminuer la quantité de fines.</p> <p>Nous suggérons une modification du cahier des charges sur la granulométrie du combustible : la G50 autorise une grande proportion de fines, le respect d'une classe de granulométrie C1 ou C2 (classification du CIBE) est à privilégier. La qualité des combustibles est à surveiller, en particulier la teneur en plomb des bois utilisés est anormalement élevée.</p> <p>L'exploitant n'est pas au courant des nouveaux textes réglementaires et aux principales mesures liées au régime d'enregistrement si l'installation continue à utiliser des déchets de bois. Un des impacts concernant les émissions, impliquerait la mise en place d'un électrofiltre ou d'un filtre à manche pour lesquels il n'y a pas de place disponible en chaufferie (possibilité à l'extérieur).</p> <p>Les rejets mesurés pendant la campagne de mesure avec un taux de charge de 30 % montrent une marche assez instable avec des variations importantes sur de courtes durées des gaz majeurs (O₂, CO₂). Cela se traduit par des émissions assez élevées des autres gaz : CO, COVNM et NOx. Les rejets de PCDD/F et de métaux, surtout le plomb, sont élevés.</p> <p>Dans les cendres, il a été observé la présence de nombreux éléments métalliques liés à la mauvaise qualité des combustibles. Concernant les cendres sous foyer, nous observons un dépassement des seuils relatif à l'épandage de l'arrêté du 24 septembre 2013 pour le cuivre. Concernant les cendres du multi-cyclone, nous observons un dépassement des seuils relatif à l'épandage de l'arrêté du 24 septembre 2013 pour les teneurs en zinc, cadmium et plomb.</p> <p>Les teneurs en cadmium, plomb et PCDD/F des cendres du multi-cyclone dépassent les teneurs maximales des cendres volantes issues des combustibles de type b(v). Un processus de suivi plus poussé du combustible et de ces cendres sera à envisager en cas de passage sous le régime enregistrement.</p>

Chaufferie	Synthèse de recommandations
Site 7	<p>La chaudière fonctionne en complément d'une chaudière gaz. Le bilan de son exploitation après moins d'un an de fonctionnement montre un taux de charge très faible. La chaudière est surdimensionnée par rapport aux besoins actuels.</p> <p>Mise en place d'un contrôle plus précis sur le combustible : test d'humidité à chaque livraison et test de granulométrie avec des tamis de façon aléatoire pour diminuer la quantité de fines. Modification du cahier des charges sur la granulométrie du combustible : la G50 autorise une grande proportion de fines, le respect d'une classe de granulométrie C1 ou C2 (classification du CIBE) est à privilégier.</p> <p>La diminution du taux de fines dans le combustible impliquera des besoins de ramonages moins fréquents et la diminution de la production de mâchefers.</p> <p>Une formation complémentaire sur les réglages de combustion pourrait être réalisée sur la deuxième année pour éviter une teneur en oxygène trop importante dans les fumées et permettre une optimisation des rendements et éviter des températures de foyer trop élevées qui pourraient à terme endommager de façon prématurée le réfractaire.</p> <p>Une attention toute particulière doit être portée au taux de charge de la chaudière : son fonctionnement proche du minimum technique implique une usure prématurée de l'équipement et une dégradation importante des performances énergétiques (rendement) et environnementales (électrofiltre à l'arrêt).</p> <p>Cela se traduit par des rejets élevés avec des dépassements des VLE futures pour de nombreux paramètres.</p>
Site 8	<p>La chaudière bois fonctionne toute l'année avec des chaudières gaz. L'analyse réalisée sur une année semble montrer qu'elle est surdimensionnée par rapport aux besoins. Cela s'est vérifié au cours des mesures réalisées début mars 2014 : avec une température clémente, le taux de charge est passé en dessous de 50 %.</p> <p>Il s'agit de la première saison de fonctionnement, il est donc un peu tôt pour tirer des conclusions concernant les principaux indicateurs de performance (taux de couverture, rendement,...). La prochaine saison de chauffe permettra de consolider ces résultats.</p> <p>Malgré des conditions d'exploitation dégradées pendant les mesures avec un taux de charge faible (inférieur à 50 %), les rejets mesurés sont conformes aux valeurs des chaudières bois soumises à déclaration.</p> <p>On relève une valeur élevée sur HCl qui mériterait d'être expliquée ou confirmée au cours d'un prochain contrôle ; Par rapport à la mesure précédente de rejets de poussières réalisée, les rejets ont augmenté. Il conviendrait de surveiller l'état des manches filtrantes.</p> <p>Les teneurs en métaux (zinc, cadmium, plomb) des cendres volantes dépassent les teneurs maximales des cendres volantes issues des combustibles de type b(v). Un processus de suivi plus poussé du combustible et de ces cendres sera à envisager en cas de passage sous le régime enregistrement.</p>
Site 9	<p>Le contrôle combustible fonctionne bien. La teneur en chlore mesurée sur le combustible au cours des essais est élevée et demanderait à être contrôlée à nouveau.</p> <p>La mise en place d'un détecteur d'humidité avec régulation des programmes de combustion de la chaudière pourrait permettre une combustion mieux maîtrisée et donc d'atteindre de meilleurs rendements de combustion. Concernant l'économiseur, le problème doit être résolu rapidement pour ne pas conduire à une corrosion prématurée de l'équipement. Les températures de retour réseau sont annoncées élevées et ne semblent pas être la cause première de la condensation observée, aussi des investigations spécifiques apparaissent nécessaires.</p> <p>L'installation est bien suivie, cependant une analyse plus fine du fonctionnement de l'économiseur serait intéressante (puissance moyenne dégagée, MWh récupérés)...et la mise en place de programmes de combustion sur la chaudière en fonction de l'humidité et de la qualité du bois serait intéressant pour améliorer les performances énergétiques et environnementales.</p> <p>Les teneurs en zinc, cadmium, plomb et PCDD/F dépassent aussi la teneur maximale pour les cendres volantes issues de la combustion de biomasse de type b(v) imposant une information des installations classées et le doublement de la fréquence d'analyse des combustibles utilisés et des cendres volantes.</p>
Site 10	<p>Le suivi des performances de la chaudière et du condenseur séparément permettrait une meilleure analyse des performances respectives.</p> <p>Les émissions sont bien maîtrisées sur cette installation. On observe cependant des pics réguliers de CO qui dépassent des prescriptions de l'arrêté préfectoral et de l'arrêté du 26/08/2013 Autorisation. A voir si le phénomène est lié à l'abaissement de la température des fumées ou à un réglage des paramètres de combustion.</p> <p>La teneur en cadmium dépasse aussi la teneur maximale pour les cendres volantes issues de la combustion de biomasse de type b(v) fixée à l'article 8 de l'arrêté du 24/09/2013. En toute rigueur, cet article ne s'applique pas ici. Les émissions liquides du condenseur n'ont pas été contrôlées.</p>

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : 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.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr