

Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse

CAMPAGNE DE MESURE 2016

Version révisée de Mars 2018

Étude réalisée avec le soutien de l'ADEME par : *LECES*
N° de contrat : 1501C0025

Coordination technique : *APRIL Marie*
Direction Productions et Energies Durables
Service Bioressources



RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

(Citer les membres du Comité de pilotage et/ou du comité de suivi ou de relecture et/ou du consortium de recherche)

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

- Marie April
- Simon Thouin

En français :

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.

En anglais:

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

RESUME	6
ABSTRACT	10
1. GENERALITES	14
1.1. Préambule	14
1.2. Contexte du projet	14
1.3. Présentation du groupement ayant réalisé d'étude	14
1.3.1. Présentation de LECES	15
1.3.2. Présentation de INDIGGO	15
1.3.3. Présentation de MicroPolluants Technologie SA	15
1.4. Objectif de l'expertise et approche de la problématique	16
2. PRESENTATION DES CHAUFFERIES	16
3. SYNTHESE DE LA REGLEMENTATION APPLICABLE	17
4. PRESENTATION DES MESURES REALISEES	21
4.1. Bilans énergétiques	21
4.1.1. Bilans énergétiques instantanés	21
4.1.2. Bilans sur la saison de chauffe	22
4.2. Caractérisation des combustibles	22
4.3. Caractérisation des cendres	23
4.4. Caractérisation des émissions polluantes	24
4.5. Planning des interventions	24
5. EXPLOITATION DES RESULTATS	25
5.1. Bilan détaillé par chaufferie	25
5.2. Résultats énergétiques	25
5.2.1. Bilans énergétiques instantanés	25
5.2.2. Bilans sur la saison de chauffe	27
5.3. Résultats environnementaux	29
5.3.1. Caractéristiques des combustibles	29
5.3.2. Caractéristiques des cendres	32
5.3.3. Rejets atmosphériques	40
5.3.4. Relations entre les émissions et la marche des installations	47
5.4. Synthèse des évaluations par chaufferie	48
5.4.1. Analyse des combustibles	48
5.4.2. Analyse de la conception	49
5.4.3. Analyse du dimensionnement	49
5.4.4. Analyse des modes de régulation	50
5.4.5. Causes génératrices de pannes et dysfonctionnements	50
5.4.6. Systèmes de traitement des fumées	51
5.4.7. Gestion des cendres	52
5.4.8. Système de récupération d'énergie	52
6. RECOMMANDATION	52
6.1. Recommandations sur les combustibles	52

6.2. Recommandations sur la conception	53
6.3. Recommandations sur l'exploitation	54
7. BILAN NATIONAL	54
7.1. Comparaison aux données disponibles sur les émissions	54
7.2. Evaluation des ratios spécifiques par chaudière	56
8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
SIGLES ET ACRONYMES	62
Incertitudes élargies de mesure	65

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : PRESENTATION DES CHAUFFERIES EXPERTISEES.....	16
TABLEAU 2 : VLE REJETS ATMOSPHERIQUES – INSTALLATIONS SOUMISES A DECLARATION RUBRIQUE 2910 A	18
TABLEAU 3 : VLE CENDRES D'EPANDAGE – INSTALLATIONS SOUMISES A DECLARATION/ENREGISTREMENT RUBRIQUE 2910 A	18
TABLEAU 4 : VLE REJETS ATMOSPHERIQUES – INSTALLATIONS SOUMISES A ENREGISTREMENT RUBRIQUE 2910 B	19
TABLEAU 5 : VLE CENDRES – INSTALLATIONS SOUMISES A ENREGISTREMENT RUBRIQUE 2910 B COMBUSTIBLE B(v)	19
TABLEAU 6 : VLE COMBUSTIBLE DE TYPE B(v) – INSTALLATIONS SOUMISES A ENREGISTREMENT RUBRIQUE 2910 B	19
TABLEAU 7 : VLE APPLICABLES POUR LES DIFFERENTS SITES.....	20
TABLEAU 8 : EVOLUTIONS REGLEMENTAIRES DIRECTIVE 2015/2193	21
TABLEAU 9 : COLLECTE DES CENDRES PAR CHAUDIERE	23
TABLEAU 10 : PLANNING DES CAMPAGNES DE MESURES	24
TABLEAU 11 : BILANS ENERGETIQUES INSTANTANES.....	25
TABLEAU 12 : ANALYSE DES COMBUSTIBLES (METAUX EN MG/KG MS).....	29
TABLEAU 13 : ANALYSE DES COMBUSTIBLES (AUTRES COMPOSES).....	30
TABLEAU 14 : COMBUSTIBLES – COMPARAISON AVEC DES VALEURS ANTERIEURES	32
TABLEAU 15 : REPARTITION MASSIQUE DES CENDRES PAR CHAUFFERIE.....	33
TABLEAU 16 : CENDRES SOUS FOYER : ANALYSE DES METAUX	34
TABLEAU 17 : CENDRES SOUS FOYER : ANALYSE DES ELEMENTS ORGANIQUES	34
TABLEAU 18 : CENDRES DE MULTI-CYCLONES : ANALYSE DES METAUX.....	35
TABLEAU 19 : CENDRES DE MULTI-CYCLONES : ANALYSE DES ELEMENTS ORGANIQUES.....	35
TABLEAU 20 : VALEURS FERTILISANTES DES CENDRES SOUS FOYER.....	36
TABLEAU 21 : CENDRES VOLANTES : ANALYSE DES METAUX EN MG/KG MS.....	37
TABLEAU 22 : CENDRES VOLANTES : ANALYSE DES ELEMENTS ORGANIQUES ET HUMIDITE	38
TABLEAU 23 : RADIOACTIVITE DES CENDRES	39
TABLEAU 24 : COMPARAISON DE LA RADIOACTIVITE DES CENDRES AVEC L'ETUDE DE 2007 ET 2014.....	40
TABLEAU 25 : EMISSIONS DE PARTICULES RAMENEES A 6 % O ₂	40
TABLEAU 26 : REJETS DE PARTICULES PAR TYPE DE FILTRATION	41
TABLEAU 27 : EMISSIONS DE METAUX RAMENEES A 6 % O ₂	42
TABLEAU 28 : REJETS DE METAUX PAR TYPE D'EPURATION	43
TABLEAU 29 : EMISSIONS DE GAZ MAJEURS ET AEROSOLS ACIDES RAMENEES A 6 % O ₂	43
TABLEAU 30 : EMISSIONS DE COMPOSES ORGANIQUES RAMENES A 6 % O ₂	46
TABLEAU 31 : COMPARAISON AVEC LES CAMPAGNES ADEME PRECEDENTES.....	54
TABLEAU 32 : EVOLUTION DES EMISSIONS DE POUSSIERES PAR TYPE DE FILTRATION DEPUIS 2003	56
TABLEAU 33 : FACTEURS D'EMISSION SPECIFIQUE PAR CHAUFFERIE	57
TABLEAU 34 : FACTEURS D'EMISSION SPECIFIQUE PAR TYPE D'EPURATION	57
TABLEAU 35 : COMPARATIF DE FACTEURS D'EMISSION DEPUIS 2003	58

Liste des figures

FIGURE 1 : COMPARAISON DES MARCHES – VALEURS MOYENNES ANNUELLES ET VALEURS INSTANTANÉES	26
FIGURE 2 : RENDEMENT ET TAUX DE CHARGE INSTANTANÉ	26
FIGURE 3 : RENDEMENT ANNUEL DES CHAUDIÈRES	27
FIGURE 4 : RENDEMENT ANNUEL ET TAUX DE COUVERTURE.....	28
FIGURE 5 : RENDEMENT ANNUEL ET TAUX DE CHARGE	28
FIGURE 6 : GRANULOMÉTRIE DES COMBUSTIBLES.....	31
FIGURE 7 : ANALYSE MOYENNE DES COMBUSTIBLES AVEC LES SEUILS DES COMBUSTIBLES B(V) DE L'ARRÊTE PG ENREGISTREMENT (HORS SITE N°5).....	31
FIGURE 8 : ANALYSE DES CENDRES PAR RAPPORT AUX SEUILS DES ARRÊTES PERMETTANT L'ÉPANDAGE.....	36
FIGURE 9 : ANALYSE DES CENDRES PAR RAPPORT AUX SEUILS DE L'ARRÊTE PG ENREGISTREMENT.....	38
FIGURE 10 : ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES.....	41
FIGURE 11 : ÉMISSIONS DE CO	44
FIGURE 12 : ÉMISSIONS DE NOX	44
FIGURE 13 : ÉMISSIONS DE SO ₂	45
FIGURE 14 : ÉMISSIONS DE PCDD/F	46
FIGURE 15 : ÉMISSIONS DE CO SUR LE SITE N°4	47
FIGURE 16 : TAUX DE CHARGE ANNUEL DES CHAUDIÈRES	49
FIGURE 17 : ÉVOLUTION DES REJETS DE POUSSIÈRES, CO, COVNM, NOX, SO ₂ DEPUIS 2003 (MG/MO ³ A 6% O ₂)	55

Annexes

Annexe 1 : Protocoles de mesures

Résumé

La présente étude a concerné la réalisation d'expertises énergétiques et de mesures de polluants sur 10 installations biomasse de puissance comprise entre 300 kW et 21 MW. Les chaudières étaient récentes (démarrées entre 2012 et 2014). L'évaluation concerne les compartiments suivants : bilans énergétiques, émissions atmosphériques, combustibles et cendres.

Cette étude complète les investigations réalisées par l'ADEME en 2007, 2009 et 2014. Au cours de cette campagne, nous avons noté que toutes les chaudières sont maintenant équipées de techniques de filtration des émissions atmosphériques, ce qui n'était pas encore le cas en 2014.

Bilans énergétiques

Les évaluations énergétiques réalisées sur les chaudières montrent globalement des rendements conformes aux prescriptions des constructeurs.

Les installations apparaissent bien dimensionnées et bien utilisées. On note deux installations dont les taux de charge sont encore faibles mais les projets d'extension du réseau justifient le dimensionnement réalisé. Une seule chaufferie de petite taille est manifestement surdimensionnée par rapport aux besoins.

On relève encore un défaut d'instrumentation ne permettant pas à certaines chaufferies d'avoir un bon 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 semble mieux maîtrisée que dans les campagnes précédentes et les réglages de combustion mieux ajustés en fonction de l'humidité.

On relève encore des pannes liées aux impuretés et indésirables du combustible qui sont à l'origine d'incidents dans le système d'alimentation. Ce phénomène déjà constaté au cours des campagnes précédentes semble toutefois en diminution.

Une grande majorité de chaufferies utilise un mélange de plaquettes forestières et de broyat d'emballages bois. Les exploitants ont fait la démarche pour passer en statut SSD (Sorti du Statut de Déchet) de façon à rester sous un régime de Déclaration. Une seule chaufferie était en Enregistrement au cours de l'étude : elle a prévu d'engager les démarches en 2017 pour repasser en régime de Déclaration.

La qualité des combustibles apparaît satisfaisante vis-à-vis des critères suivis. On note toutefois que pour une chaufferie passée en statut SSD, un meilleur suivi de la qualité du combustible est à réaliser.

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.

Différents types de cendres ont été analysés par chaudière selon les procédés de collecte des sites :

- les cendres sous foyer seules,
- les cendres sous foyer mélangées au cendres des multi-cyclones (pratique la plus courante car ces cendres chaudes sont refroidies à l'eau et recueillies dans un collecteur unique),
- les cendres de multi-cyclones seules,
- les cendres volantes ou fines d'épuration issues des filtres à manches ou des électrofiltres.

Les analyses réalisées ont montré :

Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse

- une différence notable de concentrations pour de nombreux éléments (granulométrie, métaux, PCDD/F, radioactivité) entre les cendres sous foyer ou de multi-cyclones et les fines d'épuration : les fines d'épuration concentrent les éléments volatiles au cours de la combustion qui se condensent sous forme de fines particules,
- les cendres sous foyer seules ou les cendres sous foyer mélangées avec les cendres de multi-cyclones respectent les valeurs limites des arrêtés pour un épandage agricole,
- les cendres de multi-cyclones seules respectent les valeurs limites des arrêtés pour un épandage agricole sauf pour le cadmium,
- les fines d'épuration dépassent les seuils pour épandage : un site mélange toutefois ces cendres avec les autres cendres collectées pour épandage.

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, HAP), les métaux lourds, les poussières fines et des traceurs de combustion du bois (carbone élémentaire et organique).

Comme déjà observé au cours des campagnes précédentes, la tendance est à une amélioration de la maîtrise des rejets : peu de sites dépassant les VLE existantes ou même les VLE programmées pour les années à venir.

Pour les poussières, toutes les chaudières étudiées respectent leurs VLE respectives ainsi que le seuil de rejets de poussières de 50 mg/m_0^3 à 6% O_2 (VLE réglementaire à l'horizon 2018). Huit sites sur neuf ont des rejets inférieurs à 10 mg/m_0^3 à 6% O_2 .

Toutes les chaudières respectent aussi leurs VLE respectives concernant les rejets de NO_x .

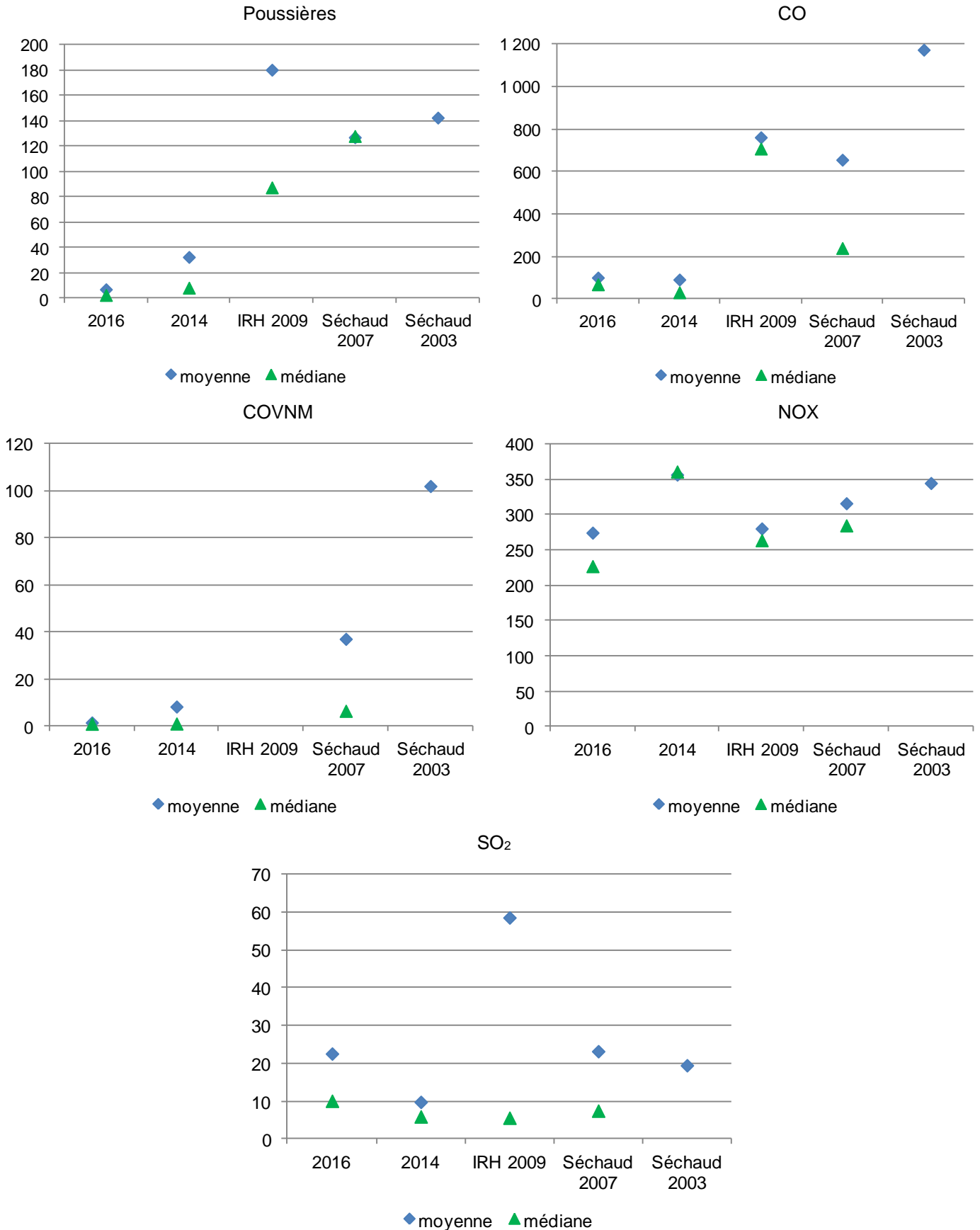
Concernant les autres principaux polluants réglementés :

- un site soumis à Déclaration dépasse la VLE de 250 mg/m_0^3 à 6% O_2 pour CO (certainement à cause d'un automatisme à améliorer : présence de pics dans les rejets),
- un site soumis à Déclaration dépasse légèrement la VLE de $0,1 \text{ ng/m}_0^3$ I-TEQ à 6% O_2 pour les PCDD/F.

Les émissions d'autres polluants sont faibles, en particulier les métaux.

La figure suivante présente sous forme graphique les médianes et moyennes obtenues au cours des différentes campagnes d'étude.

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



On remarque une baisse significative des rejets depuis le début de cette série de campagnes de mesure, à l'exception des NOx et du SO₂.

Les raisons identifiées pour les progrès 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, les systèmes d'épuration ne sont en général pas dimensionnés pour abattre ce polluant. Les émissions sont liées au combustible dont la concentration en soufre peut être très variable. On observe ainsi une ou deux valeurs élevées au cours de chaque campagne de mesure.

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 foyer de technologie bas-NOx.

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

- Améliorer la maîtrise de la qualité des approvisionnements afin de réduire les incidents de fonctionnement et respecter les critères de qualification SSD dans le temps,
- 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.

Abstract

The present study involved conducting energy expertise and measurements of pollutants of 10 biomass power plants with power range from 300 kW to 21 MW. The boilers were recent (started between 2012 and 2014). The evaluation covers the following compartments: energy balances, emissions, fuels and ashes.

This study complements the investigations carried out by ADEME in 2007, 2009 and 2014. During this campaign, we noted that all boilers are now fitted with filtration devices of air emissions, which was not the case in 2014.

Energy balances

Energy assessments performed on boilers show overall efficiencies in line with manufacturers' instructions.

The facilities appear well-sized and well used. There are two facilities which load rates are still low but expansion projects of the network warrant realized sizing. One small boiler room is clearly oversized relative to requirements.

It also points an instrumentation failure not allowing some boiler to have a good monitoring of energy consumption.

Fuels

The analyzes performed on biomass concerned moisture, particle size, net calorific value, the metal content and the search for organochlorinated compounds. Wood quality seems better controlled than in previous campaigns and combustion settings better adjusted based on humidity.

It further notes the failures related to fuel impurities and undesirables, which are the cause of incidents in the power system. This phenomenon already observed in previous campaigns, however, seems to decrease.

A large majority of boilers uses a mixture of wood chips and crushed of wood packaging. Operators have taken the step to enter "SSD" status (Out of Waste Status) to remain under a notification scheme (Déclaration). One boiler was in registration phase during the study with a tougher regulation: it has planned to initiate steps in 2017 to switch to the notification scheme.

Fuel quality appears satisfactory with respect to criteria employed. However, we note that for one boiler placed in SSD status, a better monitoring of fuel quality is to achieve.

It has not been identified of organochlorine pesticide-type in fuel.

Ashes

The analyzes performed on the ashes concerned moisture, particle size, agronomic and fertilizer values, the content of metals, organic compounds (PAHs, PCBs) and radioactivity.

Different types of ash were analyzed by boiler according to the sites collection methods:

- bottom ashes,
- bottom ashes mixed to multi-cyclones ashes (most common practice because these hot ashes are cooled with water and collected in a single collector),
- the only multi-cyclones ashes,
- fly ash or fine dust from bag filters or electrostatic precipitators.

The analyzes showed:

- a significant difference in concentrations for many parameters (dust size distribution, metals, PCDD/F, radioactivity) between bottom or multi-cyclones ashes and fly ashes: fly ashes concentrate the volatile elements during combustion, which condense in the form of fine particles,

- bottom ashes alone or bottom ashes mixed with multi-cyclones ashes respect bylaw limits values for farm spreading,
- multi-cyclones ashes alone respect bylaw limits values for farm spreading except for cadmium,
- fly ashes exceed the thresholds for farm spreading: one site, however, mixes these ashes with the other collected ashes for spreading.

Air emissions

The intended pollutants are conventional pollutants (dust, mineral gases, VOCs) as well as trace elements such as persistent organic pollutants (PCDD/F, PAHs), heavy metals, fine dust and tracers of burning wood (elemental and organic carbon).

As already observed during previous campaigns, the trend is towards improved control of emissions: few sites exceeding existing limit values or even planned limit values for the coming years.

For dust, all studied boilers comply with their respective limit values as well as the more stringent threshold of 50 mg/m^3 at 6% O_2 (regulation foreseen for 2018). Eight of the nine sites have emissions below 10 mg/m^3 at 6% O_2 .

All boilers also respect their respective limit values for NO_x emissions.

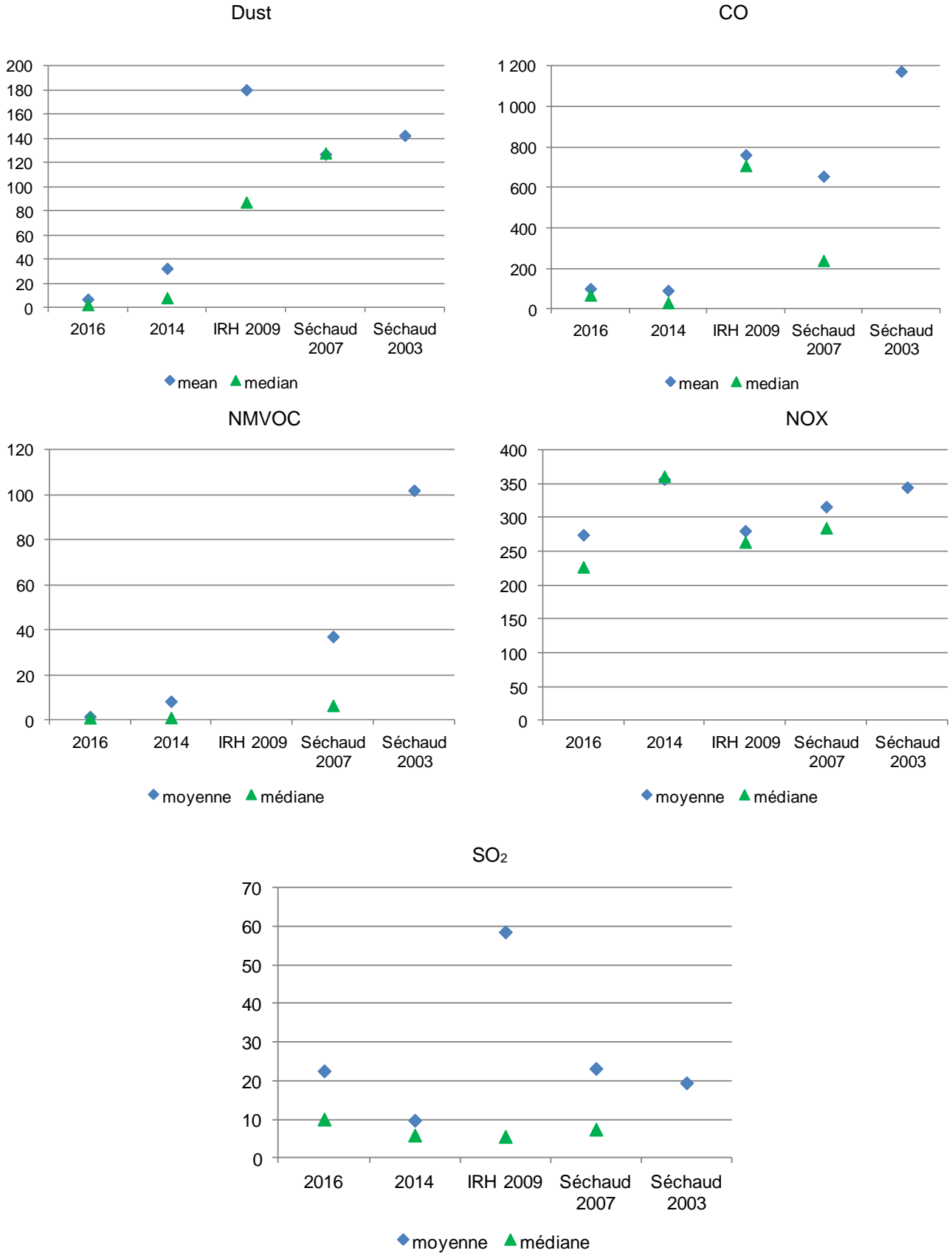
Regarding the other main regulated pollutants, we notice:

- one site subject to "Notification" (Déclaration) exceeds the TLV of 250 mg/m^3 at 6% O_2 for CO (certainly due to an automation to improve in order to reduce the presence of peaks in air emission),
- one site subject to "Notification" exceeds slightly the TLV of $0,1 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ at 6% O_2 for PCDD/F.

Emissions of other pollutants are low, particularly for metals.

The next figure shows some results in graphical form (the diamond represents the means and the triangle the medians).

Evolution of dust, CO, NMVOC, NOX, SO₂ concentrations since 2003 (mg/m³ at 6% O₂)



We notice a significant drop in emissions since the beginning of this series of measurement campaigns, with the exception of NO_x and SO₂.

The reasons identified for the progress are:

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

For SO₂, purification devices are not designed to reduce the emission of this pollutant. Emissions are related to fuel whose sulphur concentration may vary widely. Thus, one or two high values during each measurement campaign are observed.

For NO_x, if there is no significant change on average, however, we find ways forward on new boilers equipped with SNCR or the design of low-NO_x burner technology.

The recommendations made as a result of this study are:

- Improve the quality control of supplies in order to reduce incidents during operation and respect SSD qualification criteria in time,
- Sizing more accurately boilers to better control operating and combustion conditions, especially for small boiler rooms,
- Promote the implementation of sustainable development of recovery ashes.

1. Généralités

1.1. Préambule

Ce rapport constitue la version corrigée de l'édition originale suite à une erreur détectée dans l'analyse de gaz sur un des sites (site n°1). Les données gaz ont pu être corrigées pour ce site à partir de l'enregistrement des gaz réalisé par l'industriel à la même période que les mesures. Les données brutes mesurées pour les autres paramètres sont inchangées. Suite aux nouvelles valeurs d'O₂ et de CO₂, les corrections apportées pour les paramètres mesurés concernent les concentrations à oxygène de référence, le rendement, le taux de charge et les facteurs d'émission. Ces corrections sont sans impact notable sur la synthèse et les conclusions de l'étude initiale.

1.2. Contexte du projet

La combustion du bois génère certaines émissions polluantes variables selon la qualité de la combustion, du combustible, des réglages de la chaufferie... Pour certains polluants, la connaissance sur les niveaux d'émission reste à améliorer. C'est notamment le cas des polluants organiques persistants (HAP, Dioxines / furannes, PCB, ...), des métaux lourds, des poussières fines, des COV et des NOx. L'ADEME a ainsi demandé en 2016 la réalisation d'une campagne de mesures sur des installations de production de chaleur à partir de biomasse financées via le Fonds Chaleur.

Les seuils d'émissions qui doivent être respectés par les chaufferies du Fonds Chaleur 2015 sont ceux des projets d'arrêtés et les PPA régionaux. Si une chaufferie n'est pas classée dans la réglementation, la valeur maximale d'émission de poussières est fixée à 75 mg/m³ à 6% O₂ (soit 50 mg/m³ à 11% O₂). Pour rappel, les évolutions de la réglementation désormais en vigueur sont :

- Prescriptions générales applicables aux installations de combustion soumises à déclaration (puissance comprise entre 2 MW et 20 MW) sous la rubrique n° 2910A introduites par l'arrêté ministériel du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997.
- Prescriptions applicables aux installations de combustion soumises à enregistrement (puissance comprise entre 0,1 MW et 20 MW) sous la rubrique 2910B ont été fixées par l'arrêté du 24 septembre 2013.
- Décret no 2013-814 du 11 septembre 2013 modifiant la nomenclature des installations classées
- Arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie du statut de déchets pour les broyats d'emballage.
- Arrêtés spécifiques des sites soumis à autorisation : dans l'étude présente, une chaufferie est concernée par les rubriques 2770 (traitement thermique des déchets dangereux) et 2711 (traitement thermique des déchets non dangereux),
- La Directive 2015/2193 du Parlement Européen qui sera mise en place progressivement dans les prochaines années

Ce projet s'inscrit dans la continuité de travaux réalisés en 2003, 2008, 2009 et 2014. Il permet d'actualiser les connaissances sur les polluants déjà mesurés lors des campagnes de mesures précédentes. Cette étude ne comporte pas d'évaluation économique.

1.3. Présentation du groupement ayant réalisé l'étude

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.

1.3.1. Présentation de LECES

LECES est une société d'une quarantaine de personnes comprenant principalement des ingénieurs de haut niveau et également des techniciens. La société, ancien bureau d'étude de la sidérurgie française et devenue société indépendante en 2007, est spécialisée dans la conduite d'études et de recherches sur la thématique Air qui couvrent en particulier les mesures (émissions, combustibles, ...) et le dimensionnement des équipements relatifs au traitement de l'air.

LECES dispose d'équipes métrologiques à Saint Julien-lès-Metz, Fos-sur-Mer, Lyon et Lens. LECES est accréditée 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.

LECES a déjà réalisé deux campagnes de mesure pour le compte de l'ADEME sur différentes chaufferies bois en 2007 et 2014.

1.3.2. Présentation de INDDIGO

INDDIGO est une société de conseil et d'ingénierie indépendante intervenant 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.



INDDIGO dispose des qualifications OPQIBI suivantes :

N° 20.12 – AMO réalisation des installations de production utilisant l'énergie biomasse

N° 20.08 - Ingénierie des installations de production utilisant la biomasse en combustion

INDDIGO consacre 10% du temps de ses salariés à des activités de R&D et a réalisé pour le compte du service bioressources de l'ADEME plusieurs études d'envergure nationale dans le domaine du bois-énergie.

INDDIGO a déjà participé à l'étude réalisée en 2014 pour l'ADEME sur différentes chaufferies bois.

1.3.3. 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'agréments, de qualifications, de certifications, d'accréditations nécessaires à la réalisation de l'étude.

MICROPOLLUANTS TECHNOLOGIE SA a déjà participé aux études réalisées en 2007 et 2014 pour l'ADEME.

1.4. Objectif de l'expertise et approche de la problématique

Les objectifs visés sont multiples :

- Évaluer les performances de chaufferies biomasse au regard des VLE de la réglementation ; actualiser les valeurs d'émission de référence de chaufferies biomasse industrielles et collectives en conditions réelles de fonctionnement.
- Pour chaque installation, présenter un bilan annuel des émissions polluantes et proposer des recommandations pour améliorer les bilans énergétique et environnemental ; notamment la corrélation avec la qualité des approvisionnements combustible, la conduite, le matériel.
- Au niveau national, présenter un état des connaissances, pour la filière chauffage collectif au bois, sur les valeurs d'émission des polluants atmosphériques et les caractéristiques des cendres et des fines produites. Cet état des connaissances précisera les incertitudes liées à l'hétérogénéité des combustibles, des modes de combustion, des dispositifs de traitement des fumées, des méthodes de prélèvements et d'analyses.
- Pour chaque installation faire un état des lieux du suivi de la performance de l'installation par l'exploitant. Proposer une méthode de suivi simple de l'efficacité énergétique et environnemental des installations au quotidien, (avec ou sans présence de compteur d'énergie). Vérifier la conformité de la présence d'un comptage d'énergie par rapport aux exigences du contrat.

Cette campagne a été réalisée sur 10 chaufferies bois en fonctionnement financées dans le cadre du Fonds Chaleur. Les mesures ont été réalisées sur la saison de chauffe 2015/2016.

2. Présentation des chaufferies

Les 10 chaufferies étudiées sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Présentation des chaufferies expertisées

Site n°	Type chaufferie	Mise en service	Puissance bois MW	Constructeur	Combustible	Régime ICPE
1	collectif	déc-2013	16 (2 x 8)	VYNCKE	Référentiel 2008 – 1A –PF : 60% Référentiel 2008 – 1B – PF Référentiel 2008 – 3A - PBFV	2910 A Déclaration Zone PPA
2	collectif	sept-2012	1,8	COMPTE R	Référentiel 2008 – 3A - PBFV: 50 % Référentiel 2008 – 1A –PF : 30 % Référentiel 2008 – 1A –PF : 20 %	2910 A Déclaration
3	collectif	oct-2011	2,5	WEISS	Référentiel 2008 – 3A - PBFV: Référentiel 2008 – 1A –PF :	2910 A Déclaration Zone PPA
4	industriel	août-2012	6	COMPTE R	Référentiel 2008 – 1A –PF : 60 % Référentiel 2008 – 3A - PBFV 40 %	2910 A Déclaration Zone PPA
5	industriel	oct-2014	21	LEROUX & LOTZ	Bois B (panneaux aggro) : 44 % Bois C (traverses) : 21 % Refus de pulpeur : 16 % Divers (refus compost, mousses PU) : 18 %	2770 Autorisation 2771 Autorisation
6	collectif	2013	9,7 (7,2 + 2,5)	AGRO	Référentiel 2008 – 1A –PF : 86 % Référentiel 2008 – 3A - PBFV: 21 % Référentiel 2008 – 2 –CIB : 3 %	2910 A Autorisation Zone PPA
7	industriel	nov-2014	5 (2 x 2,5)	WEISS	Référentiel 2008 – 1A –PF : 80 % Référentiel 2008 – 3B - PBFV : 20 %	2910 B Enregistrement
8	collectif	sept-2014	20 (2 x 10)	COMPTE R	Référentiel 2008 – 1A –PF : 100 %	2910 A Autorisation
9	collectif	juil-2014	0,3	SCHMID	Référentiel 2008 – 1A –PF : 100 %	Non classée
10	collectif	sept-2012	1 (2 x 0,5)	HERZ	Référentiel 2008 – 1A –PF : 80 % Référentiel 2008 – 1A –PF : 20 %	Non classée Zone PPA

Les installations étudiées sont récentes (mise en service entre 2012 et 2014).

La démarche est similaire à celle conduite en 2014 qui avait aussi concernée des chaufferies récentes. La photographie réalisée en 2016 est une image actualisée du parc des chaufferies construites en France.

La gamme des puissances prises en compte couvre 3 chaudières de puissance unitaire inférieure à 2 MW, 6 chaudières comprises entre 2 et 10 MW et une chaudière de 21 MW.

Par rapport aux études précédentes, tous les sites étudiés comportent maintenant des dépoussiéreurs finaux de type filtre à manches ou électrofiltre se répartissant de la façon suivante :

- six sites sont équipés de multi-cyclones et de filtres à manche,
- quatre sites sont équipés de multi-cyclones et d'électrofiltres.

Plusieurs chaufferies sont équipées de systèmes permettant de récupérer partiellement l'énergie des fumées (condenseur, économiseur) : il s'agit des sites 3, 4, 6 et 8.

Trois installations n'utilisent que des plaquettes forestières ou de scieries : sites 8, 9, 10. Le site 8 est soumis à autorisation sous la rubrique 2910 A à cause de la puissance de la chaufferie, les deux autres sont non classés.

Six installations utilisent en complément du broyat d'emballages bois (dénommé bois industriel ou bois fin de vie) en proportion plus ou moins importante dans le mix énergétique. Quatre d'entre elles ont engagées une démarche de qualification SSD, ce qui leur permet de rester sous la rubrique 2910 A Déclaration (sites 1, 2, 3 et 4). La chaufferie n°7 n'a pas fait cette démarche et se situe sous la rubrique 2910 B Enregistrement : elle envisage une démarche de qualification SSD en 2017 pour sortir du statut 2910 B Enregistrement trouvé trop contraignant. La chaufferie n°6 est soumise à Autorisation à cause de la puissance installée.

Le site n°5 est à classer à part à cause de la nature de ses approvisionnements et de la technologie mise en œuvre. Il utilise des déchets de bois (refus de pulpeur, traverses, ...) et des mousses : le site est classé à autorisation sous les rubriques 2770 et 2771 La technologie de la chaudière est différente avec la mise en œuvre d'un lit fluidisé. Compte tenu des VLE à respecter, cette installation est équipée :

- d'un système DENOX SNCR à partir d'injection d'urée,
- d'un système de piégeage des PCDD/F par injection de charbon actif en amont d'un filtre à manches,
- d'un système de piégeage des composés acides (principalement SO₂) par injection de CaO en amont d'un filtre à manches.

Cinq sites sont situés en zone PPA et peuvent être soumis à des contraintes plus sévères en terme de rejets.

Toutes ces chaufferies ont été financées dans le cadre du Fonds Chaleur. Certaines d'entre elles se sont donc engagées à respecter des rejets de poussières plus bas que leur indice de classement.

3. Synthèse de la réglementation applicable

Les installations soumises à autorisation (3 chaufferies) voient toutes leurs impositions réglementaires fixées par l'arrêté d'autorisation d'exploiter. S'agissant d'installations de forte puissance et souvent utilisées avec d'autres unités énergétiques, elles ont des spécificités qui ne peuvent être décrites de façon générale. Les points particuliers de ces chaufferies seront discutés dans les résultats.

Pour les autres chaufferies, les principales réglementations applicables sont les textes suivants :

- Arrêté du 26 septembre 2013 applicable aux installations relevant du régime de la déclaration rubrique 2910 A,
- Arrêté du 24 septembre 2013 applicable aux installations relevant du régime de l'enregistrement rubrique 2910 B,
- Arrêté du 29/07/2014 fixant les critères de sortie du statut de déchet (SSD) : 5 chaufferies sont concernées.

Les installations de moins de 2 MW ne sont pas classées (2 chaufferies sont concernées). Leur engagement est de respecter les valeurs d'émission du fond chaleur en termes de rejets de poussières (75 mg/m_0^3 à 6 % O_2). Les installations n°2 et 3 soumises à déclaration ont aussi cet objectif.

Les installations soumises à déclaration (5 installations sont concernées) ne doivent consommer que du bois d'origine forestière à moins qu'elles n'aient classé sous le statut SSD le complément de biomasse utilisé dans le mixte combustible. Elles sont soumises à des valeurs limite en termes de valeurs de rejets atmosphériques et de teneurs en certains éléments dans les cendres utilisées en épandage.

Les tableaux suivants précisent les valeurs limites dans les rejets et les cendres. Pour les rejets à l'émission, il s'agit des valeurs applicables à compter du 01/01/2016 : les VLE pouvant dépendre par ailleurs de la puissance de la chaudière et de sa date de déclaration.

Tableau 2 : VLE rejets atmosphériques – installations soumises à déclaration rubrique 2910 A

Paramètre	Unité	puissance	Déclaré avant le 1/1/2014			Déclaré après le 1/1/2014
			< 4 MW	$\geq 4 \text{ MW}$ < 10 MW	$\geq 10 \text{ MW}$	
poussières	mg/m_0^3 à 6 % O_2	1/1/2016 --->31/12/2017	225	150	75	50
		31/12/2017 --- >	50	50	50	50
SO ₂	mg/m_0^3 I-TEQ à 6 % O_2		225			
NO _x			750	525	525	
CO			250			
PCDD/F			0,1			
COVNM	mg/m_0^3 équiv C à 6 % O_2		50			

Tableau 3 : VLE cendres d'épandage – installations soumises à Déclaration/Enregistrement rubrique 2910 A

Cr	Ni	Cu	Zn	Cr+Ni+Cu+Zn	Cd	Pb	Hg	PCB	Benzo(a) pyrène	Benzo(b) fluoranthène	Fluoranthène
mg/kg MS											
1 000	200	1 000	3 000	4 000	10	800	10	0,8	2	2,5	5

Les installations soumises à Enregistrement peuvent consommer différentes qualités de bois et sont soumises à des valeurs limites plus sévères en termes de rejets atmosphériques, de teneurs en certains éléments dans les cendres et dans celles utilisées en épandage (VLE identiques aux installations à déclaration), de teneurs en certains éléments dans le combustible.

Tableau 4 : VLE rejets atmosphériques – installations soumises à Enregistrement rubrique 2910 B

Paramètre	Unité	puissance	Enregistré avant le 1/1/2014		Enregistré après le 1/1/2014
			< 10 MW	≥ 10 MW	
poussières	mg/m ³ à 6 % O ₂	1/1/2016 --->31/12/2017	-		50
		31/12/2017 --->	50		50
SO ₂	mg/m ³ à 6 % O ₂		225		
NO _x			750	525	525
CO			250		
COVNM			50		
HAP	mg/m ³ à 6 % O ₂		0,1		
HCl			30		
HF			25		
PCDD/F	ng/m ³ I-TEQ à 6 % O ₂		0,1		
Cd, Hg, Tl	mg/m ³ à 6 % O ₂		0,05		
Cd+Hg+Tl			0,1		
As+Se+Te		1			
Pb		1			
Sb+Cr+Co+Cu+Sn+Mn+Ni+V+Zn		20			

Tableau 5 : VLE cendres – installations soumises à Enregistrement rubrique 2910 B combustible b(v)

Cd	Pb	Zn	PCDD/F
mg/kg MS			ng I-TEQ/kg MS
130	900	15 000	400

Tableau 6 : VLE combustible de type b(v) – installations soumises à Enregistrement rubrique 2910 B

Hg	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Cl	PCP	PCB
mg/kg MS									
0	4	5	30	30	50	200	900	3	2

Ces prescriptions peuvent être complétées par des dispositions plus contraignantes pour les installations situées en zone PPA. Le tableau suivant présente les VLE applicables pour les différents sites exprimées à 6 % O₂ avec en rouge les modifications apportées par les zones PPA aux VLE des sites soumis à Enregistrement ou à Déclaration (valeurs signalées en rouge).

Tableau 7 : VLE applicables pour les différents sites

Chaufferie	Rubrique	Puissance	Mise en service	Pous.	SO ₂	NO _x	CO	COV NM	COT	HF	HCl	Cd ou Hg ou Tl	Cd+ Hg+ Tl	As	As+Se+Te	Pb	Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+N+V	Sb+As+Cr+Co+Cu+Mn+N+V	PCDD/F	HAP	
		kW		mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
1	2910 A Déclaration Zone PPA	16 (2 x 8)	déc.-13	15	225	525	250	50												0,1	
2	2910 A Déclaration	1,8	sept.-12	75	225	750	250	50												0,1	
3	2910 A2 Déclaration Zone PPA	2,5	oct.-11	75	225	750	250	50												0,1	
4	2910 A2 Déclaration Zone PPA	6	août-12	45	225	750	250	50												0,1	
5	2770 Autorisation 2771	21	oct.-14	15	75	300			15	1,5	15	0,075			0,075		0,75		0,15	0,015	
6	2910 A Autorisation Zone PPA	9,7 (7,2 + 2,5)	juil.-05	30	225	600	250	50											0,1		
7	2910 B Enregistrement	5 (2 x 2,5)	nov.-14	30	225	400	200	50		25	30	0,05	0,1		1	1		20	0,1	0,1	
8	2910 A Autorisation	20 (2 x 10)	sept.-14	20	200	250	200	50		5	10	0,05	0,1	0,05	1	1		5	0,1	0,01	
9	Non classée	0,3	juil.-14	75																	
10	Non classée	1 (2 x 0,5)	sept.-12	75																	

Enfin, une évolution réglementaire est attendue avec la Directive 2015/2193 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 25 novembre 2015, relative à la limitation des émissions de certains polluants dans l'atmosphère en provenance des installations de combustion moyennes dite Directive « MCP » (Medium Combustion Plants).

Cette Directive concerne les installations entre 1 MW et 50 MW.

Elle fixe des valeurs limites d'émission pour le **dioxyde de soufre**, les **oxydes d'azote** et les **poussières** ainsi que des règles à suivre pour le monoxyde de carbone. Les dispositions sont applicables par les Etats membres, après transposition en droit national avant le 19 décembre 2017, pour les **installations de combustion nouvelles** comme pour les **installations existantes**,

La mise en application est prévue au 20 décembre 2018 pour les installations neuves et entre 2025 et 2030 pour les mises en conformité sur les installations existantes. Les délais varient selon la puissance de l'installation et pour celles qui utilisent de la biomasse comme combustible principal.

Le tableau suivant présente les évolutions attendues par cette Directive.

L'impact sera fort notamment pour les installations comprises entre 1 et 2 MW qui ne sont pour l'instant soumises à aucune réglementation sur les émissions.

L'imposition sur les poussières à 50 mg/m³ nécessitera la mise en place quasi systématique d'un système de traitement des fumées de type électrofiltre ou filtre à manche. En plus des investissements supplémentaires à prévoir, cela impliquera également des coûts d'exploitation, de fonctionnement et de contrôle lié au système de filtration.

Pour les NO_x, une VLE à 500 mg/m³ n'imposera pas d'équipements de traitements spécifiques

Tableau 8 : Evolutions réglementaires Directive 2015/2193

INSTALLATIONS EXISTANTES					
VLE mg/Nm3 6% O2		1-2 MW	2-5 MW	5-20 MW	20-50 MW
SOx	France 2013		225	225	200
	direct MCP	200 mais ss objet pour biomasse ligneuse			
NOx	France 2013		525	525	400
	direct MCP	650			
Poussières	France 2013		50		30
	direct MCP	50			

INSTALLATIONS NOUVELLES					
VLE mg/Nm3 6% O2		1-2 MW	2-5 MW	5-20 MW	20-50 MW
SOx	France 2013		225	225	200
	direct MCP	200 mais ss objet pour biomasse ligneuse			
NOx	France 2013		525	525	400
	direct MCP	500		300	
Poussières	France 2013		50		30
	direct MCP	50		30	20

4. Présentation des mesures réalisées

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).

4.1. Bilans énergétiques

4.1.1. 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 réalisée par 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.

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.

4.1.2. 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 précises 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.

4.2. Caractérisation 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 (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 jour) 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.

4.3. Caractérisation des cendres

Les cendres ont été récupérées selon le tableau suivant :

Tableau 9 : Collecte des cendres par chaudière

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

Cinq sites sur dix 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. Ces sites ne sont pas conformes avec la réglementation actuelle pour la valorisation des cendres sous foyer car ces dernières ne doivent pas être mélangées pour un éventuel épandage.

Un site collecte les cendres sous foyer à part (site n°1). Les fines des multi-cyclones sont collectées avec les fines des dépoussiéreurs (électrofiltre).

Les deux sites équipés de chaudières de faible puissance collectent les cendres de façon séparées (sites n°9 et 10): cendres sous foyer, cendres de multi-cyclone et cendres de filtres à manches ou d'électrofiltres.

Sur le site n°8, il a été possible pendant les essais de collecter les trois types de cendre. La pratique courante du site est cependant de regrouper toutes les cendres dans un même conteneur pour usage ultérieur.

Le site n°5 possède une évacuation du lit fluidisé circulant et une collecte des fines du filtre à manches. L'évacuation du lit fluidisé comporte une proportion importante de matière inerte et n'est pas assimilable à des cendres : elle n'a pas été prélevée au cours de l'étude. Seule les cendres du filtre à manches ont été prélevées et analysées.

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.

4.4. Caractérisation des émissions 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
- 8 HAP (norme française),
- Métaux lourds : Cd, Hg, Tl, As, Se, Te, Pb, Sb, Cr total et CrVI, Co, Cu, Sn, Mn, Ni, V, Zn,
- Carbone élémentaire et carbone total.

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

4.5. Planning des interventions

Les interventions ont été réalisées selon le calendrier suivant :

Tableau 10 : Planning des campagnes de mesures

Chaufferie	Dates d'intervention	Remarque
1	8 et 9 mars 2016	
2	1 ^{er} mars 2016	
3	16 et 17 mars 2016	
4	14 et 15 mars 2016	
5	7 et 8 mars 2016	
6	18 et 19 avril 2016	
7	8 et 9 février 2016	
8	14 et 15 mars 2016	-
9	16 mars 2016 14 avril 2016	Marche sans électrofiltre Marche normale
10	13 juillet 2016	Intervention à l'émission annulée suite à absence de piquage Prélèvement de combustible et de cendres réalisé

Suite aux visites préparatoires achevées fin janvier, les campagnes de mesure ont été engagées immédiatement après dans le but de terminer toutes les mesures à mi-avril 2016.

Deux remarques sont à formuler pour les petites chaufferies (sites n°9 et 10). Ces deux chaufferies n'étaient pas équipées de piquage sur les cheminées : les interventions ont du être reportées. *En tout état de cause, ces chaufferies ne peuvent pas vérifier leur engagement en termes de rejets de poussières dans le cadre du Fonds chaleur.*

Deux interventions ont été réalisées sur la chaufferie n°9. Au cours de la première intervention (16 mars) réalisée avec l'accord de l'exploitant, l'équipe technique LECES sur place s'est rendue compte que l'électrofiltre n'était pas en service. Une deuxième intervention a été réalisée pour compléter les mesures avec un fonctionnement normal de l'installation.

5. Exploitation des résultats

5.1. Bilan détaillé par chaufferie

Le détail des mesures réalisées par chaufferie est présenté dans l'annexe 2. Les paragraphes suivants présentent les principales caractéristiques et les principaux résultats.

5.2. Résultats énergétiques

5.2.1. Bilans énergétiques instantanés

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

Tableau 11 : Bilans énergétiques instantanés

Paramètres mesurés	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Puissance nominale	kW	8 000	1 800	2 500	6 000	21 000	7 200	2 500	10 000	300
Puissance moyenne	kW	5 001	2 032	1 594	4 935	23 164	3 995	1 906	10 849	205
Rendement sur PCI	%	88	90	86	82	90	90	91	95	77
Taux de charge	%	63	107	64	82	110	55	76	101	68

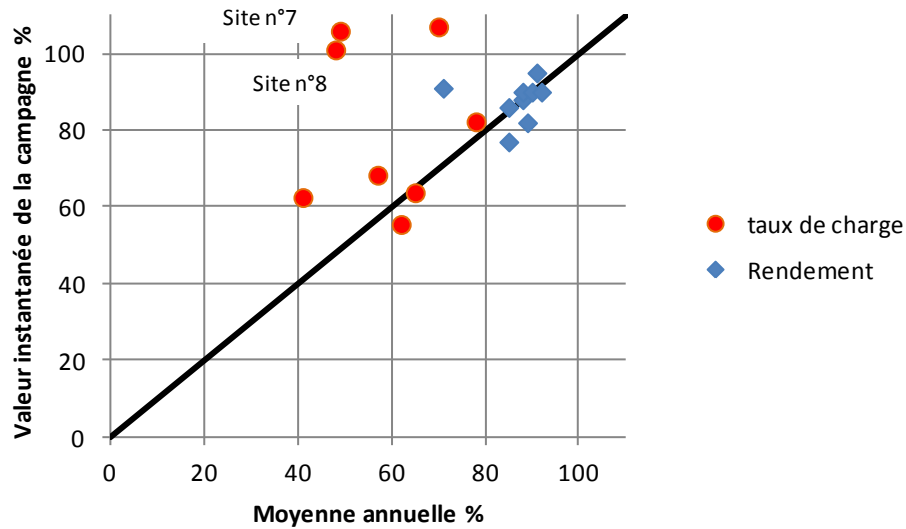
Les rendements calculés sur une courte période (3 h à 4 h) sont bons. Deux chaudières seulement ont un rendement inférieur à 85 % (sites n°4, 9).

Les autres chaufferies ont des rendements compris entre 86 % et 95 %.

Les taux de charge constatés sont globalement en liaison avec les évaluations annuelles présentées dans le paragraphe suivant. La figure 1 présente une comparaison des valeurs moyennes sur l'année 2015 pour le rendement et le taux de charge avec les données collectées au cours des campagnes de mesure. Un écart par rapport à la droite tracée en noir traduit :

- A gauche de la droite : une marche plus soutenue au cours de la campagne que la moyenne annuelle.
- A droite : une marche moins soutenue au cours de la campagne que la moyenne annuelle.

Figure 1 : Comparaison des marches – valeurs moyennes annuelles et valeurs instantanées



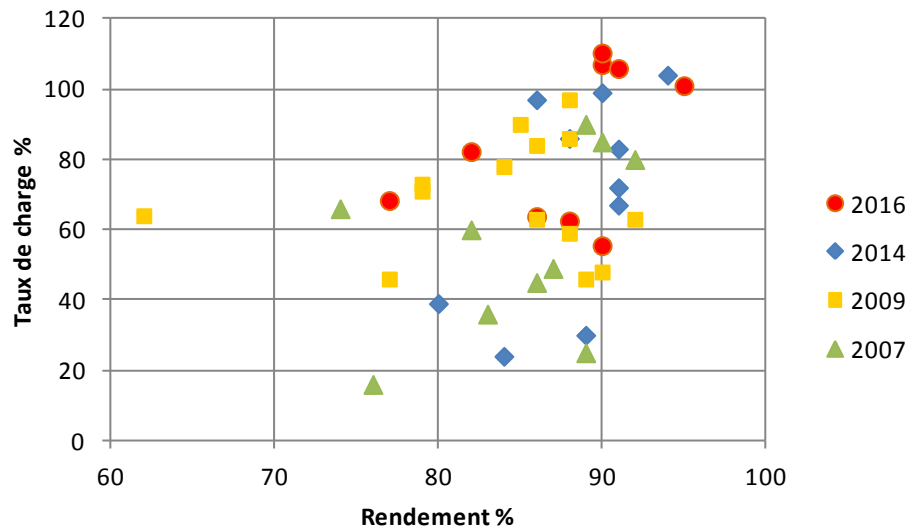
Les rendements des chaufferies en valeur instantanée ou en moyenne annuelle sont proches.

Les taux de charge les plus éloignés de la moyenne annuelle sont pour les sites n°7 et 8 : les chaudières étaient à leur nominal lors des mesures alors que les taux de charge sont nettement plus bas en moyenne annuelle.

La figure 2 présente le taux de charge instantané des installations en fonction du rendement pour cette campagne avec les données des campagnes précédentes (LECES 2014, IRH 2009 et Séchaud 2007).

On remarque globalement que le rendement décroît quand le taux de charge diminue, phénomène qui avait déjà été constaté lors de la précédente étude. Les taux de charges se sont améliorés depuis 2007 : seulement 30 % des chaudières avaient un taux de charge supérieur à 80 % en 2007 ; en 2016, comme en 2014, on obtient 50 %.

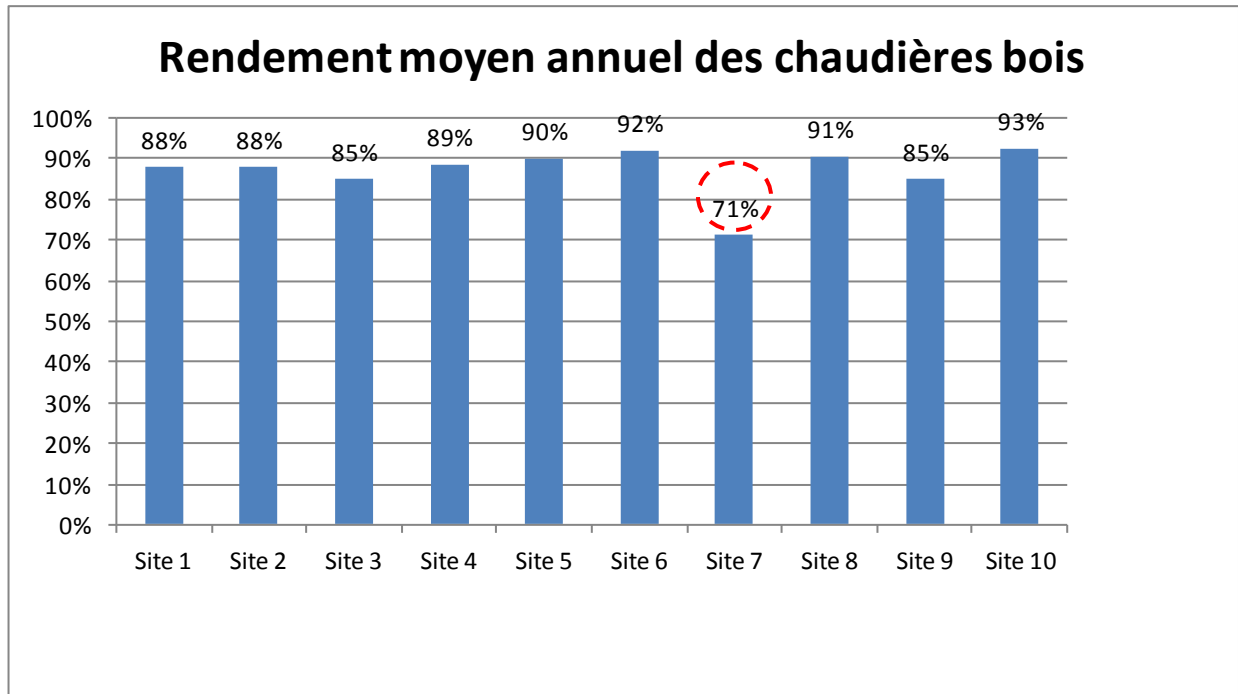
Figure 2 : rendement et taux de charge instantané



5.2.2. Bilans sur la saison de chauffe

La figure suivante présente le rendement moyen annuel par chaufferie.

Figure 3 : Rendement annuel des chaudières



En bilan annuel, le rendement moyen est de 87% (il était de 79% sur la campagne 2014). Seul le site n°7 présente un rendement plus faible avec 71%. Il semble que des réglages de mise en service de l'installation durant la première année de fonctionnement en soit la cause (priorité donnée à la cogénération et fonctionnement chaudière bois à très faible charge, mais également humidité élevée du combustible et réglages pas adaptés).

Quatre sites ont des rendements égaux ou supérieurs à 90%, ce qui est très élevé en process biomasse.

Par contre, il n'y a pas de lien évident entre puissance et rendement élevé : même les petites puissances ont de bons rendements.

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

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

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 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

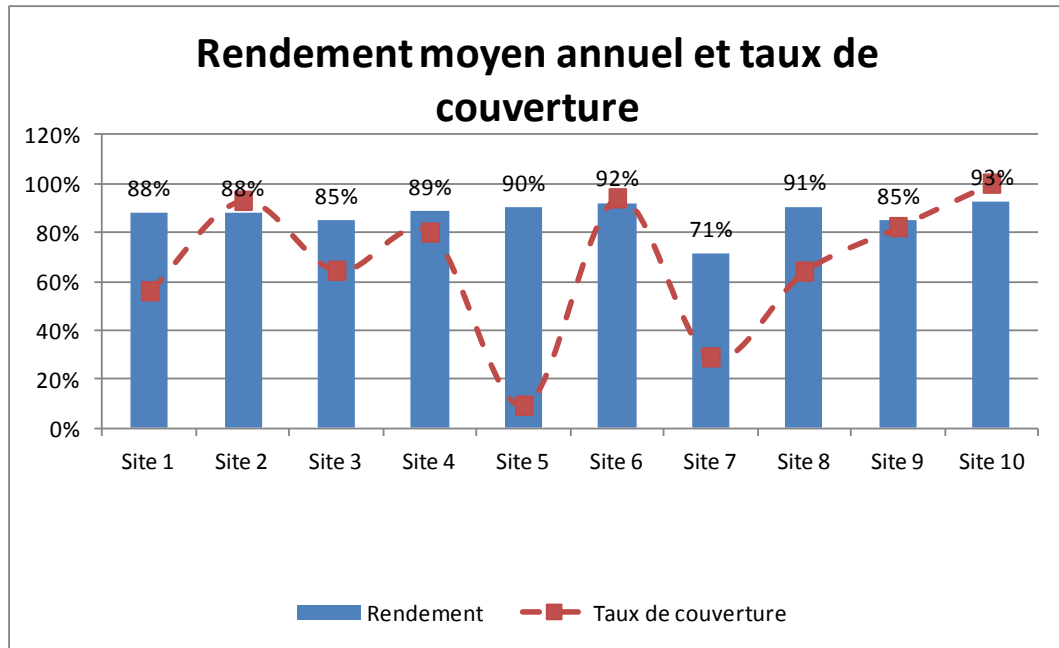
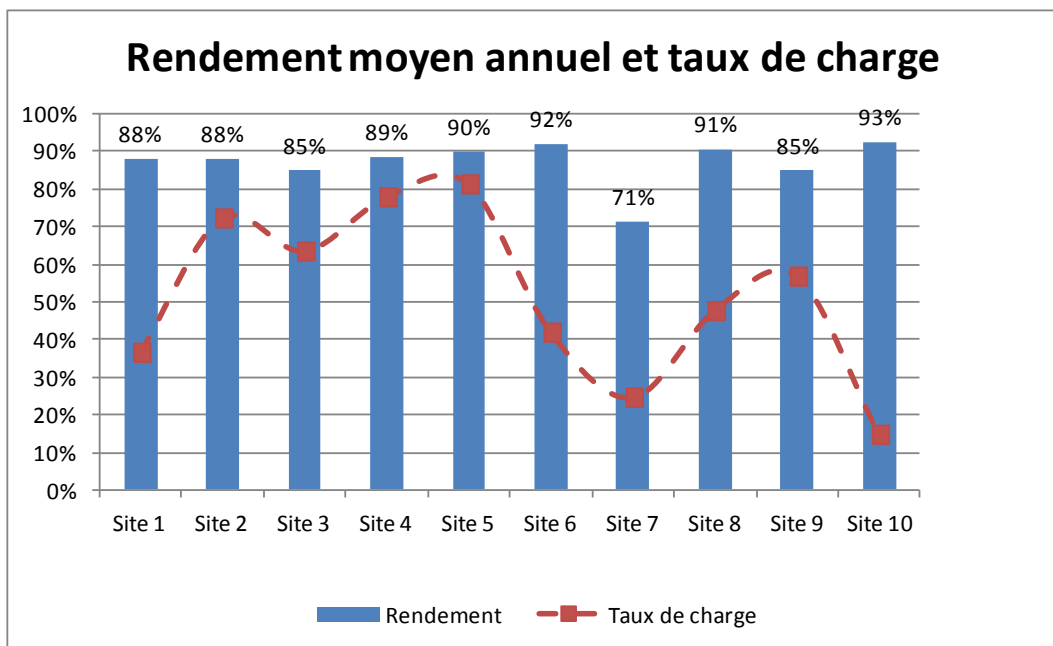


Figure 5 : Rendement annuel et taux de charge



Le lien entre rendement et taux de charge ne montre pas de tendance marquée. On observe que les chaudières gardent de bonnes performances même pour des taux de charges aux alentours de 40%.

La valeur du taux de charge obtenu sur le site n°10 est faussée car l'installation dispose de deux chaudières dont une seule fonctionne réellement (installation largement surdimensionnée). Si l'on considère une seule chaudière, le taux de charge est alors de 30%, ce qui explique que le rendement ne soit pas trop dégradé. Par ailleurs, le calcul du rendement annuel moyen est basé sur les livraisons de bois et non sur la consommation réelle qui peut différer de façon assez importante selon le stock du silo.

5.3. Résultats environnementaux

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

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

5.3.1. Caractéristiques des combustibles

Les combustibles ont été prélevés régulièrement pendant la période 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. 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. Les VLE indiqués concernent les combustibles de type b(v) pour les sites à Enregistrement : c'est le cas du site n°7. Ce site respecte les VLE pour les combustibles de type b (v). A cause de la spécificité de son combustible, le site n°5 a été classé à part et les valeurs de ce site n'ont pas été intégrées dans les médianes et moyennes calculées.

Le métal le plus représenté (voir tableau 12) est le zinc, suivi du plomb et du cuivre.

En dehors de ces métaux, les métaux dépassant le seuil de 1 mg/kg MS en médiane sont le vanadium, le chrome et le nickel. Les autres métaux ont une concentration inférieure à 1 mg/kg.

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

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)	Site 5
Combustible majoritaire		PF	PBFV	PBFV	PF	PF	PF	PF	PF	PF				DBS
V	mg/kg MS	0,73	7,32	2,75	<0,125	<0,125	2,23	9,03	1,18	<0,125	1,2	2,6		3,57
Cr		0,75	10,10	3,82	2,06	<0,125	2,94	5,53	1,20	<0,125	2,1	3,0	30	18,2
Co		0,14	1,12	0,63	<0,125	0,16	0,55	0,65	0,32	<0,125	0,32	0,42		2,66
Ni		0,34	3,69	2,07	0,20	0,23	1,76	2,32	1,93	0,62	1,8	1,5		23,2
Cu		5,1	18,3	6,0	1,1	0,4	8,0	1,7	3,1	1,1	3,1	5,0	30	805,4
Zn		25,4	109,8	38,3	9,1	4,3	39,4	12,1	30,6	1,8	25	30	200	801,4
As		0,66	2,90	1,41	<0,025	0,10	1,23	1,63	0,58	0,34	0,66	0,99	4	3,36
Se		1	<2	1	0	<0,25	<0,25	1	1	<0,25	0,59	0,64		<0,25
Mo		0,14	<1	<0,125	<0,125	<0,125	0,26	<0,125	<0,125	<0,125	0,13	0,24		5,47
Cd		0,10	0,47	0,15	0,11	0,03	0,26	0,09	0,20	<0,025	0,11	0,16	5	0,33
Sn		0,28	1,96	0,84	0,36	<0,125	0,32	0,19	0,26	0,67	0,32	0,56		16,06
Sb		<0,125	1,52	0,22	<0,125	<0,125	0,37	<0,125	<0,125	<0,125	0,13	0,32		1,67
Tl		<0,125	<1	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	<0,125	0,125	0,222		0,18
Pb		9,1	24,0	5,8	2,9	0,6	5,3	3,2	1,1	0,2	3,2	5,8	50	391
Hg		<0,025	<0,2	<0,025	<0,025	<0,025	0,040	<0,025	<0,025	<0,025	0,025	0,046	0,2	0,06

(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 moyenne de 49,3 %, valeur attendu pour le bois, avec une faible dispersion. Il y a 5,8 % d'hydrogène en moyenne et les teneurs en azote sont faibles (< 0,3 %). Les teneurs moyennes en chlore et soufre sont fortement impactées par les valeurs élevées trouvées au site n°1 :

- pour le soufre : la moyenne est à 414 mg/kg MS et la médiane à 177 mg/kg MS
- pour le chlore : la moyenne est à 580 mg/kg MS et la médiane à 287 mg/kg MS

Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse

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

- l'humidité moyenne est de 31,5 % (min 13,4 %, max 43,1 %),
- le taux de cendre moyen est de 2,2 % (min 0,7 %, max 4,6 %) : la chaufferie n°5 se situe à 9,8 %.

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 faibles : inférieures à la limite de quantification la plupart du temps avec un maximum de 0,11 mg/kg MS sur le site n°5. Deux chaufferies, si elles étaient classées à Enregistrement, ne respectent pas la valeur limite de 900 mg/kg pour le chlore dans les combustibles de type b(v) : les sites n°1 et 3.

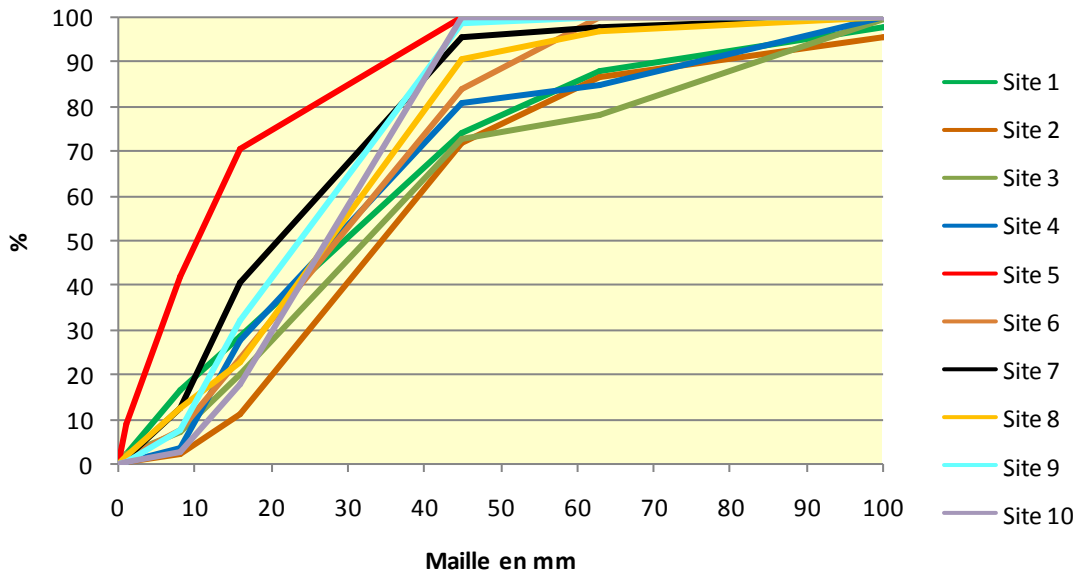
Tableau 13 : Analyse des combustibles (autres composés)

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)	Site 5
Combustible majoritaire		PF	PF	PF	PF	PBFV	PBFV	PF	PBFV	PF				PF
PCS	MJ/kg MB	11,7	13,3	12,6	15,3	12,1	11,6	9,4	16,0	17,3	12,6	13,2		12,4
PCI	MJ/kg MB	10,1	11,8	11,0	13,8	10,5	9,9	11,0	14,6	15,9	11,0	12,1		10,7
Taux de cendre	% MB	4,6	1,5	2,8	0,7	2,5	0,9	4,8	1,7	0,3	1,7	2,2		9,8
Humidité	% MB	38,7	32,7	35,3	22,8	38,3	43,1	41,4	17,8	13,4	35,3	31,5		39,9
Azote total	mg/kg MS	0,6	<0,3	0,5	0,3	0,5	<0,3	0,3	<0,1	0,2	0,3	0,3		1,0
Hydrogène total	mg/kg MS	5,8	5,7	5,7	5,9	5,6	5,9	5,6	6,8	5,6	5,7	5,8		5,8
Carbone total	mg/kg MS	48,8	50,4	48,8	49,7	49,0	51,2	46,5	49,2	50,2	49,2	49,3		47,8
Soufre total	mg/kg MS	1842	25	351	177	246	112	654	177	142	177	414	900	3324
Chlore total	mg/kg MS	2539	289	977	287	233	345	240	262	50	287	580		2363
> 100mm	%	2,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7		0,0
63 à 100 mm	%	10,1	8,8	21,6	15,1	0,0	2,3	2,9	0,0	0,0	2,9	6,8		0,0
45 à 63 mm	%	13,8	14,8	5,5	4,2	16,1	2,2	6,4	1,0	0,0	5,5	7,1		0,0
16 à 45 mm	%	45,7	60,8	52,9	53,0	60,2	55,0	67,8	67,0	82,2	60,2	60,5		29,5
8 à 16 mm	%	11,9	8,8	12,9	24,0	16,1	28,0	10,5	24,5	15,3	15,3	16,9		28,5
1 à 8 mm	%	14,4	1,9	4,6	3,3	6,2	11,1	10,7	7,0	2,3	6,2	6,8		33,1
<1 mm	%	2,2	0,5	2,4	0,4	1,4	1,4	1,7	0,5	0,2	1,4	1,2		8,9
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	2	0,65
PCP	mg/kg MS	0,04	<0,03	<0,026	0,05	<0,025	<0,02	<0,03	<0,026	<0,026	0,026	0,030	3	0,11

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

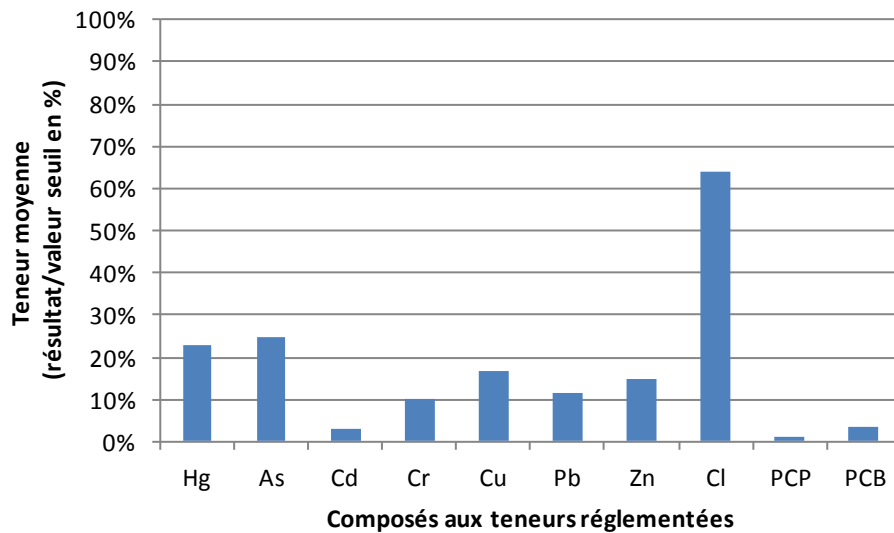
La figure 6 présente la distribution granulométrique des combustibles prélevés. Seules deux chaufferies présentent des éléments supérieurs à 100 mm. La chaufferie n°5 présente un mixte combustible plus fin que les autres sites.

Figure 6 : Granulométrie des combustibles



La figure 7 présente à titre indicatif la teneur moyenne des combustibles analysés (hors le site n°5) 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 (la teneur moyenne élevée en chlore est due à la teneur élevée mesurée au site n°1).

Figure 7 : Analyse moyenne des combustibles avec les seuils des combustibles b(v) de l'arrêté PG Enregistrement (hors site n°5)



Le tableau suivant présente les résultats moyens obtenus au cours de cette campagne à ceux obtenus au cours des campagnes précédentes : SECHAUD 2007, IRH 2009 et LECES 2014.

Tableau 14 : Combustibles – Comparaison avec des valeurs antérieures

Paramètre	Unité	2016	2014	SECHAUD 2007	IRH 2009
V	mg/kg MS	<0,13 - 9	0,31 - 4,08	<0,13 - 0,93	
Cr		<0,13 - 10,1	0,29 - 3,43	<0,13 - 1,14	
Co		<0,13 - 1,1	0,19 - 1,28	<0,13 - 0,46	
Ni		0,2 - 3,7	0,45 - 2,76	<0,17 - 1,53	
Cu		0,43 - 18,3	0,6 - 10,76	<0,40 - 3,30	
Zn		1,77 - 110	10,8 - 43,6	3,8 - 16,1	
As		<0,025 - 2,9	0,09 - 2,72	<0,025 - 0,92	
Se		<0,25 - 0,8	0,42 - 0,52	<0,025 - 0,93	
Cd		0,027 - 0,5	0,08 - 0,23	<0,028 - 1,36	
Sn		0,191 - 2	<0,125 - 0,35	<0,125	
Sb		<0,13 - 1,5	<0,125 - 0,88	<0,125	
Tl		<0,13 - 0	<0,125 - 0,88	<0,125	
Pb		0,19 - 24	0,63 - 26,8	0,20 - 1,09	
Hg		<0,025 - 0,04	<0,025 - 0,042	<0,025	
PCS		MJ/kg MB	9,4 - 17,3	10,7 - 16,1	
PCI	MJ/kg MB	9,9 - 15,9	8,8 - 14,7		
Taux de cendre	% MB	0,3 - 4,8	0,2 - 4,1	0,32 - 3,91	0,60 - 11,9
Humidité	% MB	13,4 - 43,1	19 - 46,9	14,3 - 49,5	

Les valeurs indiquées dans le tableau correspondent aux valeurs minimales et maximales de chaque campagne

Pour les métaux, les teneurs sont voisines des teneurs quantifiées précédemment (à l'exception de valeurs élevées en Zn et Pb au site n°5).

Les PCS et les PCI sont stables.

Les taux de cendres sont voisins sur les trois campagnes. L'humidité est aussi stable.

5.3.2. Caractéristiques des cendres

Différents échantillons de cendres ont été récupérés par chaufferie (voir tableau 9) :

- des cendres sous foyer avec ou sans multi-cyclones,
- des cendres de multi-cyclones,
- des cendres d'électrofiltres avec multi-cyclones,
- 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. Deux chaufferies n'ont pas communiqué de données (les sites n°9 et 10). Deux chaufferies n'ont communiqué que le total des cendres (les sites n°3 et 8).

La proportion de cendres totale varie de 1,3 % à 4,7 % avec une moyenne de 2,4 %.

Le taux de cendres sous foyer varie de 0,9 % à 4,1 %. Elles représentent de l'ordre de 95 % des cendres collectées avec ou sans les multi-cyclones.

Le taux de cendres collectées sous filtre varie de 0,1 % à 3,1 %. Nous distinguons :

- la valeur élevée du site n°5 liée certainement à une partie du lit fluidisé collecté avec les fines,
- la valeur plus élevée des sites collectant les fines des multi-cyclones avec les fines des filtres (taux de cendre de 0,57 % en moyenne contre 0,13 %) : les fines de multi-cyclones représenteraient alors un taux de cendre estimé à 0,4 %.

Les fines de multi-cyclones représenteraient alors de l'ordre de 17 % des cendres sous foyer.

Tableau 15 : Répartition massique des cendres par chaufferie

Paramètre	Unité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bois consommé	t/an	28 000	2 210	2 670	11 700	26 000	11 365	4 886	20 600	420	357
Total cendres	kg/an	1 325	58	50	315	so	159	102	276	NC	NC
Ratio	%	4,7	2,6	1,9	2,7	-	1,4	2,1	1,3	-	-
Cendres sous foyer		F	F+MC	F+MC	F+MC		F+MC	F+MC	F	F	F
Taux de cendre	%	4,1	2,5	NC	2,5		0,9	2,0	NC	NC	NC
Ratio Cendres sous foyer / Total	%	95,1	88,5	-	97,8	-	97,7	95,4	-	-	-
Cendres volantes		MC+FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF	FM
Taux de cendre	%	0,64	0,09	NC	0,21	3,13	0,50	0,08	NC	NC	NC

F : cendres de foyer
FM : cendres de filtre à manches

MC : cendres de multi-cyclones
EF : cendre d'électrofiltre

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

- 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 se fera donc 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

L'appellation cendres sous foyer regroupe les cendres sous foyer seules et les cendres sous foyer collectées avec les fines des multi-cyclones.

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 16 : Cendres sous foyer : analyse des métaux

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)
Type cendre		F	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F	F	F			
Cr	mg/kg MS	93	143	34	45	130	933	26	31	20	45	162	1000
Ni	mg/kg MS	17	42	14	11	22	42	21	76	69	22	35	200
Cu	mg/kg MS	375	382	108	98	195	736	30	52	267	195	249	1000
Zn	mg/kg MS	430	1 438	540	845	472	958	14	78	96	472	541	3000
As	mg/kg MS	4,7	50	15	6,9	3,2	36	1,9	2,5	1,8	4,7	13	
Se	mg/kg MS	0,6	<2	2,3	2,1	1,0	0,6	3,0	1,1	<0,25	1,1	1,4	
Mo	mg/kg MS	2,4	7,4	2,4	4,5	6,9	12	0,46	0,24	1,24	2,4	4,2	
Cd	mg/kg MS	0,1	8,3	2,2	7,7	6,7	21	0,15	2,9	0,8	2,9	5,5	
Pb	mg/kg MS	118	306	43	279	30	230	1,4	6,5	7,1	43	113	800
Hg	mg/kg MS	<0,025	0,37	0,06	<0,025	<0,025	0,41	<0,025	<0,025	<0,025	0,025	0,11	10
Cr+Cu+Ni+Zn	mg/kg MS	916	2 006	696	999	819	2 668	91	237	453	819	987	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
F : Foyer
MC : multi-cyclones

Tableau 17 : Cendres sous foyer : analyse des éléments organiques

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	Arrêtés
Type cendre		F	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F	F	F			
PCDD/F	ng I-TEQ/kg MS	1,48	71,53	42,1	25,7	0,31<C<0,59	51,06	3,63	3,2<C<4,1	0,39<C<0,50	4,1	22,3	
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	0,8
Benzo(a) pyrène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,010	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	<0,010	0,01	0,01	2,5
Fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,010	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
F : Foyer
MC : multi-cyclones

On remarque que toutes les cendres sous foyer et de multi-cyclones respectent les VLE pour les métaux à l'exception du site n°7 où un dépassement sur le cadmium est observé.

Toutes les cendres sous foyer et de multi-cyclones respectent les VLE pour les éléments organiques (PCB, HAP) pour une valorisation agronomique.

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

On peut poursuivre cette approche pour les cendres de multi-cyclones seules. Les deux tableaux suivants présentent les teneurs en métaux et en éléments organiques des cendres de multi-cyclones collectées sur 3 sites.

Tableau 18 : Cendres de multi-cyclones : analyse des métaux

Paramètre	Unité	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)
Type cendre		MC	MC	MC			
Cr	mg/kg MS	39	35	27	35	34	1 000
Ni	mg/kg MS	41	74	73	73	63	200
Cu	mg/kg MS	80	94	170	94	115	1 000
Zn	mg/kg MS	1 063	635	279	635	659	3 000
As	mg/kg MS	18	4	2	4	8	-
Se	mg/kg MS	1	1	<0,25	0,6	0,7	-
Mo	mg/kg MS	3	2	1	1,7	2,0	-
Cd	mg/kg MS	15	19	10,3	15	15	10
Pb	mg/kg MS	52	65	41	52	53	800
Hg	mg/kg MS	0	<0,025	<0,025	0,025	0,026	10
Cr+Cu+Ni+Zn	mg/kg MS	1 223	837	549	837	870	4 000

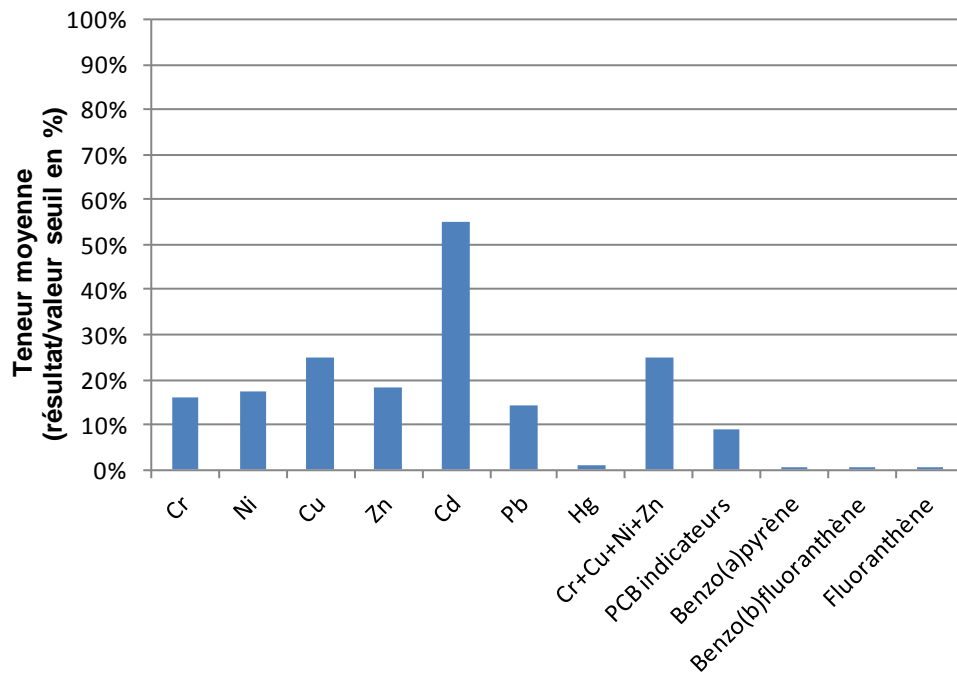
Tableau 19 : Cendres de multi-cyclones : analyse des éléments organiques

Paramètre	Unité	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne	VL Arrêtés (1)
Type cendre		MC	MC	MC			
PCDD/F	ng I-TEQ/kg MS	3,02<x<3,75	0,04<C<0,95	1,5	1,5	2,1	
PCB indicateurs	ng/kg MS	<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	2
Benzo(b) fluoranthène	mg/kg MS	0,02	<0,01	<0,01	0,01	0,01	2,5
Fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	0,12	0,01	0,05	5

Les cendres de multi-cyclones seules respectent les VL des arrêtés (sauf pour le cadmium ou des dépassements de l'ordre d'un facteur 2 sont observés sur deux installations sur 3). Compte tenu de ce seul dépassement, leur mélange avec les cendres sous foyer respecte les seuils pour épandage. Cela concerne la majorité des sites à cause des spécificités process de collecte de ces cendres..

La figure 8 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 8 : 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 20 : Valeurs fertilisantes des cendres sous foyer

Paramètre	Unité	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Médiane	Moyenne
Type cendre		F	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F+MC	F	F	F		
Humidité	%	21,9	35,4	30,4	64,8	0,0	18,6	59,0	0,0	1,6	21,9	25,7
pH		12,5	11,8	12,1	12,7	12,9	11,4	12,5	13,1	10,0	12,5	12,1
Carbone organique	g/kg MS	116,7	94,7	17	78,3	7,3	13	225,2	15,1	66,1	66,1	70,4
Matières organiques	% MS	7,5	13,9	11,1	14,1	1,9	8,8	28,4	0,3	11,4	11,1	10,8
C/N	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
P2O5	g/kg MS	7,9	16,8	13,6	6,6	58,6	28,0	8,0	36,7	21,3	16,8	21,9
Na2O	g/kg MS	4,9	5,3	5,9	2,0	5,5	11,2	1,3	1,4	7,4	5,3	5,0
CaO	g/kg MS	145	122	65	96	301	133	222	301	189	145	175
MgO	g/kg MS	5,3	13,3	4,0	5,6	28,0	35,1	10,6	31,8	24,4	13,3	17,6
K2O	g/kg MS	31,4	51,5	40,1	16,6	63,8	53,3	41,1	52,4	131,0	51,5	53,5
S	g/kg MS	1,2	3,8	0,8	3,9	6,1	4,8	0,2	0,8	3,4	3,4	2,8
Azote Total Kjeldahl (NTK)	g N/kg MS	<1	<0,04	<1	<1	<1	2,47	2,74	<1	1,6	1,0	1,3
Azote organique	g N/kg MS	<1	<1	<1	<1	<1	2,5	2,7	<1	1,6	1,0	1,4
Azote amoniacal	mg/kg MB	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	26,9	5,0	7,4

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 teneurs en matières organiques dans les cendres sont variables : entre 0,3 et 28,4 %. 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-cyclones. 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. Ces résultats confirment les résultats déjà obtenus au cours de la campagne réalisée en 2014.

Cendres volantes

Ces cendres caractérisent :

- des fines d'électrofiltre (4 installations),
- des fines de filtre à manches (4 installations),
- des fines d'un mixte de multi-cyclones et d'électrofiltre (1 installation),
- des fines d'un mixte de multi-cyclones et d'un filtre à manches (1 installation).

Selon la réglementation précitée, ces cendres ne peuvent être valorisées par la filière de l'épandage agricole.

Le tableau suivant présente les teneurs en métaux de ces cendres. Les médianes et moyennes ont été calculées en assimilant les valeurs inférieures à la limite de quantification du laboratoire à cette dernière.

Le site n°7, soumis à Enregistrement, est concerné par les VLE cités dans le tableau : il ne respecte pas les VLE pour le zinc, le cadmium, le plomb et la somme des quatre métaux (Cr+Cu+Ni+Zn).

Tableau 21 : 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
Type cendre		MC+FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF	FM			
Cr	mg/kg MS	115	289	115	153	795	138	230	45	42	24	127	195	1 000 ⁽¹⁾
Ni	mg/kg MS	31	43	27	27	100	9,3	28	36	9,4	41	30	35	200 ⁽¹⁾
Cu	mg/kg MS	256	1 035	922	608	4 743	268	374	330	349	279	362	916	1 000 ⁽¹⁾
Zn	mg/kg MS	6 240	19 122	24 360	21 207	9 854	8 468	5 684	11 541	2 428	2 425	9 161	11 133	3 000 ⁽¹⁾ 15 000 ⁽²⁾
As	mg/kg MS	70	537	863	161	1 036	27	138	81	15	13	109	294	-
Se	mg/kg MS	3,0	14	17	11	3,0	10	4,5	8,1	4,7	2	6	8	-
Mo	mg/kg MS	10	44	42	42	11	37	34	9	15	3	25	25	-
Cd	mg/kg MS	19	73	98	87	31	36	91	121	20	15	55	59	10 ⁽¹⁾ 130 ⁽²⁾
Pb	mg/kg MS	1 526	5 955	3 621	6 123	4 176	536	864	735	165	224	1 195	2 393	800 ⁽¹⁾ 900 ⁽²⁾
Hg	mg/kg MS	1,6	22	5,7	2,4	5,8	0,06	0,10	<0,025	<0,025	<0,025	1	4	10 ⁽¹⁾
Cr+Cu+Ni+Zn	mg/kg MS	6 642	20 489	25 424	21 996	15 492	8 882	6 316	11 952	2 829	2 769	10 417	12 279	4 000 ⁽¹⁾

(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

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

Tableau 22 : 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
Type cendre		MC+FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF	FM			
Humidité	%	0,1	5,5	0,7	0,7	0,9	0,5	1,7	0,1	5,2	2,6	1,80	1,71	
PCDD/F	ng I-TEQ/kg MS	235	4 201	3 774	1 592	1 065	13	670	5,8	0,38<C<0,84	7,7	1 156	1 092	400 ⁽²⁾
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 ⁽¹⁾
Benzo(a) pyrène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10	0,02	0,02	2 ⁽¹⁾
Benzo(b) fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,23	0,03	0,03	2,5 ⁽¹⁾
Fluoranthène	mg/kg MS	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,03	<0,01	0,10	0,03	0,02	5 ⁽¹⁾

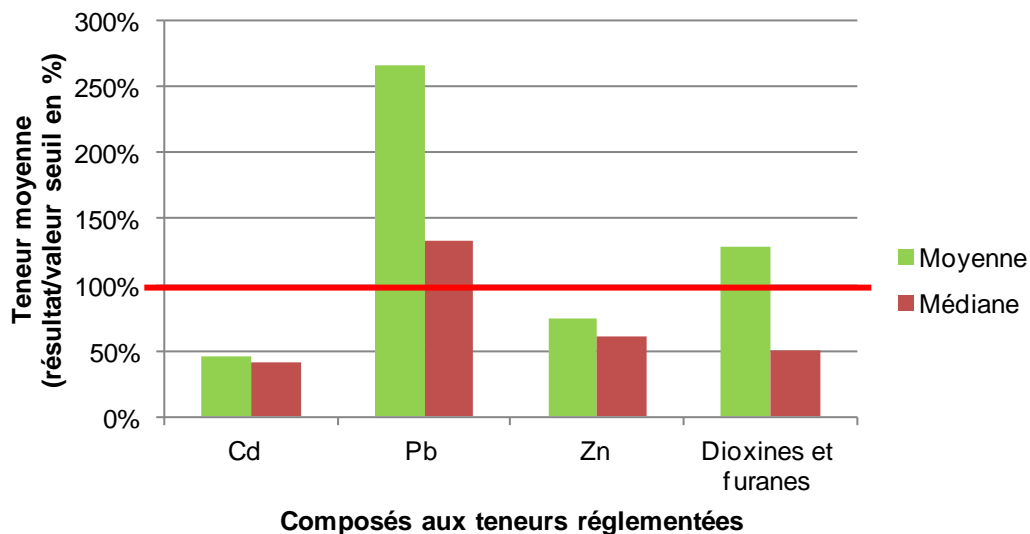
(1) : valeurs limites communes à l'arrêté du 26/08/2013-Déclaration et à l'arrêté du 24/09/2013-Enregistrement en dessous desquelles l'épandage (des cendres sous-foyer uniquement) est autorisé

(2) : 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 9 : 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) concernent de nombreuses chaufferies. Il serait donc difficile pour elles de respecter ce critère dans le cadre de l'Enregistrement (c'est le cas du site n°7).

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 15).

Pour ces chaufferies, il est donc préférable de rester sous le régime de la rubrique 2910 A Déclaration en faisant classé SSD une partie du mixte combustible à condition que les fournisseurs respectent bien leurs obligations de VLE vis-à-vis de l'arrêté SSD.

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 (chaîne de l'uranium 238 et chaîne du Thorium 232) et le césium 137 provenant des expérimentations humaines (essais nucléaires et incident de Tchernobyl).

Les résultats sont présentés 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 23 : 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	F+MC	F+MC	F+MC		F+MC	F+MC	F	F	F			
Radio activité globale	R α	Bq/kg	110	359	465	171	283	184	341	278	648	283	315	
	R β	Bq/kg	918	1 681	1 831	1 290	1 990	1 123	1 432	1 779	5 399	1 681	1 938	
Radio activité naturelle	K40	Bq/kg	996	1 319	1 743	1 211	2 248	1 080	1 137	1 225	4 375	1 225	1 704	
	Chaîne Th 232	Bq/kg	<132	<188	225	<171	<153	<134	<176	209	<290	176	186	
	Chaîne U 238	Bq/kg	<2149	<3026	<1926	<1549	<2713	<1187	<1522	<LD	<3500	2 038	2 197	
Radio activité naturelle	Cs 137	Bq/kg	<8	12	<7	16	<7	13	11	7	63	11	16	
Cendres volantes		MC+FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF	MC			
Radio activité globale	R α	Bq/kg	385	3 772	7 332	1 999	147	1 837	3 330	8 242	870	760	1 918	2 867
	R β	Bq/kg	2 585	9 898	9 532	5 300	557	8 611	13 400	17 359	2 857	4 216	6 956	7 432
Radio activité naturelle	K40	Bq/kg	2 594	6 345	8 082	7 038	428	10 807	6 300	8 305	2 171	3 266	6 323	5 534
	Chaîne Th 232	Bq/kg	<177	<226	<144	<197	<150	<229	<134	<298	62	<324	187	194
	Chaîne U 238	Bq/kg	<3412	<10947	<1750	<6413	<1871	<2524	<2187	<20110	431	<3707	2 968	5 335
Radio activité naturelle	Cs 137	Bq/kg	29	175	120	175	17	44	157	143	24	62	91	95

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-cyclones ; il est par ailleurs difficile de distinguer l'impact du multi-cyclone sur le contenu du mix de cendres. L'analyse réalisée au site n°10 sur des cendres de multi-cyclones seules confirme que la radioactivité de ce type de cendre se rapproche de la radioactivité des cendres sous foyer.

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 110 à 648 Bq/kg dans les cendres sous foyer et 147 à 8 242 Bq/kg dans les cendres volantes,
- Radioactivité β : des niveaux de 918 à 5 399 Bq/kg dans les cendres sous foyer et 557 à 17 359 Bq/kg dans les cendres volantes,
- K40 : des niveaux de 996 à 4 375 Bq/kg dans les cendres sous foyer et 428 à 10 807 Bq/kg dans les cendres volantes,
- Césium 137 : des niveaux de 7 à 63 Bq/kg dans les cendres sous foyer et 17 à 175 Bq/kg dans les cendres volantes.

On note que la radioactivité des cendres volantes du site n°5 est nettement plus faible que celle des autres chaufferies à cause de la collecte d'une partie du lit fluidisé avec les cendres.

Les résultats obtenus en 2016 sont cohérents avec les résultats trouvés en en 2014 et 2007 pour les cendres sous foyer.

Tableau 24 : Comparaison de la radioactivité des cendres avec l'étude de 2007 et 2014

Etude	R α Bq/kg	R β Bq/kg	K40 Bq/kg	Cs 137 Bq/kg
2016	110 à 648	918 à 5 399	996 à 4375	7 à 63
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 et on remarque que la concentration en césium 137 dont la période est de 30,5 ans diminue.

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). Les quantités collectées de ces cendres par chaufferie sont toutefois faibles (entre 3 % à 10 % des cendres totales).

5.3.3. 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. Il est aussi précisé le type d'épuration finale utilisé (FM : filtre à manches, EF : électrofiltre et MC : multi-cyclones).

Emissions de poussières et de particules fines

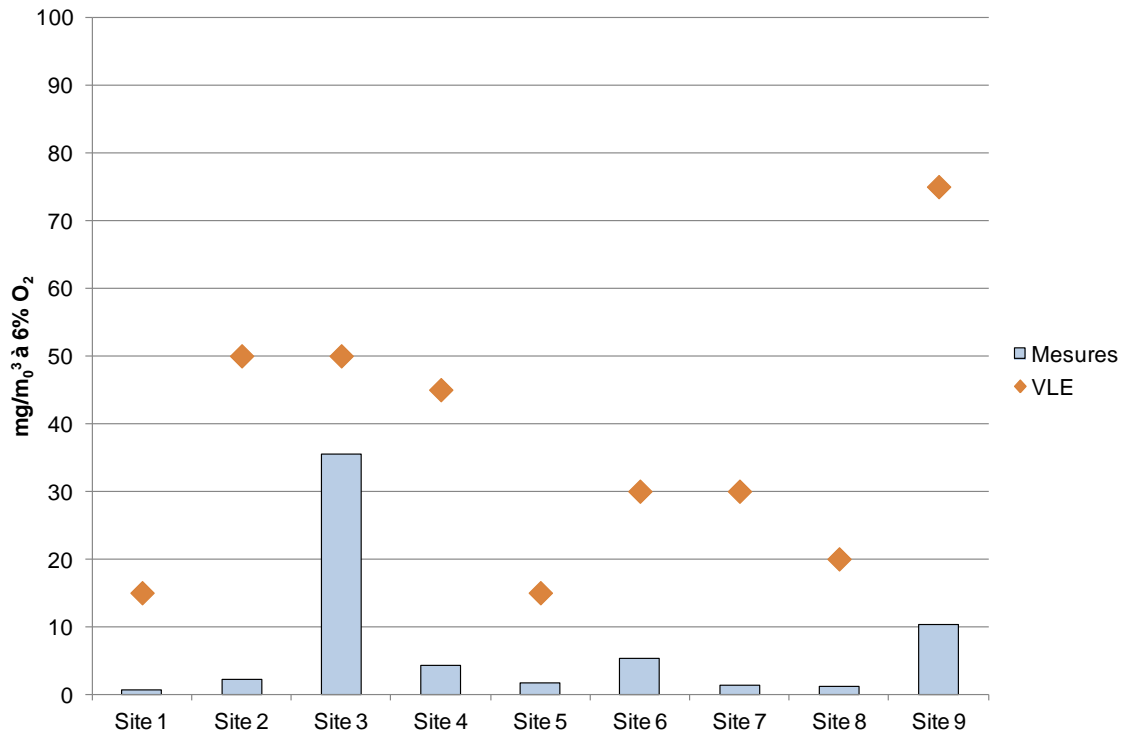
Le tableau suivant présente les rejets de poussières et de particules fines.

Tableau 25 : 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 9
		FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	MC	EF
Poussières	mg/m ³	0,7	2,2	35,4	4,3	1,7	5,3	1,4	1,1	468,0	10,3
PM10	mg/m ³	0,7	2,2	32,7	4,3	1,7	5,3	1,4	1,1		9,4
PM2.5	mg/m ³	0,6	1,5	27,6	2,7	1,1	4,6	1,0	1,0		7,8
PM1	mg/m ³	0,2	0,9	18,6	2,1	0,7	3,8	0,6	0,4		3,9

La figure suivante présente une comparaison des concentrations en poussières mesurées par rapport aux VLE des différents sites.

Figure 10 : Emissions de poussières



Cette figure montre que globalement, hors un point plus élevé au site n°3, les rejets de poussières sont bien maîtrisés avec des valeurs à moins de 10 mg/m³ à 6% O₂. Ces résultats sont conformes à la réglementation et à son évolution (les chaufferies actuelles soumises à Déclaration ou à Enregistrement seront soumises à une VLE de 50 mg/m³ à 6% O₂ à l'horizon 2018 ; cette VLE a été appliquée pour les sites à Déclaration).

Il faut toutefois mentionner que pour les zones PPA, des valeurs limites plus sévères peuvent être imposées aux installations soumises à Déclaration : c'est le cas des sites n°1, 4 et 7 avec des VLE comprises entre 15 et 45 mg/m³ à 6% O₂.

Les trois chaufferies soumises à Autorisation sont caractérisées par des rejets particulièrement bas : sites n°5, 6 et 8.

Les rejets de poussières sont caractérisés par une proportion importante de particules fines : les PM10 représentent 94 % en moyenne des rejets. Les rejets de PM2.5 représentent 77 % des poussières totales et les PM1 50 % des poussières totales.

Le tableau suivant présente les résultats par type d'épuration.

Tableau 26 : Rejets de particules par type de filtration

Paramètres mesurés	Unité	Moyenne 9 unités	Electrofiltre (4 unités)	Filtre à manches (5 unités)	Multi-cyclone (1 unité)
Poussières	mg/m ³ sec	6,9	13,3	1,8	468
PM10	%	94	93	100	-
PM2.5*	%	77	78	71	-
PM1*	%	50	51	44	-

Les rejets moyens des filtres à manches sont en dessous de 5 mg/m³. Les électrofiltres ont une moyenne de 13 mg/m³. On remarque évidemment que les rejets issus de la seule mesure sur multi-cyclones sont nettement plus importants.

Ce résultat est similaire à l'observation réalisée en 2014 et conforme à ce qui est attendu : les filtres à manches sont plus performants que les électrofiltres sur les petites particules.

Emissions de métaux

Le tableau suivant présente les rejets de métaux.

Trois installations possèdent des valeurs limites et sont repérées par code de couleurs :

- Les sites n°5 et 8 avec des arrêtés d'Autorisation,
- Le site n°7 avec un arrêté Enregistrement.

Tableau 27 : 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	Médiane	Moyenne	VLE1	VLE2	VLE3
		FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF					
CrVI	µg/m ³	0,3	0,6	0,7	0,2	0,1	1,6	0,2	0,2	4,6	0,6	1,1			
V	µg/m ³	1,1	0,0	9,2	0,1	0,2	88,1	1,4	0,0	-	0,8	12,9			
Cr	µg/m ³	29,5	0,9	32,9	19,8	0,5	3,8	6,4	0,9	-	5,1	21,9			
Mn	µg/m ³	10,7	4,4	229,0	51,7	7,6	19,4	55,1	1,6	-	30	51			
Co	µg/m ³	8,1	0,1	0,2	0,2	0,0	1,6	1,4	0,0	-	0,2	4,2			
Ni	µg/m ³	1,2	11,8	10,4	20,8	0,4	65,9	5,9	0,4	-	8,1	15,0			
Cu	µg/m ³	15,3	8,5	66,9	30,8	0,3	69,8	7,3	0,7	-	19,7	30,1			
Zn	µg/m ³	87,3	30,6	876,1	194,4	7,2	154,7	14,8	5,5	-	93	201			
As	µg/m ³	1,1	0,1	22,6	0,8	0,1	0,6	0,3	0,1	-	0,4	3,6			50
Se	µg/m ³	6,3	0,0	0,0	19,7	0,0	0,2	2,8	0,1	-	0,1	5,8			
Cd	µg/m ³	0,3	0,6	2,3	0,8	0,0	0,6	2,3	0,0	-	0,7	1,0	75	50	50
Sn	µg/m ³	0,7	0,4	7,0	15,2	0,4	3,8	1,6	0,2	-	2,0	3,9			
Sb	µg/m ³	3,6	0,3	3,3	1,6	0,2	0,1	1,6	0,0	-	0,9	2,6			
Te	µg/m ³	1,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	1,4	0,0	-	0,1	0,7			
Tl	µg/m ³	1,0	0,1	0,7	0,1	0,0	0,0	1,4	0,0	-	0,1	0,7	75	50	50
Pb	µg/m ³	13,3	2,0	165,2	59,2	0,9	24,1	19,7	0,5	-	21,9	40		1 000	1 000
Hg	µg/m ³	0,0	64,2	0,0	7,9	1,9	7,4	6,8	1,8	-	4,3	11,2	75	50	50
Cd+Hg+Tl	µg/m ³	1,3	64,9	3,0	8,8	1,9	8,0	10,4	1,9	-	6,4	13,0		100	100
As+Se+Te	µg/m ³	8,4	0,1	22,7	20,6	0,2	0,8	4,5	0,2	-	2,7	10,0		1 000	1 000
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	µg/m ³	83,8	2,0	165,2	59,2	0,9	24,1	19,7	0,5	-	21,9	73	750		
Sb+Cr+Co+Cu+Sn+Mn+Ni+V+Zn	µg/m ³	157,4	57,0	1235,0	334,6	16,7	407,3	95,5	9,4	-	159,1	342,7		20 000	5 000

VLE 1 : arrêté Autorisation du site n°5

VLE 2 : arrêté Enregistrement du site n°7

VLE 3 : arrêté Autorisation du site n°8

Les valeurs du site n°9 avec multi-cyclones sont données à titre indicatif car elles ne correspondent pas à la marche normale. Elles ne sont pas reprises dans la médiane et la moyenne.

Les sites soumis à réglementation respectent leurs VLE.

Toutes les unités étant équipées de filtres, les rejets sont en baisse par rapport aux campagnes précédentes. Toutes les chaufferies respectent par ailleurs les valeurs limites de l'arrêté Enregistrement.

Le tableau suivant présente pour les principaux métaux émis les valeurs moyennes par type de filtration.

Tableau 28 : Rejets de métaux par type d'épuration

Paramètres mesurés	Unité	Moyenne 9 unités	Electrofiltre (3 unités)	Filtre à manches (6 unités)	Multi-cyclones (1 unité)
Cr	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	16	13	11,4	45
Mn	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	267	84	25,3	2022
Ni	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	16	29	5,8	25
Cu	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	45	48	10,9	204
Zn	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	344	354	62	1725
As	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	4,9	7,8	0,5	19
Cd	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	4,7	1,2	0,7	36
Sb	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	1,7	1,2	1,4	4,8
Pb	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	61	64	19	260
Groupe I	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	16	25	4,9	41
Groupe II	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	11	8	6,8	38
Groupe III	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	61	64	19	260
Groupe IV	$\mu\text{g}/\text{m}_0^3 \text{ sec}$	705	566	123	4031

Comme pour les rejets de poussières, on note la bonne efficacité des filtres à manches et des électrofiltres. Le résultat pour les multi-cyclones a été observé sur l'installation n°9 pendant un arrêt de l'électrofiltre. Le résultat obtenu est très voisin de celui observé sur l'installation équipé d'un multi-cyclones lors de la dernière campagne de 2014.

Emissions de gaz majeurs et aérosols acides

Le tableau suivant présente une synthèse des résultats obtenus. Les dépassements de VLE sont surlignés en couleur.

Tableau 29 : 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	Médiane	Moyenne
		FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF		
CO ₂	% vol sec	9,9	14,6	18,4	14,2	13,4	-	14,3	14,8	13,7	14,2	14,1
CO	mg/m_0^3	28,0	39,2	63,6	297	69,3	152	75,3	0,5	170	69,3	99,5
NO _x	mg/m_0^3	212	355	481	205	232	423	169	227	169	227	275
SO ₃	mg/m_0^3	2,5	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,5
SO ₂	mg/m_0^3	113	28,0	10,1	4,6	13,7	6,1	6,6	16,9	4,3	10,1	22,6
HF	mg/m_0^3	0,07	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
HCl	mg/m_0^3	30	0,5	33,4	0,9	1,8	1,5	2,6	0,9	0,4	1,5	7,9

La figure 11 présente les rejets de CO des sites par rapport aux VLE.

Les émissions de CO sont globalement faibles et respectent les VLE qui sont de $200 \text{ mg}/\text{m}_0^3$ et $250 \text{ mg}/\text{m}_0^3$ selon les sites : seul le site n°4 dépasse la VLE fixée à $250 \text{ mg}/\text{m}_0^3$ (dépassement de $47 \text{ mg}/\text{m}_0^3$).

La figure 12 présente les émissions de NO_x des sites par rapport à leur VLE respectives.

Les émissions de NO_x sont aussi bien maîtrisées et aucun dépassement n'est observé.

Toutes les chaufferies respecteront la VLE à l'horizon 2018 de $525 \text{ mg}/\text{m}_0^3$ à 6% O₂.

Figure 11 : Emissions de CO

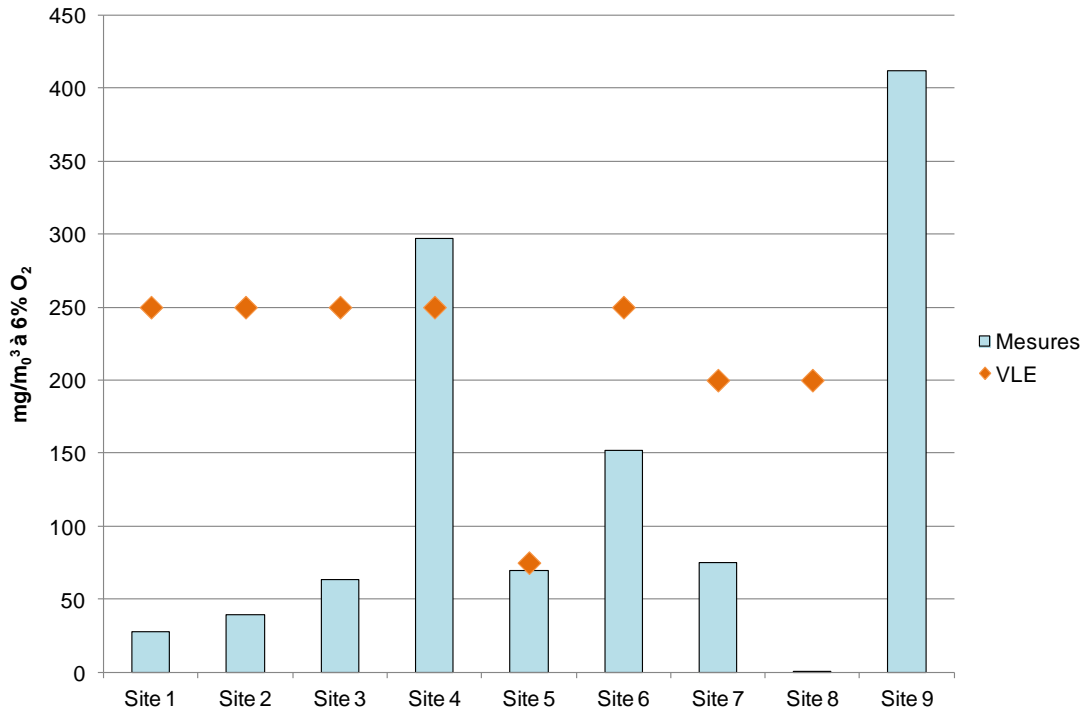
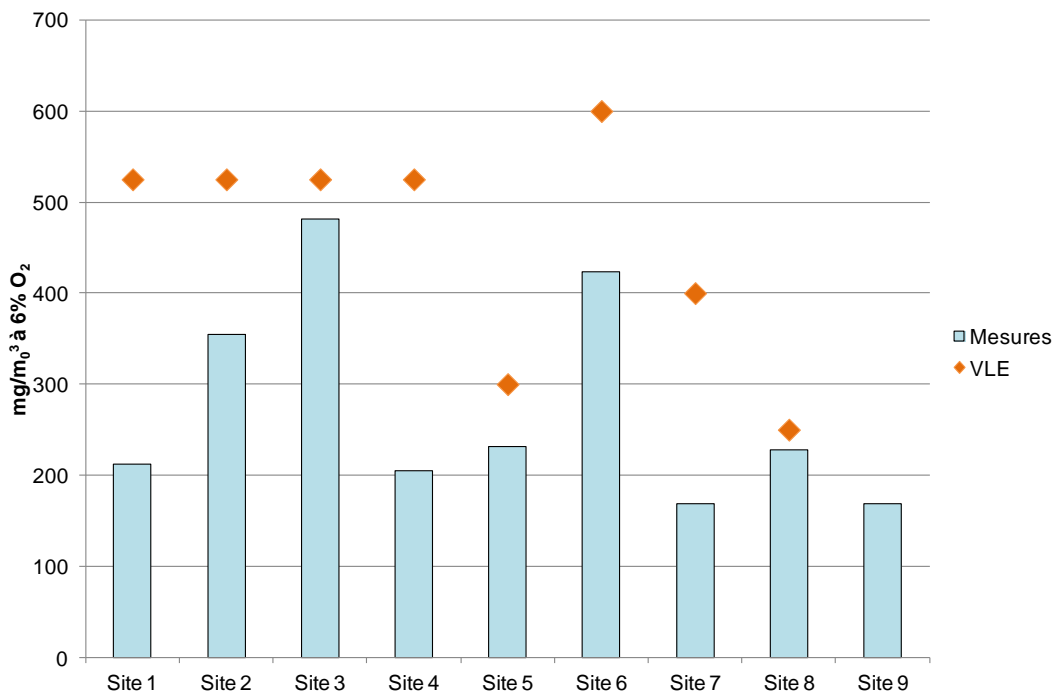


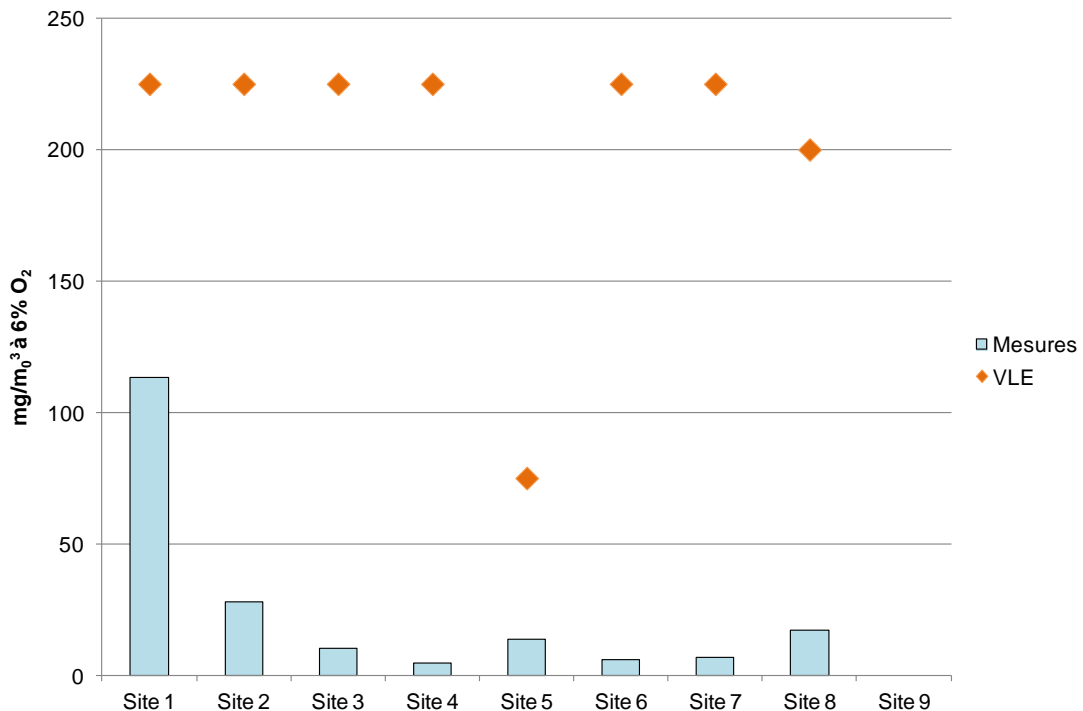
Figure 12 : Emissions de NOx



Les émissions de SO₃ sont à la limite de quantification.

Les émissions de SO₂ sont faibles (moins de 50 mg/m³) et respectent les réglementations en vigueur (entre 200 et 225 mg/m³ à l'exception du site n°5 dont la VLE est à 50 mg/m³). Seul le site n°1 présente une émission plus élevée en liaison avec la forte teneur en chlore du combustible : 101 mg/m³ sans dépassement de la VLE de 225 mg/m³ pour une installation soumise à Déclaration.

Figure 13 : Emissions de SO₂



Les émissions de HF sont faibles et la limite de la quantification.

Les rejets de HCl sont aussi faibles à l'exception du site n°1 (30 mg/m³). Il n'y a pas de VLE pour cette chaufferie sur cet élément.

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

Les filtrations finales n'ayant pas d'effet sur les rejets des composés étudiés, il n'est pas présenté de tableau de synthèse comme pour les poussières.

Emissions de composés organiques

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

- les gaz COVNM et CH₄,
- les rejets de PCDD/F,
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP,
- 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 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 avec les réglementations en vigueur.

Tableau 30 : 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	Médiane	Moyenne	VLE 1	VLE 2	VLE 3
		FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF					
COVNM	mg/m ³	2,4	1,0	2,4	1,7	0,2	1,1	0,8	1,0	3,0	1,1	1,6	50	15	50
CH ₄	mg/m ³	2,0	0,1	0,5	0,2	0,2	1,8	0,3	2,3	0,1	0,3	0,9			
PCDD/F	ng/m ³ I-TEQ	0,11	0,003	0,016	0,014	0,031	0,082	0,003	0,011	0,010	0,014	0,063		0,15	0,1
TOTAL HAP8	µg/m ³	1,71	0,31	0,05	0,20	1,37	0,28	0,03	0,25	0,19	0,2	1,0		15/10	100
Carbone élémentaire	µg/m ³	30	29	721	-	41	115	37	44	275	78,5	171,9			
Carbone organique	µg/m ³	24	39	633	-	61	153	38	57	326	74,8	174,4			

VLE 1 : arrêté Déclaration– Arrêté Autorisation pour le site n°8

VLE 2 : arrêts Autorisation

VLE 3 : arrêté Enregistrement du site n°7 et Autorisation pour le site n°8 (PCDD/F et COV)

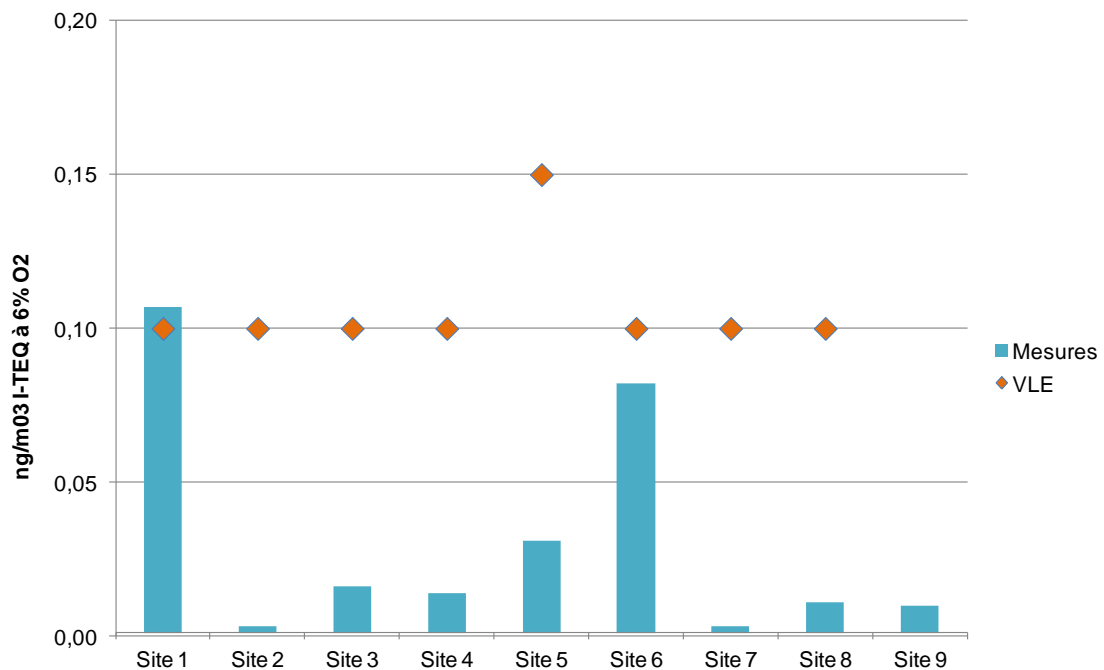
Les installations soumises à réglementation respectent leurs VLE.
Les émissions de COV sont faibles.

La figure 14 présente les rejets de PCDD/F. Une seule chaufferie dépasse légèrement le seuil de 0,1 ng I-TEQ/m³ : le site n°1 avec un résultat de 0,11 ng I-TEQ/m³.

Les rejets de HAP (8) sont aussi faibles. Toutes les chaufferies respectent les réglementations de l'arrêté Enregistrement.

Les rejets de carbone élémentaire et organiques sont variables mais du même ordre de grandeur par chaudière.

Figure 14 : Emissions de PCDD/F



5.3.4. Relations entre les émissions et la marche des installations

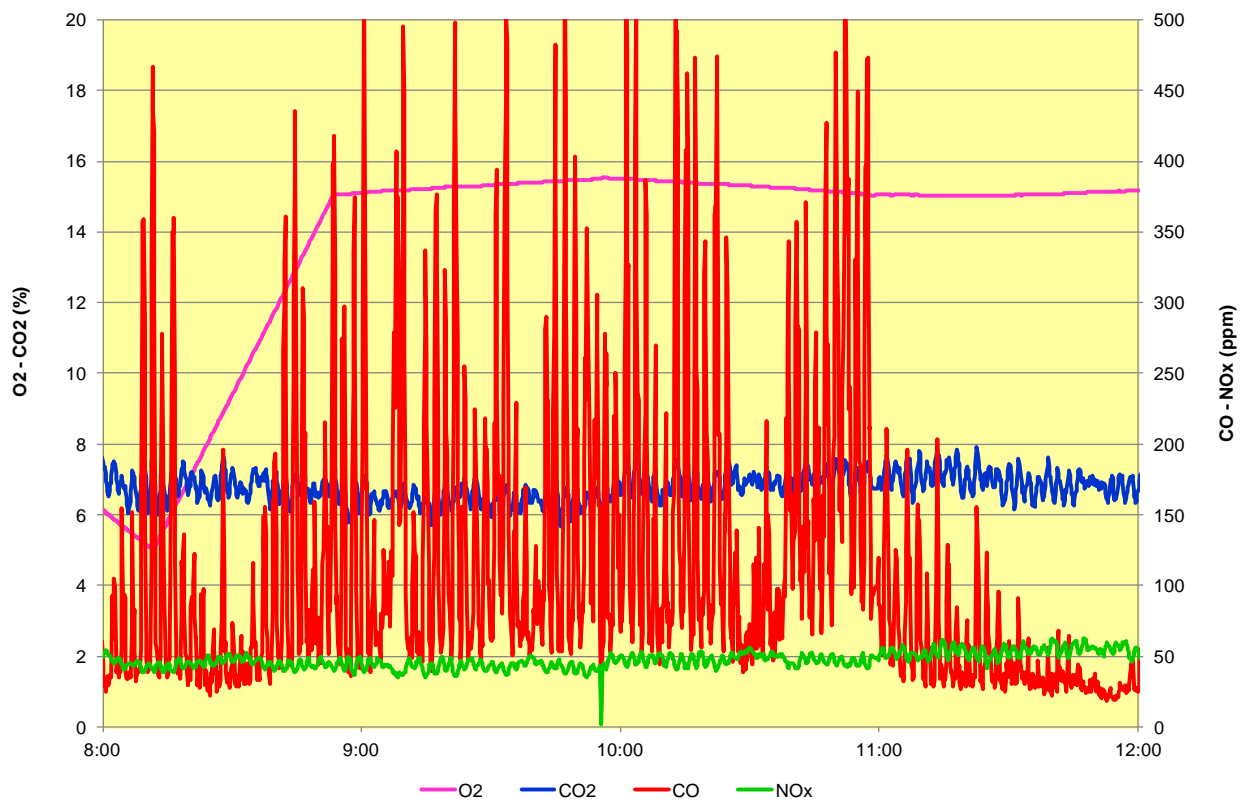
Les émissions mesurées au cours de la campagne 2016 sont faibles et il est difficile de trouver des liaisons entre la marche des installations et les émissions. La généralisation des épurations secondaires (filtres à manches et électrofiltres) avec un meilleur contrôle des combustibles a réduit les valeurs élevées dans les rejets.

Le site n°5, malgré un combustible spécifique et chargé en métaux, présente des émissions très basses grâce à un système d'épuration très performant.

Le site n°1 se distingue cependant. On a noté de fortes teneurs en chlore et en soufre dans le combustible au cours des essais : ces éléments se retrouvent aussi en forte proportion dans les cendres et dans les émissions.

Le dépassement observé en CO sur le site n°4 semble imputable à un défaut de régulation : la valeur de base des émissions est basse mais on observe de très nombreux pics (voire figure ci-dessous).

Figure 15 : Emissions de CO sur le site n°4



5.4. Synthèse des évaluations par chaufferie

5.4.1. Analyse des combustibles

Les chaufferies visitées sont approvisionnées pour la plupart (6 sur 10) en mix de plaquettes forestières et de bois de rebut (classé en SSD). Seules deux chaufferies (sites n°8 et 9) sont approvisionnées à 100% en plaquettes forestières : calibrées pour le site n°9 et grossières et humides pour le site n°8.

De façon générale, les exploitants sont relativement vigilants à la qualité du bois fourni. Beaucoup d'exploitants ont signalé des problèmes au démarrage des installations ayant occasionnés des casses, mais les rappels à l'ordre auprès des fournisseurs ont généralement été rapides et efficaces.

Le contrôle qualité repose principalement sur des tests d'humidité réalisés de façon régulière (par étuve ou micro-onde selon les cas) :

- l'humidité maximale acceptée par les exploitants va jusqu'à 55%
- les éléments mal calibrés ou indésirables sont rapidement identifiés.

Une seule chaufferie accepte du bois de rebut non SSD (le site n°7), la certification du fournisseur est néanmoins en cours.

Le cas du site n°5 est particulier ; l'exploitant accepte du bois de classe B et C (plus de classe A), mais l'installation a été conçue en adéquation. L'exigence porte principalement sur la granulométrie, l'installation est équipée d'un déférailleur, d'un cribleur et d'un broyeur en entrée.

Il est intéressant de noter que certains exploitants adaptent les plannings de livraison selon les fournisseurs et le type de combustible pour parvenir à des conditions plus stables pour les réglages de combustion. Ils alternent plaquettes forestières généralement plutôt humides et bois de rebut plus sec afin d'éviter les mélanges hétérogènes.

Les mélanges réalisés directement depuis les plateformes d'approvisionnement semblent peu satisfaisants (problème de stratification).

Concernant les plaquettes forestières, la pratique tend à approvisionner les chaufferies directement depuis les chantiers de broyage en forêt afin d'éviter les plateformes intermédiaires. Cela fonctionne uniquement pour les grosses chaufferies (> 1MW) qui acceptent du bois humide juste ressuyé en forêt.

Un point est tout de même à souligner concernant les chaufferies qui utilisent du bois de rebut classé en SSD. Les analyses montrent en effet des valeurs élevées, voire des dépassements pour certains composés (soufre et chlore) comparées aux valeurs de l'arrêté SSD du 29 juillet 2014. La chaufferie n°1 est particulièrement concernée, ces polluants se retrouvent également dans l'atmosphère, puisqu'on observe des valeurs élevées en SO₂, HCl et PCDD/F sur les analyses des fumées.

- ⇒ Evidemment, il n'est pas possible de généraliser les résultats de la campagne de mesures à l'ensemble du plan d'approvisionnement de la chaufferie n°1. La visite sur site n'a pas non plus permis de mettre en évidence la présence de bois « souillé ». Néanmoins, cela devrait attirer l'attention de l'exploitant quant à la qualité du bois fourni par ses fournisseurs et éventuellement faire procéder à des analyses indépendantes.

Des dépassements en métaux lourds sont également à signaler pour les cendres sous foyer et cendres volantes. L'application de traitements de préservation, de finition (peintures, vernis...), ou à la présence d'adjuvants (colles...) utilisés sur certains bois de rebut peuvent expliquer ces valeurs élevées.

Trois chaufferies sont concernées par des proportions de fines élevées. Les conséquences pour l'exploitation sont une pollution plus élevée et des risques de casse, bourrage et colmatage beaucoup plus importants.

Concernant les distances parcourues, il semble que pour les grosses chaufferies, les exploitants n'hésitent pas à élargir leur périmètre au-delà de 100 km pour s'approvisionner aux coûts les plus bas.

5.4.2. Analyse de la conception

Les problèmes de conception les plus fréquents relèvent souvent du silo et notamment de son adéquation avec la livraison, on peut citer :

- Impossibilité pour le camion de reculer correctement au-dessus du silo (butée de recul trop haute),
- Volumétrie du silo inadaptée (généralement profondeur insuffisante induisant un mauvais remplissage),
- Silo sous-dimensionné limitant l'autonomie et/ou le volume des livraisons.

Ces erreurs de conception sont majeures car elles perturbent le bon fonctionnement de l'installation et elles sont difficiles à rectifier ; les solutions mises en œuvre sont souvent des alternatives moyennement satisfaisantes :

- Ajout de vis de répartition dans le silo,
- Ajout de rails permettant au camion de reculer au dessus du silo.



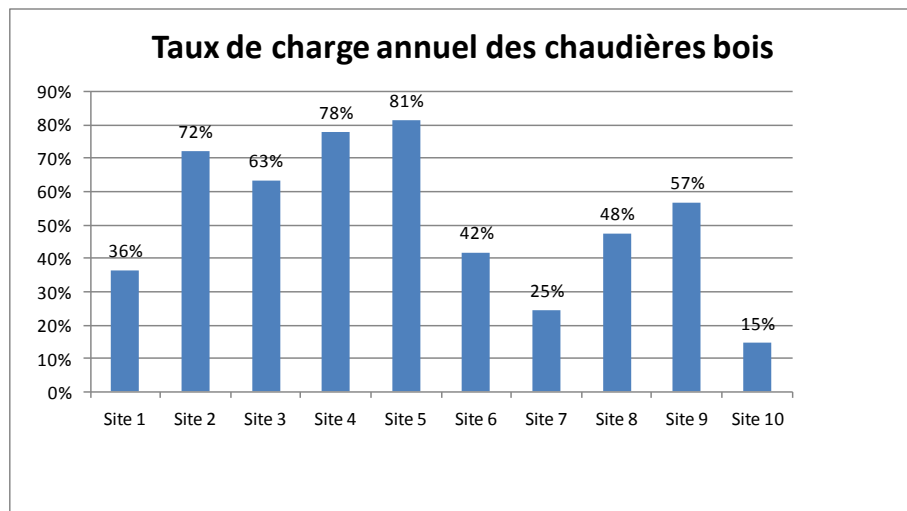
Exemple d'une modification de silo permettant un meilleur déchargement

Une installation (site n°7) était concernée par des problèmes d'humidité du combustible dans le silo, à la fois en raison d'une insuffisance de la ventilation et en raison d'un défaut d'étanchéité des trappes.

5.4.3. Analyse du dimensionnement

De façon générale, les chaufferies sont correctement dimensionnées par rapport aux besoins du site ou du réseau. Le taux de charge reflète le bon dimensionnement de la chaudière par rapport aux besoins (voir figure suivante).

Figure 16 : Taux de charge annuel des chaudières



On observe des taux de charge faibles pour les sites n°1, 6 et 8 car il s'agit d'installations dont les besoins vont évoluer (raccordement de nouveaux abonnés prévu).

Pour le site n°7, la priorité n'était pas donnée à la biomasse sur cette première saison de chauffe, ce qui peut expliquer le taux de charge très faible.

Par contre, la chaufferie n°10 est largement surdimensionnée. Les besoins du site ont été surévalués et la puissance de l'installation est deux fois supérieure aux besoins réels. Une chaufferie de 500 kW aurait été suffisante, au lieu de 1 MW installé. Heureusement l'installation est équipée de deux chaudières, au final une seule chaudière fonctionne, ce qui permet de ne pas trop dégrader les performances énergétiques et environnementales de l'installation.

Le risque de surdimensionnement est sans doute plus présent sur des chaufferies petites et moyennes exploitées en régie que sur des installations plus importantes conçues dans le cadre d'une DSP ou d'un CREM où l'exploitant de la future installation est impliqué dès la conception de l'installation.

5.4.4. Analyse des modes de régulation

On observe une montée en compétence des exploitants sur le pilotage des installations. Ils sont souvent plus vigilants à la qualité du combustible, mais également mieux formés aux chaufferies bois et à leur spécificité. Ils connaissent les paramètres relatifs à la combustion optimale du bois (réglages air primaire, air secondaire, excès d'O₂). Ils sont capables de modifier les réglages de combustion en fonction du type de bois (humidité, densité,...).

Les fabricants de chaudières proposent maintenant des recettes directement préenregistrées en fonction des types de combustibles permettant de simplifier les modifications de réglage pour les exploitants. Cela semble assez fiable et apprécié des exploitants.

On note que certains modèles de chaudières sont maintenant équipés de détecteur d'humidité du combustible en ligne. Les exploitants considèrent que cette technique est peu fiable car ils constatent de grosses différences avec les mesures de laboratoire. Cela ne peut remplacer les mesures faites directement au moment des livraisons et les modifications de réglages manuelles. Ce système n'est pas à généraliser sur les installations.

5.4.5. Causes génératrices de pannes et dysfonctionnements

Les causes les plus fréquentes de pannes sont toujours en lien avec la qualité du bois et la présence d'éléments indésirables. Le convoyeur bois est l'élément le plus fragile des installations et le plus souvent soumis à des avaries qui nécessitent un arrêt complet de la chaudière.

Le système à dessileur rotatif comme celui du site n°10, est une solution économiquement avantageuse pour les petites installations (400-500 kW maxi), mais est extrêmement exigeant sur la qualité du bois. Celui du site n°10 a cassé en raison de contraintes trop fortes liées au poids du combustible.

Deux sites (n°4 et n°6) ont signalé des formations de mâchefers en quantité importante dans le foyer : ce qui peut provoquer des dégâts importants dans la chaudière (casse grille, arrachage ou fonte du réfractaire) et bloquer le convoyeur à cendres.

La formation de mâchefers peut intervenir pour différentes raisons :

- une température trop élevée dans le foyer, mauvais réglage d'air primaire notamment,
- un combustible contenant beaucoup de cendres, de matière minérale (silice, potasse) ou d'éléments métalliques.

Un combustible très sec brûlé dans une chaudière conçue pour du bois humide peut être source de formation de mâchefer (site n°4 : mesure combustible à 22% d'humidité).

L'installation ayant connu le plus de dysfonctionnements est sans doute le site n°5, mais son cas est très particulier puisqu'il s'agit d'un prototype de chaudière à lit fluidisé qui brûle une grande variété de

combustibles peu comparables à de la biomasse d'origine forestière. La maîtrise du lit fluidisé constitue la difficulté majeure de l'installation. L'hétérogénéité du combustible en termes de composition demande des adaptations et des réglages que l'exploitant a eu des difficultés à anticiper.

L'exploitant a constaté une prise en masse du lit fluidisé (lié à la présence de métaux ferreux, de silicium, potassium dans le combustible). La recirculation du sable constituant le lit fluidisé est un point clé du bon fonctionnement de l'installation. L'exploitant réalise des analyses sur les sables afin de déterminer le meilleur taux de recirculation des sables. Durant le premier semestre, l'installation a également connu des problèmes de bourrage et de voutage du combustible sur les systèmes de convoyage, à priori résolus par un meilleur criblage-broyage en entrée.

5.4.6. Systèmes de traitement des fumées

Les installations visitées étaient toutes équipées d'un double traitement des poussières, multi-cyclones en pré-traitement en sortie de chaudière puis filtration poussée soit par filtre à manches, soit par électrofiltre (60/40 entre les deux technologies).

Aucun problème de fonctionnement spécifique sur ces équipements n'a été observé (excepté au site n°5 : manches percées suite à une élévation de température).

Les principes de fonctionnement sont classiques avec des by-pass sur les filtres à manches au moment des phases de démarrage (température basse) et en cas de températures élevées. Les décolmatages se font généralement on-line. La continuité de la filtration est assurée.

Ces commentaires sont néanmoins à nuancer pour les « petites chaufferies » (< 2 MW) qui ne sont pas soumises aux obligations réglementaires des ICPE.

Les deux petites chaufferies visitées (sites n°9 et 10) sont équipées de système de filtration afin de satisfaire aux critères du Fonds Chaleur (75 mg/m³ à 6 % d'O₂). Néanmoins, leur fonctionnement semble plus aléatoire que sur les grosses installations :

- Filtre à l'arrêt ou by-passé sans que l'exploitant ne le remarque ou n'intervienne : la chaufferie peut continuer à fonctionner sans filtre (site n°9),
- Complexité liée à la présence de haute tension pour un électrofiltre : une habilitation électrique est nécessaire ; généralement seul le fabricant intervient, d'où des délais de dépannage parfois longs,
- Risque de performances dégradées sur le long terme si un suivi régulier n'est pas réalisé : encrassement des manches, décolmatage inefficace, manches percées,...

La panne du filtre sur l'installation n°9 a également permis de faire des mesures sur une installation équipée uniquement d'un multi-cyclones. Les résultats sont très éloignés des valeurs habituellement admises (mais généralement non mesurées) en sortie de multi-cyclones (468 mg/m³ mesuré contre 200 mg/m³ indiqué généralement par les constructeurs, soit deux fois plus d'émissions).

Une fois le filtre en service, les émissions baissent à 10 mg/m³, soit un abattement de pollution de 98%.

Seule la chaufferie n°5 (rubrique 2770/2771) était équipée de traitement spécifique sur les fumées : injection d'urée pour les NO_x, de chaux et de charbon actif pour piéger le SO₂, les métaux lourds, dioxines et furanes et filtres à manches pour les poussières. Le système de réduction des NO_x peine toutefois à respecter la VLE de 200 mg/m³.

On note sur la chaufferie n°8 (classé en autorisation), un prototype de chaudière bas NO_x (foyer avec 3 chambres de combustion) permettant de respecter une VLE NO_x à 250 mg/m³ à 6% O₂. Cela a permis d'éviter la mise en place d'un système de DeNO_x.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que les émissions de NO_x sont globalement limitées avec une moyenne à 257 mg/m³ pour l'ensemble des chaufferies. Cela semble confirmer que les chaufferies bois peuvent se passer de système DeNO_x très couteux en investissement et en fonctionnement si l'approvisionnement reste en combustible de classe A.

5.4.7. Gestion des cendres

Par rapport aux campagnes précédentes, il est apparu une volonté plus forte des exploitants de trouver des filières de valorisation pour leurs cendres :

- 3 sites ont mis en place un plan d'épandage,
- 2 sites valorisent en compostage,
- 1 site valorise en méthaniseur.

Il est cependant apparu une mauvaise connaissance de la réglementation par les exploitants qui mélangent les cendres sous foyer et multi-cyclones dans le cadre de leur plan d'épandage. Les conceptions des installations, à savoir évacuation par voie humide dans le même convoyeur, rendent de toute façon difficile une séparation des cendres.

⇒ Un seul site (site n°1) collecte séparément les cendres sous foyer et respecte la réglementation.

Les cendres volantes issues des filtres sont envoyées en centre de stockage des déchets excepté pour un site (site n°8) qui les mélange aux autres types de cendres et les inclut dans son plan d'épandage (les mesures montrent pourtant des valeurs élevées en métaux lourds dans les fines d'épandage: Zn, Pb, Cd). Il n'a pu être vérifié au cours de cette étude la qualité du mélange global de cendre. Le site a effectué une demande de dérogation en préfecture pour poursuivre l'épandage avec l'ensemble des cendres.

Les petits sites pratiquent des collectes séparées en chaufferie, mais les mélangent par la suite dans une benne commune (pas d'info sur le devenir des cendres).

5.4.8. Système de récupération d'énergie

Sept installations étaient équipées d'économiseurs.

Ce point témoigne d'une volonté des concepteurs-exploitants d'améliorer les performances des installations.

⇒ Sur le site n°8, les économiseurs sont équipés de comptage, les gains sont de l'ordre de 2%.

Une installation (site n°6) était également pourvue d'un condenseur par voie humide.

Malheureusement, ces installations ne sont pas toujours équipées de compteur pour connaître les performances réelles de ces équipements (condenseur notamment dont la performance peut être très variable selon l'humidité du bois, les régimes de température du réseau,...)

6. Recommandation

6.1. Recommandations sur les combustibles

Les contrôles qualité du combustible doivent devenir systématiques, on recommande à minima le contrôle d'humidité avec :

- étuve pour les grosses chaufferies
- micro-onde pour les petites chaufferies avec protocole de mesure d'humidité affiché en chaufferie.

En cas de présence de fines importantes, il est également recommandé de faire procéder à une analyse de granulométrie par un laboratoire bois-énergie pour vérifier le taux de fines.

Le taux de fines ne doit en effet pas être sous-estimé par les exploitants. Il doit être précisé clairement dans le contrat d'approvisionnement avec le fournisseur, au même titre que l'humidité et la granulométrie. La norme NF EN ISO 17225 fait référence pour définir la granulométrie du combustible.

La certification SSD d'un fournisseur ne doit pas dispenser l'exploitant d'un contrôle visuel sur la qualité du bois. Les taux élevés en chlore et soufre sur les analyses du site n°1 devraient inciter l'exploitant à vérifier

la qualité de son approvisionnement. En effet, ces polluants se retrouvent également dans l'atmosphère et dans les cendres.

Nous recommandons à l'exploitant de faire réaliser des analyses de combustible s'il observe à nouveau la présence de bois « souillé » dans ses livraisons.

Si la chaufferie est alimentée par des combustibles très différents, l'exploitant aura intérêt à faire livrer le même type de bois pendant une période (par exemple bois de rebut pendant 1 semaine, puis uniquement plaquette forestière la semaine suivante) afin d'éviter les modifications de réglages incessantes.

6.2. Recommandations sur la conception

Il est impératif de prévoir les systèmes de comptage même sur les petites installations (rien sur le site n°9), sinon il est impossible de suivre les performances de l'installation !

⇒ Des débitmètres à ultrasons non intrusifs peuvent être ajoutés sur une canalisation sans modification hydraulique. La précision de ce type de compteur est moins bonne que les compteurs volumétriques, mais la mise en œuvre pourra être plus simple. Cela nécessite des longueurs droites en amont de l'ordre de 5 DN.

Il semble également intéressant d'instrumenter les systèmes de récupération d'énergie (économiseur et condenseur) afin d'évaluer leur pertinence technico-économique.

Il est nécessaire de prévoir des trappes de mesure ou à minima un piquage pour mesurer les performances des traitements de fumées même sur les petites chaufferies.

Surdimensionnement des chaufferies :

La tentation est grande pour les maîtres d'ouvrage de surdimensionner la puissance de la chaufferie en prévision d'extension hypothétique. Le surcoût sera supporté par les abonnés. L'installation fonctionnera mal à faible charge, avec un mauvais rendement, et un encrassement accéléré des équipements...

⇒ Le surdimensionnement est une fausse bonne idée sauf si les potentialités d'extension du réseau sont clairement identifiées en amont du projet

Choix des équipements :

Le type de combustible ne doit pas être le seul critère dans le choix des équipements, le nombre d'heures de fonctionnement annuel est également un critère important, notamment s'il est supérieur à 3 000 h ou 4 000 h pleine puissance : cas des hôpitaux, piscine,... Il faudra privilégier des systèmes d'extraction robustes et éviter les systèmes type dessileur rotatif plus fragiles mécaniquement.

Concernant l'évacuation des cendres en sortie de filtre, il semble préférable de privilégier des bigs bags directement en sortie de filtre : les vis semblent en effet sources de colmatage fréquents sur de nombreuses installations. Le modèle de big bag choisi doit néanmoins être résistant aux températures élevées des cendres et ne pas être posé directement sur des palettes en bois, afin d'éviter tout risque de combustion et d'incendie. Des caissons métalliques semblent le plus adaptés.

Si la réglementation n'évolue pas pour accepter les cendres des multi-cyclones en épandage, il faudra privilégier les collectes séparées pour les cendres sous foyer et cendres des multi-cyclones. Cela permettra de valoriser uniquement les cendres sous foyer en plan d'épandage conformément à la réglementation.

Certains fabricants de filtre proposent des systèmes de collecte des cendres intégrés au filtre, ces cendriers ne sont plus étanches une fois retiré pour la vidange, ce qui rend leur manipulation très délicate par le personnel (cendres très volatiles et très pulvérulentes qui se répandent dans toute la chaufferie). Ce type de configuration semble donc à éviter à moins de disposer d'un système d'aspiration centralisée.

Agencement des équipements

L'agencement des équipements dans la chaufferie (notamment l'accès aux différents points d'entretien) doit être bien intégré dès la conception. Selon les marques de chaudières, les trappes de ramonage, l'ouverture des portes, la position des bennes à cendres, les ventilateurs... peuvent différer. Il est donc recommandé

de vérifier dès que possible avec le fabricant que ses recommandations de dégagement sont bien respectées et que les opérations d'entretien pourront se faire correctement.

Ventilation des silos :

En conception silo enterré, une ventilation efficace est souvent plus délicate à réaliser. Cet aspect ne doit pas être négligé surtout si le bois est plutôt humide (> 40 % d'humidité).

Dans le cas d'un bois sec (25-30% maxi), un balayage naturel peut être suffisant.

Pour les combustibles humides, il est impératif de prévoir une ventilation mécanique ; il faudra alors être vigilant à ce que le système ne soit pas source d'infiltration d'eau dans le silo.

Echangeur de chaleur

Il est impératif de prévoir un ramonage automatique des tubes de fumées (par turbulateur ou air comprimé) quelle que soit la configuration de l'échangeur. La chaufferie n°7 n'est pas équipée de ramonage automatique et la fréquence de ramonage manuel est par conséquent très élevée.

6.3. Recommandations sur l'exploitation

Quelle que soit la taille de l'installation, il est recommandé de prévoir une intervention annuelle du fabricant (en fin de saison de chauffe par exemple) pour réaliser un état des lieux complet de la chaudière permettant de planifier les grosses interventions (réfection de réfractaire, grille, voute,...).

Cela permet également de refaire le point sur les réglages de la chaudière et de vérifier leur adéquation avec le type de combustible.

En cas de renouvellement trop fréquent de mâchefer, une analyse de la qualité des cendres peut être effectuée par un laboratoire spécialisé dans le bois-énergie (taux de silice et de potasse). Il faut prévoir la possibilité de réaliser des réglages prédéfinis avec le fabricant de la chaudière selon le type de bois et être attentif à la maintenance du filtre notamment pour les petites installations : prévoir un contrat de suivi avec le fabricant et une visite annuelle, notamment pour le contrôle des manches.

Plusieurs installations ont souffert au démarrage du manque de compétences des exploitants et de vigilance vis-à-vis de l'approvisionnement. Les sanctions ont été lourdes puisque ces installations ont connu rapidement des problèmes de casses de gros matériel (extracteur, convoyeur, grille chaudière, réfractaire) et des frais importants non prévus au plan de renouvellement.

7. Bilan National

7.1. Comparaison aux données disponibles sur les émissions

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

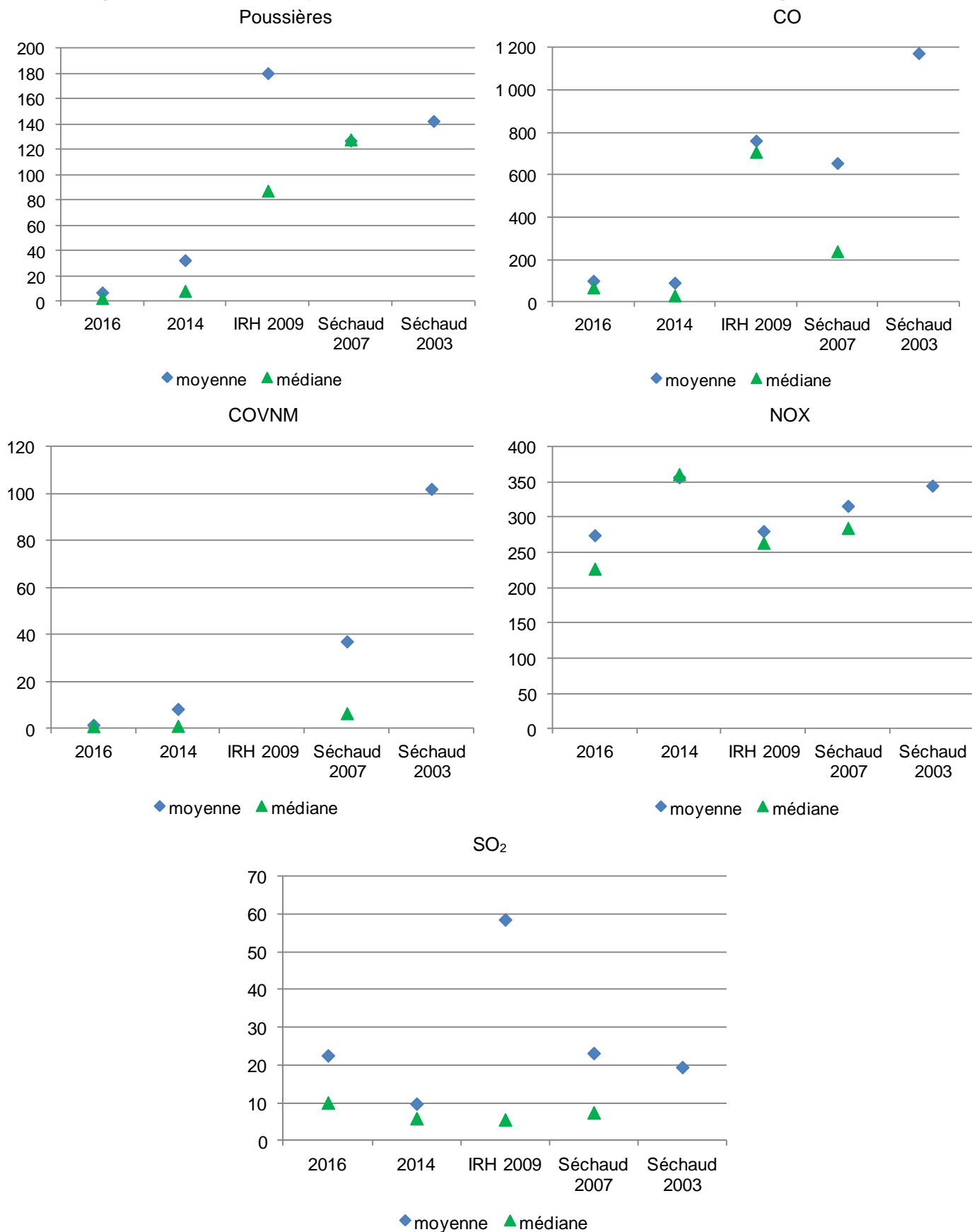
Tableau 31 : Comparaison avec les campagnes ADEME précédentes

Paramètre	Unité	2016					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.	Med	Moy.	Min.	Max.	Nb inst.	Moy.	Min.	Max.
Poussières	mg/m ³	10	2,2	6,9	0,7	35,4	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	69,3	99,5	0,5	297,1	10	32	92	1,9	324	13	708	761	17	3197	8	240	656	65	2280	10	1173	17	4914
COV NM	mg/m ³	10	1,1	1,5	0,2	3,1	10	1,2	8,4	0,2	67	-	-	-	-	-	8	7	37	2	135	10	102	2	693
NOx	mg/m ³	10	227	275	169	481	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	10,1	22,6	4,3	113	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 bleu représente la valeur moyenne,
- le triangle vert la médiane.

Figure 17 : Evolution des rejets de poussières, CO, COVNM, NOX, SO₂ depuis 2003 (mg/m³ à 6% O₂)



On remarque une baisse significative des rejets pour les poussières, CO et les COV. 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 les NOx, on observe une stagnation des émissions en moyenne et une légère baisse en médiane. Les technologies bas NOx font peu de progrès mais la dispersion des émissions est stable et les rejets dépassent rarement la VLE de 525 mg/m³ à respecter en 2018 pour les installations soumises à déclaration.

Pour SO₂, on note des résultats dispersés. Les médianes sont basses et stables mais un ou deux émetteurs par campagne augmentent fortement la dispersion. C'est le cas du site n°1 en 2016.

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

Tableau 32 : Evolution des émissions de poussières par type de filtration depuis 2003

	Unité	Moyenne	Electrofiltre	Filtre à manches	Multi-cyclones
2016	mg/m ³ à 6% O ₂	7	13	2	468
LECES 2014		33	12-87*	5	35
IRH 2009		180	14	60	320
Séchaud 2007		127	27	17	172
Séchaud 2003		143	-	-	143

* : 12 mg/m³ sans 1 site

On remarque le bon comportement des filtres à manches, surtout au cours de cette campagne. Le résultat pour les électrofiltres est voisin des campagnes précédentes : LECES 2014 et IRH 2009.

La seule mesure avec multi-cyclones réalisée au cours de cette campagne donne un résultat plus élevé que lors des campagnes précédentes.

Pour les NOx, si on n'observe pas d'évolution notable en moyenne, on note cependant que les technologies mises en œuvre (procédés DeNOx, conception de foyer bas-NOx) permettent de maintenir les équipements en dessous des valeurs limites réglementaires.

7.2. Evaluation des ratios spécifiques par chaudière

Le tableau suivant présente les valeurs d'émission spécifiques par chaufferie. Une comparaison avec les données du CITEPA n'est pas réalisée dans le cadre de cette étude car la base de données du CITEPA doit être actualisée.

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

Le tableau suivant présente les résultats obtenus.

Tableau 33 : 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	Médiane	Moyenne
Epuration		FM	EF	EF	FM	FM	EF	FM	FM	EF		
Poussières	g/GJ	0,4	0,8	10,3	1,6	0,6	2,1	0,5	0,4	4,7	1,0	2,5
PM10	g/GJ	0,4	0,8	9,5	1,6	0,6	2,1	0,5	0,4	4,3	1,0	2,3
PM2,5	g/GJ	0,4	0,5	8	1,0	0,4	1,8	0,4	0,4	3,6	0,9	1,9
CO ₂	kg/GJ	108	105	105	102	98	-	108	107	124	106,1	107,1
CO	g/GJ	16	14	19	109	26	59	29	0	78	26	39
NOx	g/GJ	118	131	140	75	87	164	65	83	77	87	105
COVNM	g/GJ	1,3	0,4	0,7	0,6	0,1	0,4	0,3	0,4	1,4	0,4	0,6
CH ₄	g/GJ	1,1	0,2	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,2	0,3
SO ₂	g/GJ	63,3	10,3	2,9	1,7	5,1	2,4	2,5	6,2	2,0	2,9	21,9
HF	g/GJ	0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HCl	g/GJ	16,5	0,2	9,7	0,3	0,7	0,6	1,0	0,3	0,2	0,6	6,2
PCDD/F	ng/GJ I-TEQ	59,7	1,3	4,8	5,0	11,6	31,6	1,0	4,0	3,5	4,8	24
HAP (8)	mg/GJ	0,96	0,11	0,01	0,07	0,51	0,11	0,01	0,09	0,10	0,1	0,4
Cr	mg/GJ	16,5	0,3	9,6	7,2	0,2	1,5	2,5	0,3		2,0	8,1
Cu	mg/GJ	8,6	3,2	19,5	11,3	0,1	27,0	2,8	0,2		7,2	10,8
Ni	mg/GJ	0,7	4,3	3,0	7,6	0,1	25,5	2,3	0,2		2,6	5,6
Zn	mg/GJ	49	11	255	71	3	510	6	2		41	123
As	mg/GJ	0,59	0,04	6,58	0,30	0,05	0,23	0,12	0,03		0,2	1,1
Se	mg/GJ	3,6	0,0	0,0	7,2	0,0	0,1	1,1	0,0		0,1	2,2
Cd	mg/GJ	0,2	0,2	0,7	0,3	0,0	0,2	0,9	0,0		0,3	0,3
Hg	mg/GJ	0,0	23,7	0,0	2,9	0,7	2,9	2,6	0,7		1,6	4,2
Tl	mg/GJ	0,5	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0		0,0	0,3
Pb	mg/GJ	7,5	0,7	48,1	21,6	0,3	18,7	7,5	0,2		13,1	15

Le tableau 34 présente les facteurs d'émission par type d'épuration.

Tableau 34 : Facteurs d'émission spécifique par type d'épuration

Paramètres	Unité	Médiane 9 unités	Moyenne 9 unités	Moyenne Electrofiltre	Moyenne Filtre à manches
Poussières	g/GJ	0,80	2,4	4,5	0,70
PM10	g/GJ	0,80	2,2	4,2	0,70
PM2.5	g/GJ	0,55	1,8	3,5	0,50
CO ₂	kg/GJ	106	107	111	105
CO	g/GJ	26	39	43	36
NOx	g/GJ	87	104	128	86
COVNM	g/GJ	0,43	0,63	0,74	0,54
CH ₄	g/GJ	0,19	0,29	0,22	0,34
SO ₂	g/GJ	2,9	11	4,4	16
HAP (8)	mg/GJ	0	0	0	0
HCl	g/GJ	0,6	3,3	2,7	3,8
PCDD/F	ng/GJ I-TEQ	4,8	14	10	16
HAP (8)	mg/GJ	0,10	0,22	0,084	0,33
Cr	mg/GJ	2,0	4,8	3,8	5,4
Cu	mg/GJ	5,9	9,1	16,6	4,6
Ni	mg/GJ	2,6	5,5	11,0	2,2
Zn	mg/GJ	30	113	259	26
As	mg/GJ	0,17	1,0	2,3	0,22
Se	mg/GJ	0,054	1,5	0,026	2,4
Cd	mg/GJ	0,24	0,31	0,38	0,27
Hg	mg/GJ	1,6	4,2	8,8	1,4
Tl	mg/GJ	0,029	0,17	0,081	0,22
Pb	mg/GJ	7,5	13,1	22,5	7,4

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

Pour les PCDD/F, le résultat est dégradé pour les filtres à manches à cause de la concentration plus élevée mesurée sur le site n°1.

Pour les métaux (Zn en particulier), les résultats sont dégradés pour les électrofiltres à cause des teneurs élevées mesurées sur 3 chaufferies sur 4.

Cette campagne a permis d'obtenir des facteurs d'émission représentatifs de 5 unités avec filtre à manches et 4 unités avec électrofiltre. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant avec le rappel des campagnes précédentes.

Tableau 35 : Comparatif de facteurs d'émission depuis 2003

Paramètre	Unité	2016		2014		IRH 2009		Séchaud 2007	
		FM	ESP	FM	ESP	FM-ESP	MC	FM-ESP	MC
Filtration finale									
Poussières	g/GJ	0,7	4,5	1,8	3,8	3	59	12,5	74
CO	g/GJ	36	43	27	4,7	175		120	288
NOx	g/GJ	86	128	143	68	95		183	124
COVNM	g/GJ	0,5	0,7	0,67	0,1			19	20
SO ₂	g/GJ	16	4,4	4,06	0,2	3,7		0,06	5,1
HAP (8)	mg/GJ	16	10,3	0,85	1,3			1,6	4,5
PCDD/F	ng/GJ	0,3	0,1	2,6	49			7,1	36
Cr	mg/GJ	5,4	3,8	2,0	5,7			4,2	11,2
Cu	mg/GJ	4,6	16,6	6,2	8,9			3,5	14
Ni	mg/GJ	2,2	11,0	3,1	4,5			14,6	21,4
Zn	mg/GJ	26	259	61	49			30	186
As	mg/GJ	0,2	2,3	0,60	1,2			0,03	8,14
Se	mg/GJ	2,4	0,0	2,6	1,7			0,03	1,07
Cd	mg/GJ	0,3	0,4	2,2	1,7			n.d.	0,6
Hg	mg/GJ	1,4	8,8	1,9	0,3			0,37	2,26
Tl	mg/GJ	0,2	0,1	1,4	0,9			n.d.	0,66
Pb	mg/GJ	7,4	22,5	13	5,9			8,9	19,3

On remarque des valeurs parfois dispersés d'une campagne à l'autre mais cela peut être du à un émetteur au cours de la campagne présentant des rejets élevés (cas du SO₂ pour le site n°1 au cours de la campagne 2016).

Les valeurs 2016 sont assez proches des valeurs 2014 : ce qui peut s'expliquer par les technologies mises en œuvre qui diffèrent peu entre les deux campagnes.

On observe une baisse significative par rapport aux premières campagnes (2009 et 2009) pour les poussières, le CO et les COV.

Les facteurs d'émission du CITEPA présentent des valeurs supérieures aux données collectées dans cette étude. Ils sont en cours de révision et ne sont donc pas présentés.

8. 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 exploitants rencontrés sont mieux informés de l'évolution du Statut de Sortie des Déchets (SSD) pour le bois en fin de vie et la plupart se sont positionnés pour rester sous un régime de Déclaration rubrique 2910 A (une seule chaufferie est en 2910 B et devrait repasser en 2910 A).

Les combustibles sont donc globalement de qualité conforme; un point important à surveiller étant l'humidité. Les seuils de qualité établis pour le statut SSD doivent cependant être suivis dans le temps (une chaufferie ne semble pas avoir la qualité requise). Il a été trouvé peu de métaux dans les combustibles à l'exception d'un site particulier soumis à la réglementation des installations de traitement de déchets. L'humidité et la qualité des combustibles (dimension, indésirables) sont la cause des principaux incidents de fonctionnement observés sur les chaudières.

▪ Cendres :

Les cendres sous foyer sont généralement collectées avec les cendres de multi-cyclones. Ces cendres sont souvent valorisées en épandage et cette pratique est non conforme à la réglementation. Les analyses réalisées montrent que le mélange respecte les seuils définis pour une valorisation agronomique par plan d'épandage agricole. Les cendres de multi-cyclones seules respectent ces critères à l'exception d'un dépassement pour le cadmium.

Les cendres volantes (filtres à manches, électrofiltres) présentent des concentrations en métaux souvent élevées et parfois en éléments organiques (PCDD/F) : elles ne sont pas valorisables. Elles présentent pour certains sites ayant du combustible passé au statut SSD des concentrations se situant au dessus des seuils définis pour le régime Enregistrement : un meilleur suivi de la qualité du combustible est à faire.

▪ Emissions atmosphériques :

Les valeurs mesurées donnent des résultats en nette progression par rapport aux inventaires précédemment réalisés (à l'exception des NOx) : 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/m³ à 6% O₂ pour tous les sites,
- peu de dépassements des principaux polluants réglementés : CO (1 dépassement), PCDD/F (1 léger dépassement du seuil de 0,1 ng/ m³),
- une chaufferie soumise à Déclaration avec du combustible SSD présente des rejets assez élevés en SO₂ et HCl en liaison directe avec les teneurs élevées observées dans le combustible.

Pour les NOx, les chaufferies respectent les valeurs limite d'émission mais on n'observe pas de baisse des émissions par rapport aux campagnes précédentes.

▪ Efficiences énergétique :

Le rendement des installations s'approche du nominal (90 %) et ce résultat semble maintenant acquis quelque soit le taux de charge des chaufferies.

Les chaufferies apparaissent bien dimensionnées à l'exception de celle du site n°10 qui est nettement surdimensionnée par rapport aux besoins.

Les installations étudiées sont récentes et il y a encore peu de retour sur la maintenance des installations : certaines ont cependant présentés des 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 (suivi du dispositif SSD) et la maîtrise (contractualisation et contrôle) de la qualité des approvisionnements,
- Améliorer la conception et le dimensionnement des dispositifs de d'évacuation des cendres (conception des cendriers en particulier),
- Améliorer la conception des petites chaufferies avec la mise en place de compteurs d'énergie leur permettant d'avoir un suivi énergétique global de leur fonctionnement,
- Améliorer l'exploitation quotidienne par des accompagnements spécifiques avec le fabricant des chaudières sur les petites installations (réglages adaptés au combustible, formation du personnel),
- *Eclaircir le statut réglementaire des cendres de multi-cyclones* : cette recommandation était déjà formulée en 2014.

Références bibliographiques

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. Expertise de 10 chaufferies collectives au bois – analyse et recommandations – Etude LECES pour l'ADEME – 2014
5. Evaluation technico-économique des systèmes de réduction des émissions de particules des chaudières biomasse – INDDIGO - 2012
6. Prospective d'évolution des facteurs d'émission des chaufferies collectives bois – Etude CITEPA - (transmission d'un document partiel par l'ADEME)
7. Gestion et valorisation des cendres de chaufferies bois : Etude Solagro-Aquasol pour l'ADEME – 2006
8. 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)
9. 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
10. 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
11. NFU 44-095 : Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux
12. NFU 44-051 : Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage
13. 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

Sigles et acronymes

As : arsenic
 ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
 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
 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
 P₂O₅ : phosphore
 Pb : plomb
 PCB : polychlorobiphényles
 PCDD/F : Polychlorodibenzo-p-dioxines / Polychlorodibenzo – furanes
 PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
 PCP : pentachlorophénol
 PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur
 PM₁ : particules de diamètre aéroulque inférieur à 1 µm
 PM_{2.5} : particules de diamètre aéroulque inférieur à 2,5 µm
 PM₁₀ : particules de diamètre aéroulque 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

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 suivant.

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 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 (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 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
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

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 : Fluoranthène, Benzo(a)anthracène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Dibenzo(a,h)anthracène, Indéno(1,2,3-cd)pyrène, Benzo(g,h,i)pérylène) <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 CrVI	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 et organique	Echantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre en fibres de quartz. Analyse par coulométrie	Méthode interne selon Méthode Métropole 038

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

Les limites de quantification sont présentées dans le tableau ci-dessous.

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	2,0 m ³	0,85 mg/m ³
O ₂ , CO, CO ₂ , NO _x , COV totaux, COV nm	en même temps que les prélèvements	0,1 % (gamme 0-25 %) 0,2 ppm (gamme 100 ppm) 0,1 % (gamme 0-25 %) 0,4 ppm (gamme 100 ppm) 0,2 ppm (gamme 100 ppm) 0,3 ppm (gamme 100 ppm)
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	0,4 µg/m ³
HCl	Phase gazeuse : 0,060	0,2 mg/m ³
HF	Phase particulaire : 1m ³ Phase gazeuse : 0,060 m ³	0,1 mg/m ³
Métaux lourds	Phase particulaire : 2m ³ Phase gazeuse : 0,120 m ³	0,3 à 10 µg/m ³ selon le métal mesuré
CrVI	Phase particulaire : 2m ³ Phase gazeuse : 0,120 m ³	1 µg/m ³
Carbone élémentaire	Phase particulaire : 1 m ³	15 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.

Le protocole de prélèvement a été adapté par l'équipe sur le terrain en fonction du nombre de piquages disponible et de la marche des installations. Des prélèvements séquentiels dont les durées minimales sont reportées dans le tableau suivant seront réalisés.

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	-	3 h
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 réalisées sur a minima 4 h

Les incertitudes élargies de mesures associées à ces prélèvements sont les suivantes.

Incertitudes élargies de mesure

Polluants	Unité	Incertitude élargie k = 2
Débit	% absolu	10
Humidité	% relatif	20
O ₂	%	0,6
CO ₂	% absolu	1,0
CO	mg/m ³	4
NO _x	mg/m ³	23
COVT	mg eqC/m ⁰ ³	2,5
CH ₄	mg eqC/m ⁰ ³	2,5
COVNM	mg eqC/m ⁰ ³	5
HCl	% relatif	15
Métaux	% relatif	35
Mercure	% relatif	35
Poussières	% relatif	C < 5 mg/m ⁰ ³ : 35 5 ≤ C < 10 mg/m ⁰ ³ : 20 C ≥ 10 mg/m ⁰ ³ : 10
HF	% relatif	20
SO ₂	% relatif	15
PCDD/F	% relatif	25
HAP	% relatif	40

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.

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

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 boites en PET de grande contenance à usage unique.

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

Limites de quantification analytique des combustibles

Elément	Technique	Norme	Limite de Quantification
PCI/PCS, carbone , hydrogène	Bombe calorimétrique avec mesure élévation température	NF EN 14918	/
Taux de cendres	Calcination à 815 °C, gravimétrie	ISO 1171	/
Granulométrie	Tamissage avec ou sans destruction des agrégats	NF E N 15149	/
Humidité		EN 14774-1	/
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		
Hg	AFS	Méthode interne	0,2 mg/kg
PCB indicateurs	GC-MSD	Méthode interne	10 µg/kg
PCP	GC MSD	Méthode interne	500 µg/kg
Azote total	Microanalyseur	NF EN 15104	0,1 %
Chlore total	Chromatographie ionique	NF EN 15289	20 mg/kg
Soufre total	ICP-AES	Minéralisation ICP-AES selon NF EN ISO 11185	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-cyclones,
- les cendres des unités de filtration (électrofiltre, filtre à manches).

Les analyses réalisées ont été les suivantes.

Analyse des cendres

Elément	Technique	Norme	Limite de Quantification
Granulométrie et indésirables	Tamissage 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	Calcul		
P ₂ O ₅	ICP-AES	Minéralisation ICP-AES selon NF EN ISO 11185	140 à 458 mg/kg
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	Digestion acide en micro-onde fermé	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
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 alpha, beta, gamma	/	/

Annexe 2 : Synthèses par chaufferie Présentation et résultats détaillés des mesures

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

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



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

www.ademe.fr