

EMISSIONS ATMOSPHERIQUES DES CHAUFFERIES BOIS DE PUISSANCE INFÉRIEURE A 1 MW

Campagnes de mesures sur site
et proposition d'évolution des
facteurs d'émission
Projet ACIBIOQA

RAPPORT

Mai 2023



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Le Groupement composé d'INDDIGO, du CITEPA et de l'Ineris remercie vivement les représentants de l'ADEME qui ont contribué activement à la finalisation de ces livrables par une relecture attentive et constructive : Anne-Laure Dubilly, Isabelle Augeven-Bour et Laurianne Henry.

CITATION DE CE RAPPORT

Florence PAULUS INDDIGO, Marine FICHAU INDDIGO, Gaetan REMOND INDDIGO, Benjamin CUNIASSE Citepa, Benjamin CEA Ineris, Isaline FRABOULET Ineris.2023. Emissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW. Campagnes de mesures sur site et proposition d'évolution des facteurs d'émission. Projet ACIBIOQA. Rapport. 68 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

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 le 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.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 19-03-C0042

Étude réalisée par Inddigo, le Citepa, l'Ineris pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Inddigo
Appel à projet de recherche : CORTEA 2018

Coordination technique - ADEME : DUBILLY Anne-Laure
Direction/Service : Service Forêt Alimentation et Bioéconomie, Direction Productions et Energies Durables

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	5
1. CONTEXTE DU PROJET	6
2. ETAT DE L'ART DES EMISSIONS DES INSTALLATIONS DE COMBUSTION BIOMASSE DE PUISSANCE INFÉRIEURE A 20 MW	8
2.1 Introduction.....	8
2.2 Phases d'arrêt et de démarrage des installations.....	8
2.3 Conclusion	9
3. CONTEXTE REGLEMENTAIRE FRANÇAIS POUR LES EMISSIONS DES CHAUDIERES BIOMASSE 10	
3.1 Pour les installations classées	10
3.2 Pour les installations non classées	11
3.3 Exigences d'écoconception de la Commission Européenne.....	12
3.4 Fonds Chaleur	12
3.5 Plans de protection de l'atmosphère (PPA)	13
3.6 Synthèse.....	13
4. METHODOLOGIE DE CALCUL DES FACTEURS D'EMISSION DANS LES INVENTAIRES NATIONAUX REALISES PAR LE CITEPA	14
5. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES METHODES DE FILTRATION ET REDUCTION DES POLLUANTS	14
5.1 Les technologies de traitement des fumées des chaudières biomasse pour les poussières	14
5.3 Les techniques de réduction des oxydes d'azote (Nox).....	24
5.3 Conclusion	26
6. CAMPAGNE DE MESURES SUR SIX CHAUDIERES BOIS	28
6.1 Echantillonnage des sites.....	28
6.2 Méthodologie pour la réalisation des campagnes de mesures sur site.....	28
6.3 Synthèse des résultats des campagnes de mesures.....	31
7. COMPARAISON DES FACTEURS D'EMISSIONS ISSUES DES MESURES A CEUX UTILISES PAR LE CITEPA	40
7.1 Facteurs d'émission des substances étudiées.....	40
7.2 Facteurs d'émission du monoxyde de carbone (CO).....	40
7.3 Facteurs d'émission des oxydes d'azotes (NO _x)	41
7.4 Facteurs d'émission du dioxyde de soufre (SO ₂)	42
7.5 Facteurs d'émission de l'ammoniac (NH ₃)	43
7.6 Facteurs d'émission des Composés Organiques Volatils (COV)	43
7.7 Facteurs d'émission du méthane (CH ₄).....	44
7.8 Facteurs d'émission des particules	44
7.9 Facteurs d'émission des métaux	49
7.10 Facteurs d'émission des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).....	56
8. EVALUATION DE L'IMPACT DE L'EVOLUTION DES FACTEURS D'EMISSION DES CHAUFFERIES INDUSTRIELLES SUR LES EMISSIONS NATIONALES	59
8.1 Création d'une catégorie de puissance < 1 MW	59
8.2 Impact sur les émissions nationales.....	59
8.3 Conclusion :	61
9. PRECONISATIONS	61
10. CONCLUSION / PERSPECTIVES	62
LISTE DES ANNEXES	64
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	65
SIGLES ET ACRONYMES	67

RÉSUMÉ

Première source d'énergie renouvelable utilisée en France, la filière bois énergie présente plusieurs avantages : ressource abondante et locale, en complémentarité avec le bois-construction, participant à l'entretien et à la résilience de nos forêts et créatrice d'emplois. Mais la combustion du bois émet des polluants et peut, en particulier à certaines périodes de l'année et dans certaines zones géographiques, contribuer de façon significative à la pollution de l'air extérieur.

Ce secteur énergétique est en forte mutation : la réglementation évolue, les combustibles utilisés aussi et les technologies de traitement des émissions progressent. Ainsi, les chaufferies bois de moyenne à grande puissance (supérieure à 1 MW) ont réduit leurs émissions de polluants d'un facteur 10 au cours des quinze dernières années. Mais si les performances accrues de ces installations de puissance supérieure à 1 MW sont bien documentées, ce n'est pas le cas pour les chaufferies bois de puissance inférieure.

Avec la volonté de mieux maîtriser la pollution de l'air extérieur à des échelles infranationales, il est devenu indispensable de mieux connaître aussi le fonctionnement de ces plus petites installations, de préciser la part de leur contribution aux émissions de polluants atmosphériques, et de dégager les pistes d'une réduction de leurs émissions.

Au-delà d'un état de l'art exhaustif et inédit des connaissances des émissions dans cette gamme de puissance de combustion, et d'un examen approfondi de l'adéquation des hypothèses de calculs des facteurs d'émission de ces installations, le présent projet a permis de réaliser des campagnes d'analyses des émissions de six de ces installations, couplées à l'analyse de leurs conditions de fonctionnement.

Si le nombre réduit d'installations auditées ne permet pas de prétendre à une représentativité complète du parc, le spectre élargi des polluants mesurés, les méthodes nouvelles de prélèvement et de mesure et surtout la durée des prélèvements à l'échelle de plusieurs jours ont permis de fournir des données nouvelles et étayées.

Les résultats obtenus ont permis de revoir les valeurs des facteurs d'émissions de ces petites chaufferies, utilisés dans les inventaires nationaux. Ils ont confirmé le caractère incontournable des systèmes de traitement de fumée performants. De plus, ils ont mis en évidence l'impact des phases d'arrêts et de redémarrage des chaudières sur les émissions de polluants, débouchant sur l'élaboration de recommandations. Ces préconisations, à destination de la filière (maîtres d'ouvrages, constructeurs, exploitants, bureaux d'études) ont fait l'objet d'un document séparé.

ABSTRACT

First source of renewable energy used in France, the wood energy sector has several advantages: abundant and local resource, in complementarity with wood-construction, contributing to the maintenance and resilience of our forests and creating jobs. But burning wood emits pollutants and can, particularly at certain times of the year and in certain geographical areas, contribute significantly to outdoor air pollution.

This energy sector is undergoing major changes: regulations are changing, the fuels used are also evolving, and emission treatment technologies are progressing. Thus, medium to high power wood boilers (over 1 MW) have reduced their pollutant emissions by a factor of 10 over the past fifteen years. But if the increased performances of these installations of power higher than 1 MW are well documented, this is not the case for wood boilers of lower capacity.

With the intention to better control outdoor air pollution at sub-national scales, it has become essential to also better understand the operation of these smaller installations, to specify the share of their contribution to atmospheric pollutant emissions, and to identify ways to reduce their emissions.

Beyond an exhaustive and exclusive state of the art of knowledge of emissions in this range of combustion power, and an in-depth examination of the adequacy of the hypotheses for calculating the emission factors of these installations, the project has made it possible to carry out emission analysis campaigns on six of these installations, coupled with the analysis of their operating conditions.

While the small number of facilities audited does not make it possible to claim complete representativeness, the broader spectrum of pollutants measured, the new sampling and measurement methods and above all the duration of sampling over several days have made it possible to provide new and substantial data.

The results made it possible to review the values of the emission factors of these small boiler systems, used in the national inventories. They confirmed the essential nature of high-performance smoke treatment systems. In addition, they highlighted the impact of boiler shutdown and restart phases on pollutant emissions, leading to the development of recommendations. These recommendations, intended for the sector (contracting authority, builders, operators, design offices) have been the subject of a dedicated document.

1. Contexte du projet

Première énergie renouvelable utilisée en France, le bois énergie présente de nombreux avantages : ressource abondante et locale, créatrice d'emplois et stratégique au sein des politiques d'atténuation du changement climatique. Mais la combustion du bois, particulièrement lorsqu'elle est réalisée dans de mauvaises conditions, émet des polluants atmosphériques.

Ces émissions peuvent, à certaines périodes de l'année et dans certaines zones géographiques, contribuer significativement à la pollution de l'air extérieur. Les principaux polluants émis par la combustion de la biomasse sont les particules fines PM₁₀ et PM_{2,5}, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les oxydes d'azote (NOx), les composés organiques volatils et semi-volatils (COV et COSV) ainsi que dans une moindre mesure le dioxyde de soufre (SO₂) et le monoxyde de carbone (CO).

Le secteur des chaufferies collectives utilisant la biomasse est en forte mutation :

- En termes de **réglementation**, avec l'évolution des rubriques ICPE 2910 en lien avec la transcription des directives MCP (medium combustion plants) et IED (directive relative aux émissions industrielles), création récente des sous-rubriques 2910 B1 et B2 ;
- En termes de technologie de **traitement des émissions** avec la systématisation des systèmes d'électrofiltres ou de filtres à manches sur les projets neufs, renouvellement des installations existantes, développement des installations avec condensation des fumées ;
- En termes de **combustibles utilisés**, avec le recours à des combustibles biomasse issus de déchets (SSD emballages bois en fin de vie, déchets de bois de l'ameublement, déchets de bois du secteur de la construction en lien avec les travaux du Comité Stratégique de Filière, fraction biogénique des CSR), mais aussi agro pellets et pellets torréfiés ;
- En termes de **taille d'installation** (projet de grande taille pour des chaufferies¹ centralisées sur réseau de chaleur, mais également grappes de projets de plus petites tailles financées par des dispositifs dédiés).

Le présent projet de recherche ACIBIOQA est lauréat de l'appel à projet de recherche CORTEA de l'ADEME, il a été coordonné par Inddigo et réalisé en partenariat avec

- l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris) est l'acteur public national de référence en termes de caractérisation des émissions atmosphériques industrielles et de modélisation de la qualité de l'air ;
- le Citepa (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique): cette association loi de 1901 sans but lucratif est notamment en charge, comme opérateur d'Etat, de la réalisation des inventaires d'émissions de polluants et gaz à effet de serre nationaux pour le compte du ministère de la Transition écologique.

Il a pour objectif de permettre aux acteurs de la filière bois énergie de mieux comprendre le lien entre les choix de conception, le suivi des performances en phase exploitation et les émissions de polluants atmosphériques afin de limiter ces dernières, et aux autorités en charge de la planification énergétique de mieux quantifier les émissions de polluants.

Plusieurs campagnes de mesures ayant été menées antérieurement sur des chaudières de taille importante (> 5 MW), le projet ACIBIOQA permet une meilleure caractérisation des émissions de polluants des chaudières biomasse collectives de petite puissance. Il s'est concentré sur des chaudières de puissance inférieure à 20 MW, dont la plupart font moins de 1 MW.

Les résultats du projet ont permis :

- L'amélioration des connaissances concernant les émissions de polluants atmosphériques de ces installations ;

¹Précision dans la nomenclature « chaudière » versus « chaufferie » : une chaufferie est un local technique abritant les équipements destinés à assurer le bon fonctionnement de la production de chaleur. Une chaufferie peut contenir plusieurs chaudières et sa puissance se calcule à partir des puissances unitaires de ses chaudières.

- La proposition de mise à jour des facteurs d'émissions nationaux des chaudières collectives inférieures à 20 MW utilisant la biomasse ;

Il constitue un approfondissement des travaux engagés par l'ADEME, le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (Citepa), la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et la profession (interprofession du bois, Bureau d'études, exploitants) sur l'évolution des facteurs d'émissions des installations de combustion biomasse inférieures à 1 MW.

Le rapport comprend six chapitres rédigés à partir des travaux du projet ACIBIOQA :

- La conclusion d'un état de l'art des émissions des installations inférieures à 20 MW. L'état de l'art détaillé et les tableaux de synthèse sont dans le rapport annexe en partie 1 ;
- Une présentation du contexte réglementaire concernant les émissions pour les chaufferies bois ;
- La présentation succincte de la méthodologie de calcul des facteurs d'émission utilisée dans les inventaires nationaux. Une présentation plus complète est consultable dans le rapport annexe en partie 2 ;
- Le retour d'entretien ciblés avec des constructeurs de chaudières bois, des fabricants systèmes de filtration des poussières et avec des exploitants pour bien comprendre les pratiques sur site ;
- L'analyse des mesures réalisées sur les 6 chaudières retenues dans le projet. Sont dans le rapport annexe en partie 4, le descriptif technique des chaudières étudiées et en partie 3 le calendrier des campagnes d'essais ;
- La calcul des facteurs d'émission correspondant à ces résultats et la comparaison avec ceux utilisés par le Citepa ce qui a permis de faire une proposition d'évolution de ces facteurs ;
- L'impact de l'évolution de ces facteurs d'émission sur les inventaires nationaux.

2. Etat de l'art des émissions des installations de combustion biomasse de puissance inférieure à 20 MW

2.1 Introduction

Cette synthèse bibliographique s'appuie notamment sur les études publiées par l'ADEME mais également d'autres études réalisées à l'international, en particulier les pays dans lesquels la biomasse est très utilisée. Elle s'attache à identifier les pratiques et méthodes mises en œuvre par les autres pays de l'UE dans le cadre des inventaires nationaux d'émissions de polluants atmosphériques.

Cette étude bibliographique s'applique à compiler les connaissances des émissions des installations de combustion par gammes de puissance ([250 kW - 1 MW] et supérieures à 1 MW) selon la nature des combustibles utilisés (plaquettes forestières, granulés, bois SSD (Sortie de Statut de Déchets), déchets de bois et déchets verts) et la nature des moyens de traitement de fumée utilisés, en incluant notamment les émissions :

- de monoxyde de carbone (CO) ;
- de dioxydes d'azotes (NO_x) ;
- de dioxyde de soufre (SO₂) ;
- de composés organiques volatils totaux (COVT) et de méthane (CH₄) ;
- d'ammoniac (NH₃) ;
- des poussières totales (TSP) et PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ ainsi que le « carbone suie » (Black Carbon, BC) en distinguant la part condensable de ces aérosols ;
- de métaux lourds ;
- de HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) ;
- de dioxines.

Son périmètre permet également de connaître l'état de l'art des émissions vis-à-vis de régimes spécifiques comme les phases d'arrêt et de démarrage des installations.

Ces recherches ont permis d'identifier des gammes de facteurs d'émission selon ces paramètres, qui ont servi de référence à la comparaison avec les résultats qui ont été obtenus dans le cadre de cette étude.

2.2 Phases d'arrêt et de démarrage des installations

Le processus de combustion du bois est une série complexe de réactions chimiques se terminant par l'oxydation du carbone et de l'hydrogène contenus dans les composants du bois, avec dissipation d'énergie sous forme de chaleur.

Ce processus comprend trois phases distinctes : le séchage (ou phase de démarrage), la pyrolyse (ou phase stationnaire) et la phase de fin de combustion (ou phase de burnout) :

1. La première phase (séchage) se caractérise par l'évaporation de l'eau contenue dans le bois sous forme de vapeur, dans un procédé endothermique à température constante ;
2. Au cours de la deuxième phase (pyrolyse), par suite d'une augmentation de température du bois, les différents composants du bois se séparent et passent lentement à l'état gazeux pendant que le bois commence à se consumer sous l'effet de la chaleur ;
3. Finalement, la troisième et dernière phase (burnout) comprend l'oxydation du carbone contenu dans le bois à haute température.

La littérature scientifique fournit peu de données concernant la variabilité des émissions d'une phase à l'autre. Sauf exceptions, les facteurs d'émission présentés dans ce rapport ne prennent pas en compte les phases d'arrêt ou de démarrage des installations. Au regard des études proposant une analyse de ces variations vis-à-vis des différentes phases, les principaux composés affectés étudiés sont les particules et le monoxyde de carbone. L'analyse complète de ces travaux peut être consultée dans la partie 1 du rapport annexe.

Bien que la littérature fournisse peu d'études s'intéressant à la variabilité des émissions lors des changements de phase du processus de combustion, des tendances fortes peuvent être distinguées pour certains polluants. En effet les émissions de CO peuvent être accrues au-delà d'un facteur dix lors de ces phases et on observe un décalage de la distribution granulométrique en nombre des émissions

de particules vers des diamètres plus larges au démarrage et plus fins lors de la fin du processus de combustion.

2.3 Conclusion

Les résultats de cette recherche sont détaillés dans le rapport annexe 1 du rapport.

Cette recherche bibliographique permet de présenter les gammes de facteurs d'émissions des chaudières biomasse de puissance comprise entre 250 kW et 20 MW pour une large diversité de polluants. Elle repose sur une cinquantaine d'articles scientifiques ou de rapports identifiés comme pertinents par rapport au périmètre. Ces études proviennent aussi bien de sources françaises que de sources étrangères.

Malgré un nombre parfois limité d'études identifiées pour tel ou tel polluant, une très grande diversité de résultats a pu être observée. Dans la littérature scientifique, le sujet de la combustion résidentielle de biomasse, portant sur des puissances plus faibles et sur des typologies d'appareils complètement différentes est beaucoup plus étudié car généralement source d'émissions plus importantes que de gammes de puissance plus élevées.

La grande hétérogénéité des cas observés est responsable de l'étalement sur plusieurs ordres de grandeurs des facteurs d'émission observés pour l'ensemble des polluants.

La diversité des combustibles utilisés, leur composition et leur taux d'humidité, la nature des méthodes d'échantillonnage et de mesure des polluants, la présence et la nature de système de traitement de fumée sont autant de paramètres qui varient d'une étude à l'autre et dont il est difficile d'identifier précisément l'impact. La manière dont les résultats sont présentés (directement sous forme de facteurs d'émission ou sous forme de concentrations nécessitant une conversion) est également une source d'incertitudes qui complexifie les comparaisons entre les différents résultats.

Il a malgré tout été possible de distinguer clairement l'impact des différents systèmes de traitement de fumée sur le niveau d'émission de certains polluants (TSP, PM₁₀, PM₁ et BC).

Les études portant sur la part des condensables dans les émissions de poussières suggèrent que celle-ci est bien moins importante que ce qui est observé par ailleurs dans la combustion de biomasse résidentielle, en cohérence avec la meilleure qualité de combustion.

Très peu d'articles étudient les phases d'arrêt et de démarrage de ce type d'installation et elles indiquent des niveaux d'émissions plus élevés pendant ces phases-là (TSP et CO).

Les gammes de facteurs d'émission sont récapitulées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** :

Polluants	Unité	Gamme de puissance	Gamme de facteurs d'émission	Nombre de mesures
CO	g/GJ	[250 kW - 1 MW]	[21 - 4 425]	24
		[1 - 20] MW	[0,01 - 7 360]	50
TSP		[250 kW - 1 MW]	[4,7 - 389]	29
		[1 - 20] MW	[0,02 - 1520]	68
PM ₁₀		[250 kW - 1 MW]	[4,3 - 96]	5
		[1 - 20] MW	[0,4 - 108]	14
PM _{2,5}		[250 kW - 1 MW]	[3,6 - 26]	2
		[1 - 20] MW	[0,4 - 8]	8
PM _{1,0}		[250 kW - 1 MW]	[1,4 - 33]	10
		[1 - 20] MW	[0,1 - 264]	27
BC		[250 kW - 1 MW]	[50 - 3 600]	10
		[1 - 20] MW	[0,1 - 8 500]	30
NO _x		[250 kW - 1 MW]	[22 - 340]	30
		[1 - 20] MW	[17 - 164]	58
SO ₂	[250 kW - 1 MW]	[0,44 - 25]	11	
	[1 - 20] MW	[0,004 - 63]	26	
NH ₃	[250 kW - 1 MW]	NA	NA	
	[1 - 20] MW	[0,01 - 6]	21	
COV	[250 kW - 1 MW]	[0,15 - 1,4]	3	
	[1 - 20] MW	[0,01 - 492]	28	

CH ₄		[250 kW - 1 MW]	[0,1 - 2]	6
		[1 - 20] MW	[0,01 - 387]	26
HAP8	mg/GJ	[250 kW - 1 MW]	[0,1 - 85]	3
		[1 - 20] MW	[0,01 - 8]	12
PCDD/F	ng/GJ	[250 kW - 1 MW]	[3,5 - 9 770]	21
		[1 - 20] MW	[1 - 6 550]	25

Tableau 1 : Récapitulatif des gammes de facteurs d'émission par puissance et par polluant

3. Contexte réglementaire français pour les émissions des chaudières biomasse

3.1 Pour les installations classées

La réglementation des installations classées pour l'environnement (ICPE) impose des valeurs limites d'émissions pour les installations de combustion.

La directive européenne MCP (Medium Combustion Plants) du 25 novembre 2015 relative à la limitation des émissions de certains polluants dans l'atmosphère en provenance des installations de combustion moyenne vient compléter la réglementation ICPE.

La directive vise spécifiquement les installations ayant une puissance thermique nominale comprise entre 1 MW et 50 MW.

Elle est entrée en vigueur le 20 décembre 2018, à la suite de sa transposition dans l'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à déclaration au titre de la rubrique 2910.

Le seuil ICPE est donc abaissé à 1 MW, contre 2 MW jusqu'alors.

Les textes applicables sont les suivants :

- Décret n° 2018-704 du 3 août 2018 modifiant la nomenclature des installations classées et certaines dispositions du code de l'environnement.
- L'arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration au titre de la rubrique 2910. Il s'applique aux installations de combustion de puissance nominale totale supérieure ou égale à 1 MW et inférieure à 20 MW relevant de la rubrique 2910-A, à l'exclusion des installations utilisant le biogaz comme combustible.
- Arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de rubrique 2910 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement. Il s'applique aux installations de combustion de puissance nominale totale supérieure ou égale à 20 MW et inférieure à 50 MW relevant de la rubrique 2910-A et aux installations de combustion de puissance nominale totale supérieure ou égale à 1 MW et inférieure à 50 MW relevant de la rubrique 2910-B1.
- Arrêté du 3 août 2018 relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale inférieure à 50 MW soumises à autorisation au titre des rubriques 2910, 2931 ou 3110.
- L'arrêté du 3 août 2018 relatif aux installations de combustion d'une puissance thermique nominale totale supérieure ou égale à 50 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 3110.

Sont exclues de la directive MCP : les installations CSR (ICPE 2911) et les (co-)incinération (2770/2771), ainsi que les chaufferies n'ayant aucun appareil de combustion faisant au moins 1 MW de puissance unitaire.

La nomenclature est alors modifiée comme suit par les nouveaux textes :

Puissances	Rubriques			
	2910-A (Combustibles commerciaux + biomasse propre + biogaz issu d'installations 2781-1)	B1 (Biomasse déchets)	B2 (Autres produits)	3110 Tous combustibles
50 MW ≤ P				A
20 ≤ P < 50 MW	E	E	A	
1 ≤ P < 20 MW	DC			
0,1 ≤ P < 1 MW				
P < 0,1 MW				

Case en noir = non concerné par la rubrique

A noter qu'une installation de combustion faisant plus de 50 MW en puissance installée, mais qui par la déduction des appareils de combustion de moins de 15 MW de puissance unitaire conduirait alors à une puissance strictement inférieure à 50 MW, relève alors de l'arrêté ministériel autorisation du 3 août 2018.

Figure 1 : Nomenclature ICPE pour les chaufferies (Source FNCCR) : DC déclaration, E enregistrement, A autorisation

Une évolution des valeurs limites d'émission (VLE) a par ailleurs été mise en place, notamment sur les NOx et les poussières.

Pour les installations existantes mises en service avant le 20 janvier 2018, les VLE applicables devront être respectées à partir du :

- 1 janvier 2030 pour les installations de puissance inférieure à 5 MW ;
- 1 janvier 2025 pour les installations de puissance supérieure ou égale à 5 MW.

Les VLE s'appliquent sur les appareils de combustion fonctionnant à minima 500 heures par an. Elles ne s'appliquent pas aux appareils de secours.

Biomasse - 6 % d'O ₂		SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Poussières (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)
Arrêté du 3 août 2018 - Installation rubrique ICPE 2910 (enregistrement) 1 MW ≤ P < 50 MW (Chapitre 6.2.4 II de l'arrêté)	1 ≤ P < 5 MW	200	300	50	250
	5 MW ≤ P < 10 MW			30	
	10 MW ≤ P < 20 MW			20	
	20 MW ≤ P < 50 MW			200	
Arrêté du 3 août 2018 - Installation rubrique ICPE 3110 (autorisation) P ≥ 50 MW (Chapitre II, article 10 I de l'arrêté)	50 ≤ P < 100	200	250	20	200
	100 ≤ P < 300	200	200		150
	P ≥ 300	150	150		150

Tableau 2 : Synthèse des exigences réglementaires sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse soumises à la rubrique ICPE 2910

3.2 Pour les installations non classées

Cela concerne en général les chaufferies de moins de 1 MW. Pour cette gamme de puissance il existe deux arrêtés qui encadre les valeurs limites d'émissions :

- l'arrêté du 15 septembre 2009 relatif à l'entretien annuel des chaudières et qui concerne les équipements entre 4 kW et 400 kW ;
- l'arrêté du 2 octobre 2009 relatif au contrôle des chaudières et qui concerne les chaudières entre 400 kW et 20 MW.

Concernant les chaudières biomasse, le premier arrêté limite les émissions de poussières à 80 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ et le deuxième à 225 mg/Nm³ à 6 % d'O₂. Il n'y a pas de contrôle des émissions de poussières, qui nécessitent des prélèvements spécifiques.

Etant donné que les chaudières en dessous de 400 kW, ne sont généralement pas équipées de système de filtration des poussières, l'exigence de 80 mg/m³ à 6 % d'O₂ semble irréaliste. L'arrêté correspondant n'imposant aucun contrôle, cette valeur ne semble utilisée que pour le dimensionnement des équipements de filtration chez les constructeurs.

Biomasse - 6 % d'O ₂		SO ₂ (mg/Nm ³)	NOx (mg/Nm ³)	Poussières (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	COV (mg/Nm ³)
Arrêté du 15 septembre 2009 - Entretien annuel des chaudières 4 kW ≤ P < 400 kW (Annexe 3 tableau 7 de l'arrêté)	Granulé	-	-	30 (10% d'O ₂) soit 41 (6% d'O ₂)	-	10 (10% d'O ₂) soit 13 (6% d'O ₂)
	Plaquette	-	-	60 (10% d'O ₂) soit 80 (6% d'O ₂)	-	-
Arrêté du 2 octobre 2009 - Contrôle des chaudières 400 kW ≤ P < 20 MW (Chapitre 2.2 de l'arrêté)	400 kW ≤ P < 20 MW	-	500 (11% d'O ₂) soit 750 (6% d'O ₂)	150 (11% d'O ₂) soit 225 (6% d'O ₂)	-	-

Tableau 3 : Synthèse des exigences réglementaires sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse non soumises à la rubrique ICPE 2910A

3.3 Exigences d'écoconception de la Commission Européenne

Cette réglementation concerne les chaudières de moins de 500 kW utilisant de la biomasse ligneuse. Elle impose des limites d'émissions sur les NOx, les poussières, le CO et les COV ainsi que des exigences en matière d'information sur les produits (non détaillées ici).

Sont exclues de cette réglementation les chaudières produisant de la chaleur uniquement pour fournir de l'eau chaude sanitaire ou pour faire circuler des gaz, et les chaudières à cogénération de puissance supérieure à 50 kW.

Biomasse - 6 % d'O ₂		SO ₂ (mg/Nm ³)	NOx (mg/Nm ³)	Poussières (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	COV (mg/Nm ³)
Règlement (UE) 2015/1189 de la Commission - 28 avril 2015 P ≤ 500 kW (Annexe II.1)	Alimentation automatique	-	200 (10% d'O ₂) soit 300 (6% d'O ₂)	40 (10% d'O ₂) soit 60 (6% d'O ₂)	500 (10% d'O ₂) soit 750 (6% d'O ₂)	20 (10% d'O ₂) soit 30 (6% d'O ₂)
	Alimentation manuelle	-	-	60 (10% d'O ₂) soit 90 (6% d'O ₂)	700 (10% d'O ₂) soit 1050 (6% d'O ₂)	30 (10% d'O ₂) soit 45 (6% d'O ₂)

Tableau 4 : Synthèse des exigences d'écoconception de l'UE sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse

3.4 Fonds Chaleur

Le Fonds Chaleur biomasse concerne les projets de production supérieure à 1200 MWh/an (400-600 kW). Pour les projets plus petits, les subventions sont les contrats de chaleur territoriaux. Le Fonds Chaleur exige une conformité à la réglementation qui débute à 1 MW. Pour les chaudières entre 500 kW et 1MW, le Fonds Chaleur impose

- Pour les poussières : 50 mg/Nm³ à 6 % O₂,
- Pour les Nox : 500 mg/Nm³ à 6 % O₂,
- Pour le CO : 250 mg/Nm³ à 6 % O₂.

3.5 Plans de protection de l'atmosphère (PPA)

En France, certains territoires sont couverts par des PPA, qui définissent localement des objectifs et mesures réglementaires pour ramener les concentrations en polluants atmosphériques à un niveau inférieur aux valeurs limites réglementaires. Il s'applique aux agglomérations de plus de 250 000 habitants et aux zones dans lesquelles les valeurs limites de qualité de l'air ne sont pas respectées. Parmi les principales sources de pollution, il est identifié entre autres la combustion de la biomasse. Des mesures supplémentaires peuvent alors apparaître dans ces zones, par exemple sur le chauffage domestique, l'obligation² de recours à des équipements labellisés Flamme Verte³ ou équivalent, ou l'abaissement des VLE locales⁴.

3.6 Synthèse

En dessous de 1 MW, il n'y a pas de contrôle même si des arrêtés fixent des limites d'émission pour les poussières et les COV.

Entre 1 MW et 5 MW, le seuil à ne pas dépasser de 50 mg/Nm³ de poussières à 6 % d'O₂ est de rigueur pour les nouveaux projets et peut descendre à 20 mg pour les projets supérieurs à 20 MW.

Pour les projets inférieurs à 1 MW et qui sont subventionnés par le Fonds Chaleur (> 1200 MWh/an), l'imposition vient uniquement de l'ADEME qui demande un seuil maximal de 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂.

Biomasse - 6 % d'O ₂		SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	Poussières (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	COV (mg/Nm ³)
Arrêté du 15 septembre 2009 - Entretien annuel des chaudières 4 kW ≤ P < 400 kW (Annexe 3 tableau 7 de l'arrêté)	Granulé	-	-	30 (10% d'O ₂) soit 41 (6% d'O ₂)	-	10 (10% d'O ₂)
	Plaquette	-	-	60 (10% d'O ₂) soit 80 (6% d'O ₂)	-	soit 13 (6% d'O ₂)
Arrêté du 2 octobre 2009 - Contrôle des chaudières 400 kW ≤ P < 20 MW (Chapitre 2.2 de l'arrêté)	400 kW ≤ P < 20 MW	-	500 (11% d'O ₂) soit 750 (6% d'O ₂)	150 (11% d'O ₂) soit 225 (6% d'O ₂)	-	-
Arrêté du 3 août 2018 - Installation rubrique ICPE 2910 (déclaration) 1 MW ≤ P < 20 MW (Chapitre 6.2.4 II de l'arrêté)	1 ≤ P < 5 MW	200	300	50	250	-
	5 MW ≤ P < 10 MW			30		
	10 MW ≤ P < 20 MW			30		
Arrêté du 3 août 2018 - Installation rubrique ICPE 2910 (enregistrement) 1 MW ≤ P < 50 MW (Chapitre 6.2.4 II de l'arrêté)	1 ≤ P < 5 MW	200	500	50	250	-
	5 MW ≤ P < 10 MW		300	30		
	10 MW ≤ P < 20 MW			20		
	20 MW ≤ P < 50 MW			200		
Arrêté du 3 août 2018 - Installation rubrique ICPE 3110 (autorisation) P ≥ 50 MW (Chapitre II, article 10) de l'arrêté)	50 ≤ P < 100	200		250	20	200
	100 ≤ P < 300	200	200	150		-
	P ≥ 300	150	150	150		-
Règlement (UE) 2015/1189 de la Commission - 28 avril 2015 P ≤ 500 kW (Annexe II.1)	Alimentation automatique	-	200 (10% d'O ₂) soit 300 (6% d'O ₂)	40 (10% d'O ₂) soit 60 (6% d'O ₂)	500 (10% d'O ₂) soit 750 (6% d'O ₂)	20 (10% d'O ₂) soit 30 (6% d'O ₂)
	Alimentation manuelle	-		60 (10% d'O ₂) soit 90 (6% d'O ₂)	700 (10% d'O ₂) soit 1050 (6% d'O ₂)	30 (10% d'O ₂) soit 45 (6% d'O ₂)
Fonds chaleur		-	500 ou 300	75		

Tableau 5 : Synthèse des exigences réglementaires sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse

² PPA de la Vallée de l'ARVE : sur le territoire du Plan de Protection de l'Atmosphère, toutes les nouvelles installations de chauffage au bois doivent respecter le label Flamme Verte). En cas de vente d'un bien immobilier, le vendeur doit justifier du respect des valeurs d'émissions imposées par le label. Si son système de chauffage est plus polluant, il a l'obligation de le mettre en conformité dans un délai d'un an après l'acte de vente.

³ <https://www.flammeverte.org/decouvrir-flamme-verte/pourquoi-label-qualite.html>

⁴ PPA Ile de France : http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2018-arrete_ppa3_vsigne.pdf

4. Méthodologie de calcul des facteurs d'émission dans les inventaires nationaux réalisés par le Citepa

La partie portant sur les méthodologies d'estimations des émissions dans les inventaires nationaux en général et plus spécifiquement celle utilisée dans les inventaires nationaux français pour les secteurs (agricole, industrie, tertiaire et chauffage urbain) comprenant des installations de combustion biomasse de puissance inférieure à 20MW est présentée en en partie 2 du rapport annexe

5. Retour d'expérience sur les méthodes de filtration et réduction des polluants

Le projet a permis de faire des entretiens ciblés en vue de mieux connaître les pratiques sur site concernant les moyens de filtrations des poussières et autres technologies de réduction des polluants.

Cette analyse a été principalement construite sur la base de quatorze entretiens. Certains fournisseurs de systèmes de filtration fournissent à la fois des filtres à manche (FAM), des électrofiltres (ESP) et des cyclones.

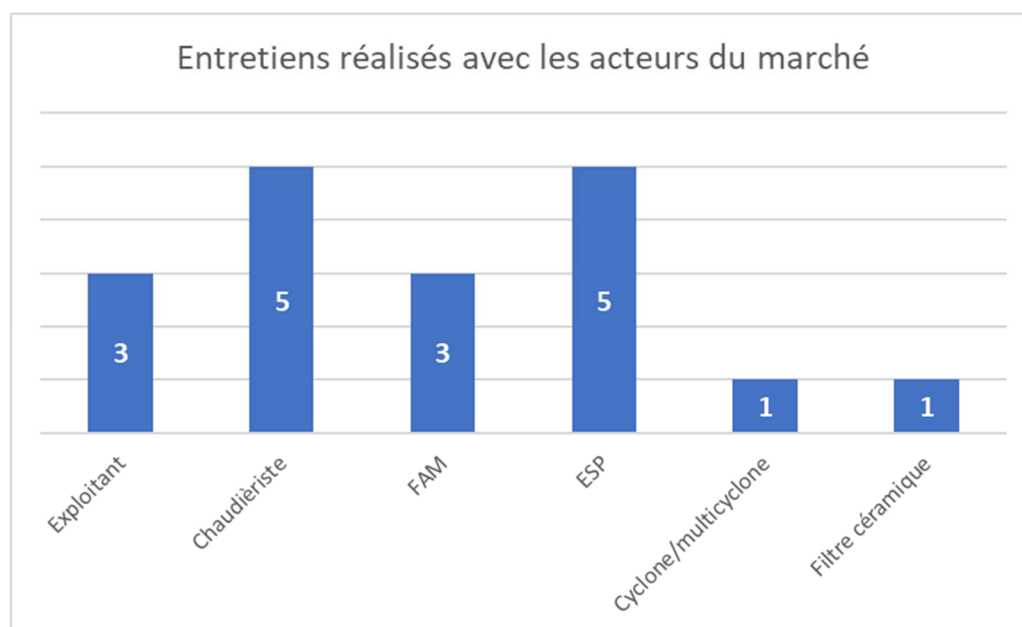


Figure 2 : Entretiens réalisés et technologies

5.1 Les technologies de traitement des fumées des chaudières biomasse pour les poussières

Les deux technologies principales de filtration de poussières dans le domaine de la combustion biomasse sont les filtres à manches (FAM) et les électrofiltres (ESP) mais d'autres technologies se développent : les filtres céramiques, le condenseur laveur et les électrofiltres intégrés aux chaudières. Ces différentes technologies seront détaillées.

Une préfiltration est souvent réalisée par un multicyclone, qui assure un dépoussiérage mécanique grossier.

Le schéma ci-dessous (Figure 3) présente le principe d'installation de combustion biomasse et de filtration des fumées souvent appliqué.

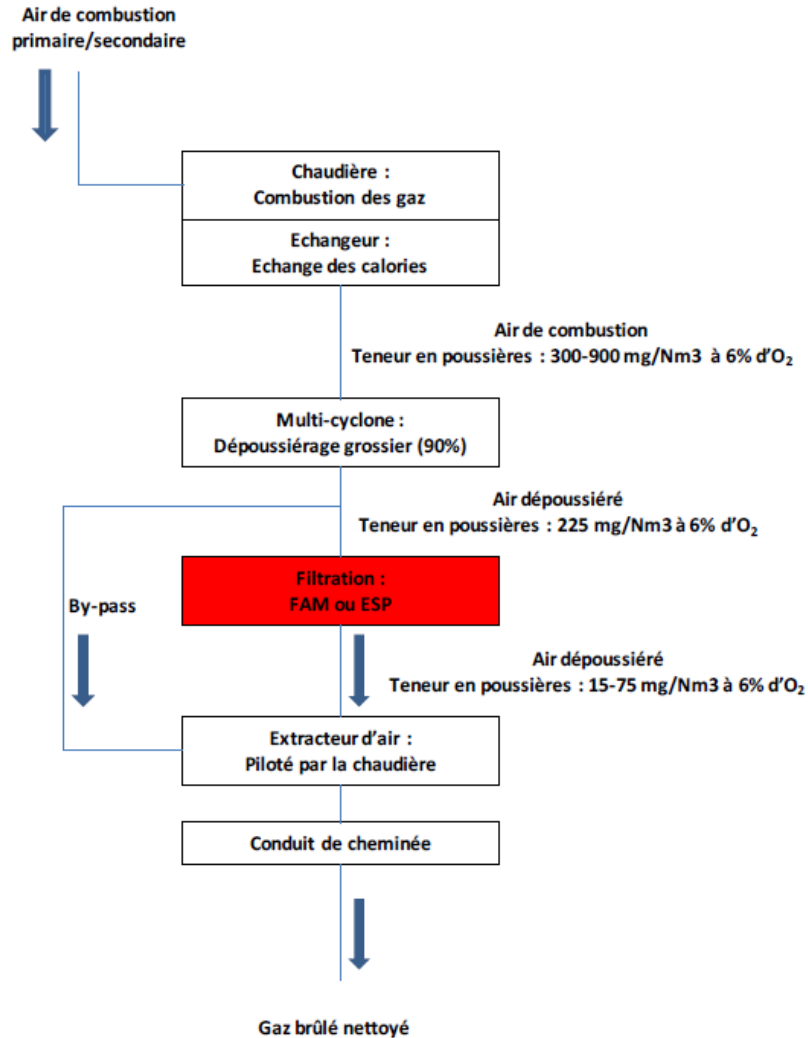


Figure 3 : Principe de cheminement des fumées en installation de combustion biomasse (Source INDDIGO)

5.2.1 5.1.1 Pré-filtration par cyclone ou multicyclone

Principe fonctionnel

Le multicyclone (MC) est basé sur le principe de la force centrifuge pour capter les poussières. C'est un caisson étanche, dans lequel sont disposés plusieurs cyclones de faible diamètre (Figure 4).

Les fumées pénètrent le filtre de manière tangentielle et sont soumises à un mouvement rotatif. Sous l'effet de la force centrifuge, les poussières ou particules sont projetées sur les parois et tombent en partie basse du système.

Plus le diamètre des cyclones est faible, plus l'accélération des particules est importante, et meilleure est l'efficacité du système.

Dans la majorité des cas, le MC est intégré à la chaudière.

L'installation d'un MC sur toutes les chaudières est conseillée, afin d'assurer une préfiltration.

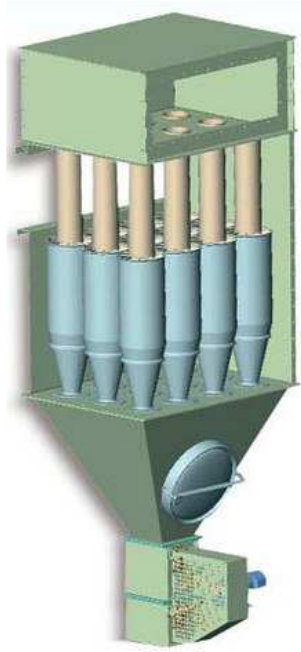


Figure 4 : Multicyclone (source AIRLIS)

Efficacité de filtration

Le MC ne permet pas de séparer les particules les plus fines ($< 2 \mu\text{m}$) et est très efficace à partir de $20 \mu\text{m}$ (95 %). Il apporte son intérêt sur les particules non volatiles (PM > 100 , cendre, souvent éjectée en extérieur si pas de MC) et complète donc bien une filtration par FAM ou ESP.

En sortie du MC, selon la qualité de la combustion, les émissions sont situées entre 100 et 250 mg/Nm^3 à 6 % d'O₂. Il est à noter que cette valeur varie aussi en fonction de la qualité du combustible. Il a déjà été mesuré des émissions faibles entre 50 et 75 mg/Nm^3 pour des plaquettes forestières bien calibrées (très peu de fines) et de bonnes conditions de combustion, ainsi que des émissions plus élevées allant jusqu'à 450 mg/Nm^3 avec du bois de qualité médiocre et contenant beaucoup de fines ou dans des conditions de combustion dégradées.

Le MC constitue un bon système de pré-dépoussiérage des fumées en amont d'un FAM/ESP, est relativement peu encombrant mais sa performance demeure faible sur les fines particules ; de plus il est moins performant à faible charge (vitesse des fumées moindre et donc effet cyclonique plus faible).

Bien que la présence du MC en amont d'un FAM ou d'un ESP ne soit pas systématique, cela semble améliorer les performances et a un impact sur les risques d'exploitation (notamment risque d'incendie).

MC devant FAM	MC devant ESP
Efficace pour dépoussiérer grossièrement et capter les particules lourdes incandescentes (limitation du risque d'incendie)	Permet d'améliorer l'efficacité de l'ESP et de limiter sa taille.
	Permet de retenir les grosses particules, ainsi les fumées entrant dans le filtre seront bien mieux ionisées et retenues. Un électrofiltre quel qu'il soit n'est efficace que pour traiter les particules fines.

Tableau 6 : Intérêt du maintien d'un multicyclone devant un FAM ou un ESP

5.2.2 5.1.2 Électrofiltre

Principe fonctionnel

L'électrofiltre (ESP) repose sur un principe de dépeussierage par séparation électrique. Les particules des fumées sont extraites par l'utilisation d'un champ électrique. Ce champ est formé par des plaques, entre lesquelles passent les fumées (Figure 5).

L'ESP est compartimenté par ces plaques, espacées dans le sens d'écoulement de la fumée.

Le champ électrique exerce une force qui envoie les poussières sur les plaques réceptrices. Les poussières tombent, pour la plupart, directement dans la trémie ; elles sont ensuite évacuées par une vis sans fin. Celles qui restent adhérentes aux plaques sont périodiquement décollées soit par frappe, soit par nettoyage des éléments par lavage à l'eau.

Le procédé nécessite la mise en place d'un transformateur haute tension.

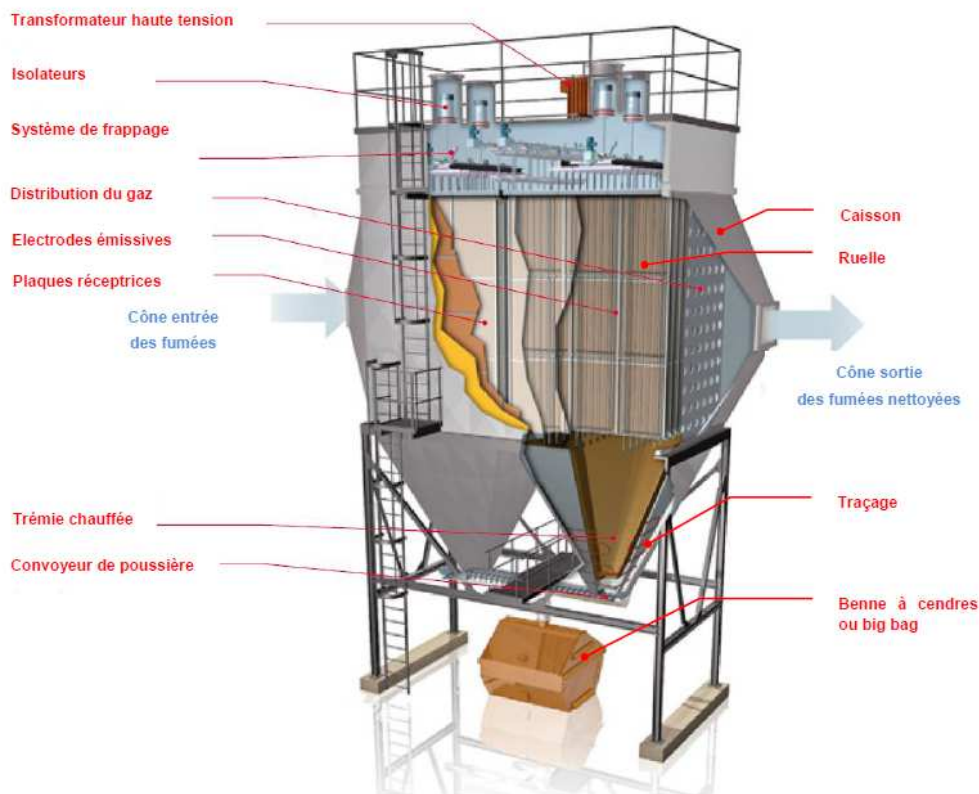


Figure 5 : Schéma de principe d'un électrofiltre (Source R&R BETH)

L'ESP peut être installé en intérieur ou en extérieur. Dans le cas d'une installation extérieure, il faut être vigilant au bruit généré (dû au frappe) et au risque d'apparition de condensation.

L'ESP est assez encombrant, avec souvent des hauteurs importantes, car un grand volume est nécessaire pour limiter les vitesses de passage. Cette taille peut être réduite par la mise en place d'un multicyclone en amont.

L'ESP ne requiert pas d'entretien lourd. Il faut réaliser un entretien annuel par une personne qualifiée (constructeur ou exploitant) et une surveillance régulière du fonctionnement.

Des électrofiltres tubulaires sont aussi développés, plutôt pour des installations de moyenne puissance (1,5 à 2 MW). Ils sont plus compacts que ceux à plaques.

Efficacité de filtration

L'efficacité est en moyenne de 95 % pour les particules entre quelques microns et moins de 100 μm , d'où l'intérêt du couplage avec un multicyclone pour les particules plus grosses.

Les entretiens montrent que les concentrations atteintes en sortie de ces systèmes sont en moyenne entre 20 et 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ mais qu'il est possible de descendre en dessous de 20 mg/Nm³ avec un surdimensionnement de l'ESP (augmentation du nombre de champs).

Retours terrain

Avantages

L'électrofiltre est plébiscité pour sa facilité d'usage car il nécessite très peu de maintenance (un ramonage par an) et il n'y a pas de pièces à changer. Il est robuste et peut travailler sur une gamme de température plus large, ce qui permet de le coupler à des processus spécifiques (vapeur). Il engendre des pertes de charges modérées (au regard du FAM). Il serait aussi plus réactif, dans le cas de processus avec stand-by/redémarrage pour assurer les phases de redémarrage.

Inconvénients

Contrairement à un FAM (cf 5.2.3), l'efficacité de l'ESP dépend des caractéristiques des poussières en entrée (granulométrie, résistivité, concentration).

Il présente un fort encombrement (plus qu'un FAM) et est peu modulaire ce qui le rend difficilement adaptable aux installations de faibles/moyennes puissances (1-2 MW). Il occasionne des nuisances sonores importantes (frappage des électrodes collectrices pour décolmatage) qui peuvent déranger les riverains si l'ESP est installé en extérieur. Il nécessite d'avoir impérativement du personnel avec une habilitation HT pour intervenir dans le filtre.

Il serait moins adapté pour de l'agro combustible (paille par exemple) qui générerait un problème de polarisation des particules.

Plusieurs acteurs de terrain indiquent que la technologie serait plus chère que le FAM pour une moins bonne performance et qu'elle n'a pas de possibilité d'évolutivité (pour répondre à l'abaissement des VLE par exemple).

Problèmes en phase exploitation

Les problématiques récurrentes sont :

- **Incendie** : en cas d'incendie, celui-ci est généré par une dérive de la combustion provoquant une formation importante d'imbrûlés dans les fumées. Leur accumulation peut causer un court-circuit entre les électrodes de l'ESP, entraînant un échauffement du transformateur et une fuite d'huile sur l'ESP. L'inflammation de l'huile sur les parois de l'ESP peut créer un sinistre important.
 - ⇒ Cette problématique peut être évitée en ayant un bon contrôle de la qualité du bois (ne pas laisser les fournisseurs dériver sur l'humidité du bois livré pour maintenir les bons paramètres de combustion). Dans le cas d'utilisation de biomasse beaucoup plus humide que les livraisons habituelles, les paramètres de combustion doivent être modifiés pour éviter la formation d'imbrûlés.
- **Condensation** : lorsque le bois est trop humide et que la température des fumées baisse, surtout quand le filtre est en extérieur, l'humidité dans le filtre devient trop importante et peut engendrer des dépôts de poussières sur les isolateurs qui peuvent être détériorés.
 - ⇒ Un traçage des zones froides du filtre est nécessaire pour éviter toute condensation. Améliorer la qualité et le contrôle qualité du combustible, assurer une bonne ventilation autour du surchauffeur, envoyer de l'air chaud dans la partie supérieure haute tension pour éviter la condensation et les dépôts de poussières, sont également de bonnes pratiques.
- **Colmatage** : Des soucis de colmatage ont été observés, avec une diminution des performances et la création d'arcs électriques, rendant l'électrofiltre inopérant. Le problème pouvait être dû à un nettoyage pas assez fréquent, ou un problème de réglage du by-pass.

Dans une moindre mesure :

- **Corrosion** : la présence de plastiques dans du bois de recyclage (sortie de statut de déchet) conduit à la formation d'HCl dans les fumées, ce qui peut provoquer une corrosion sous dépôt des surfaces métalliques de l'ESP entraînant le remplacement prématuré de l'ESP après quelques années de fonctionnement.

- **Surchauffe du transformateur** : On peut le déplacer ou garantir une ventilation adaptée pour éviter toute surchauffe.

Un seul entretien a rapporté un souci de non-conformité aux VLE. Un travail avec le constructeur a été fait pour améliorer l'efficacité du système. Filtres à manche

5.2.3 5.1.3 Filtre à Manches

Principe fonctionnel

Le filtre à manches (FAM) est un caisson composé de plusieurs cellules de filtration comprenant chacune des rangées de manches ou poches filtrantes, à travers lesquelles les fumées passent (Figure 6).

Les poussières s'accumulent sur le média filtrant en gâteau, qui joue alors lui-même un rôle de filtre.

La collecte des gâteaux est effectuée de manière régulière par décolmatage le plus souvent par injection d'air comprimé dans les manches (décolmatage pneumatique).

Les particules sont collectées dans la (ou les) trémie(s) à la base du filtre puis évacuées par vis sans fin.

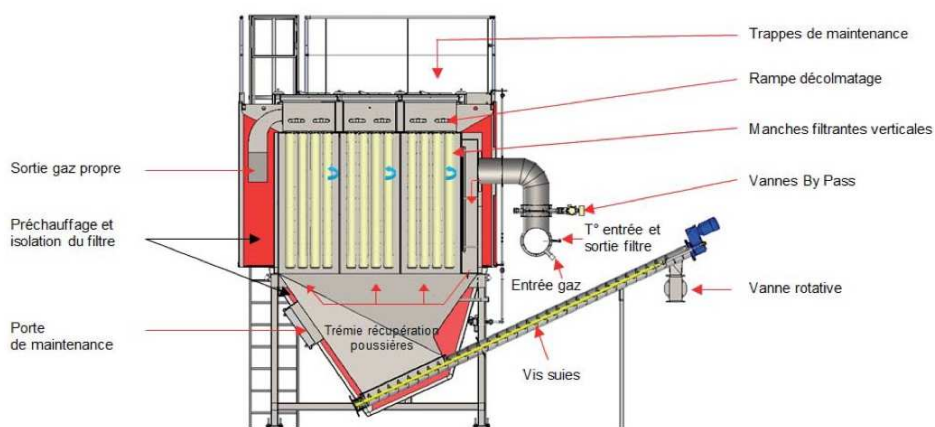


Figure 6 : Schéma de principe d'un filtre à manches (Source Compte R)

Le nombre de manches est choisi en fonction de la puissance de la chaudière.

Différentes typologies de manches existent, pouvant être choisies en fonction de la température des fumées :

- 120-150 °C : manches en PTFE (polytétrafluoroéthylène).
- 150-250 °C : en fibre de verre pour limiter les risques d'incendie.

En dessous de 120 °C et au-delà de 200/250 °C, les FAM sont by-passés c'est-à-dire que les fumées vont directement dans la cheminée sans traitement. Cette fonction est nécessaire pour préserver le filtre et augmenter sa durabilité.

Il existe aussi des filtres à céramiques, plus résistant à la température (voir paragraphe 0).

Le FAM peut être installé en intérieur ou en extérieur. Dans le cas d'une installation extérieure, il faut être vigilant au risque d'apparition de condensation.

Le FAM est moins encombrant qu'un ESP et peut être privilégié pour des espaces confinés.

En termes d'entretien et maintenance, un remplacement des manches, tous les 4/5 ans en moyenne est nécessaire. Sinon, il faut réaliser un suivi régulier du fonctionnement et un entretien annuel par une personne qualifiée (constructeur ou exploitant).

Efficacité de filtration

Le FAM est le filtre qui permet d'atteindre la meilleure performance, de manière fiable. Il permet de garantir des émissions inférieures à 10 mg/Nm³ à 6 % d'O₂.

Retour terrain

Avantages

Tout en affichant une très bonne performance ($< 20 \text{ mg/Nm}^3$ à 6 % d'O₂), le risque de dérives performancielles est plus faible que pour l'ESP, puisque que le FAM est insensible à la concentration en poussière en entrée. De plus il pourra répondre à une réglementation plus exigeante (10 mg/Nm^3 à 6 % d'O₂) et plus stricte sur les particules fines (PM_{2,5}). Il est plus compact que l'ESP et est modulaire. Il permet parfois de se passer d'un multicyclone.

Il permet l'injection de réactifs (charbon actif pour métaux et dioxines, chaux pour gaz acides) qui ne sont pas forcément nécessaires en chaufferies biomasse, sauf dans des cas particuliers de VLE plus drastiques (chaufferie en autorisation supérieure à 20 MW utilisant des combustibles chargés en polluants, chaufferie utilisant du bois B généralement autorisé sous le régime de l'incinération 2771). Les nuisances sonores sont limitées (décolmatage par air comprimé)

Inconvénients

Des pertes de charge importantes sont créées lors du parcours des fumées, il y a alors besoin de mettre en place des extracteurs importants. Par exemple, sur une chaudière d'1 MW, sans filtration la puissance d'extracteur est d'environ 2 kW, avec un FAM la puissance doit être augmentée à 10 kW.

Il a aussi été observé une sensibilité aux courants d'air et de froid, ainsi qu'un risque de condensation dans des conditions de températures trop basses. Le by-pass étant obligatoire pour protéger les manches en cas d'élévation trop forte de la température, il permet du coup d'éviter les phénomènes de condensation en by-passant le filtre lorsque les températures sont trop faibles. L'inconvénient est l'absence de filtration pendant ces phases.

Le colmatage des manches est parfois irréversible.

Les frais d'exploitation sont plus importants que pour l'ESP du fait du renouvellement des manches tous les 4/5 ans, des consommations électriques importantes (pertes de charges) et des besoins en air comprimé pour le décolmatage.

Le risque incendie (cendres volantes incandescentes) ou de perforation des manches par des escarbilles est plus fréquent que pour l'ESP. D'ailleurs le FAM est sensible aux températures hautes, mais aussi basses. Ces plages de température plus limitées ne sont parfois pas compatibles avec des chaudières anciennes (s'il y a réflexion sur la mise en place d'une filtration).

Problèmes en phase exploitation

Les problématiques récurrentes sont :

- **Incendie** : Des cas d'incendie peuvent être mentionnés, provoqués dans la plupart des cas par des cendres volantes incandescentes qui passent malgré la présence d'un multicyclone en amont du FAM et parviennent ainsi à atteindre les manches. Ces cendres volantes terminent de se consumer sur les manches et le gâteau de cendres qui s'y trouve. Si elles entrent en contact direct avec les manches ou des particules imbrûlées, elles pourront alors initier un incendie.

Deux principales explications des départs de feu peuvent être avancées :

Baisse de l'efficacité du multicyclone placé en amont du FAM ; des cendres volantes incandescentes peuvent ainsi traverser le multicyclone et se diriger vers le FAM où elles peuvent causer un incendie ou un début d'incendie. Cette chute d'efficacité du multicyclone s'explique soit par un défaut d'étanchéité au niveau de l'écluse rotative, soit par un bouchage de la trémie à cendres du multicyclone

L'accumulation de cendres volantes dans la trémie du filtre cumulée à l'humidité des fumées et à la forte teneur en chaux des cendres donne une réaction chimique possible et très exothermique dans un endroit confiné. Cette forte élévation de la température peut conduire à la destruction des manches et à un départ de feu.

- ⇒ Il est alors nécessaire de mettre en place un système de détection et d'extinction d'incendie. Des systèmes de protection anti-escarbille sont développés, ainsi que des matériaux plus résistants (ex : PTFE).

- ⇒ Sur les multicyclone : il est possible d'installer un moteur vibrant sur la partie inférieure ainsi qu'une sonde de détection du niveau maximum de cendres dans la trémie de celui-ci pour éviter sa baisse d'efficacité.
- ⇒ Sur les FAM : il est possible d'installer un moteur vibrant sur la trémie inférieure du filtre, ainsi qu'une sonde de détection du niveau haut des cendres volantes et qu'une sonde de température dans la trémie inférieure du filtre pour contrôler la température qui pilotera une buse de pulvérisation d'eau en cas de départ de feu.
- **Percement des manches filtrantes** : cela est provoqué par des phénomènes d'abrasion (poussières abrasives), voir par des phases de décolmatage mal maîtrisé.
- **Condensation** : entraine le colmatage des manches.
 - ⇒ Il est nécessaire de tracer des zones froides du filtre pour éviter toute condensation comme pour l'ESP.

Des problèmes de conception ont été soulevés :

Il a été observé un problème d'appréhension des vitesses de filtration ; la vitesse était sous-dimensionnée, ce qui a engendré un souci sur le décolmatage. Cela a été résolu par un travail sur les fumées et sur le fonctionnement de la chaudière.

- ⇒ Pour une meilleure efficacité, il faut être vigilant aux surfaces et vitesses de filtration en fonction des combustibles et poussières à traiter.

D'autre part, dans un cas où un multicyclone était présent en amont, il a été choisi de le retirer, car il ne laissait pas passer les grosses particules, qui se révèlent utiles à la filtration lorsqu'elles se déposent sur les manches et permettent ainsi de capter les particules plus fines de manière plus efficace.

5.2.4 5.1.4 Problématiques communes aux FAM et ESP

Une des principales problématiques associées à la filtration des fumées est généralement la récupération des cendres. Il y a souvent des problèmes gravitaires ; les cendres se colmatent dans le cône de récupération et ne tombent pas, ce qui nécessite soit d'installer un système de frappe/marteau ou idéalement un convoyeur à vis entre le cône et la zone de récupération.

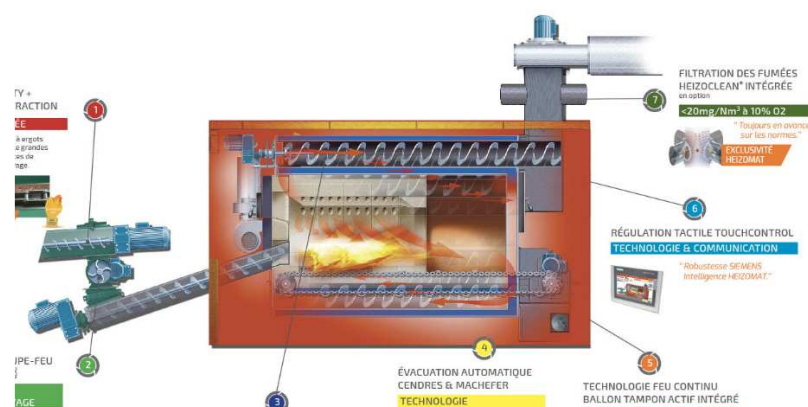
À l'usage, les big-bags sont parfois remplacés par des containers métalliques plus résistants en cas de cendre chaude.

5.2.5 5.1.5 Autres systèmes/Innovations

Petits électrofiltres/électrofiltres intégrés

HEIZOMAT propose une solution d'intégration des électrodes directement dans la chaudière, sur le parcours de fumées, permettant de réduire considérablement les coûts de filtration et l'encombrement (Figure 7).

Le principe est sensiblement identique à l'électrofiltre déporté mais ce petit électrofiltre est intégré en bout de chaudière. Les particules sont ionisées par des électrodes et viennent se plaquer sur le conduit. Une décharge électrique vient décolmater le gâteau qui retombe en bout d'échangeur de la chaudière. Les cendres se remélangent avec celles de la chaudière.



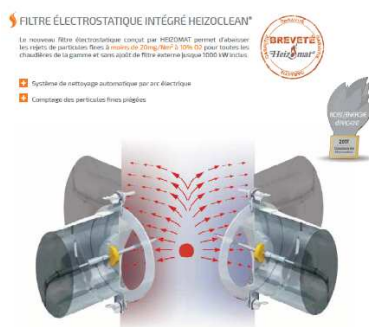


Figure 7 : Petit électrofiltre (source Heizomat)

Il est compatible avec des chaudières jusqu'à 2 MW. D'autres constructeurs sont en train de développer un procédé similaire : SIDAC, COMPTE R, HERTZ, FREULING, HARGASSNER, etc.

Il réduit les problèmes de l'électrofiltre externe : le by-pass n'est pas nécessaire d'après le fournisseur car le procédé peut fonctionner sur des températures de fumées plus élevées.

Les cendres de l'électrofiltre se retrouvent sous le foyer en mélange.

La solution est plus économe, du fait de sa compacité, de l'utilisation du châssis de la chaudière pour son support, de sa régulation mutualisée avec la chaudière et de l'absence de traçage. L'investissement est environ 4 fois moins important que pour un ESP ou un FAM.

L'entretien consiste en un nettoyage méticuleux des électrodes une fois par mois (2 heures) et au changement des électrodes tous les 2/3 ans. Cela représente entre 1300 et 1500 €/HT/an.

Il permet d'atteindre une concentration en sortie de 20 mg/Nm³ à 12 % d'O₂ (soit environ 33 mg/Nm³ à 6 % d'O₂). Pour descendre en dessous de 20 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ il est possible de mettre deux équipements en série (un projet en cours construit par WEYA).

Avantage	Inconvénient	Problématiques rencontrées et préconisations
<ul style="list-style-type: none"> Bien moins cher que les systèmes classiques FAM ou ESP Exploitation peu couteuse 	<ul style="list-style-type: none"> Nettoyage tous les mois (2 h) assez méticuleux Performance moyenne satisfaisante aujourd'hui pour les projets inférieurs à 5 MW (50 mg à 6 % d'O₂) 	<ul style="list-style-type: none"> Panne transformateur et souvent défaut de mise à la terre (mauvaise prise de terre de base dans la chaufferie) ⇒ Mesure de terre max 30 ohms

Tableau 7 : Avantages/inconvénients des petits électrofiltres

Filtre céramique

Le filtre céramique commercialisé par Glosfume est une unité de filtration « tout intégré » avec un by-pass, une trémie, son préchauffage et le calorifuge pour un encombrement réduit (Figure 8).

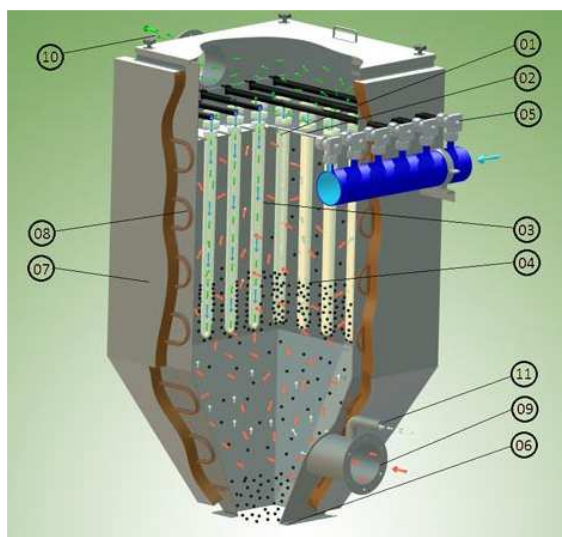


Figure 8 : Représentation du filtre céramique (Source Glosfume)

La filtration est opérée par un média en céramique microporeux qui est donc inerte mécaniquement (pas de mouvement) et chimiquement (sauf en présence de fluor). Le fonctionnement est identique à celui d'un FAM textile avec une trémie chauffée de récupération des fines étanchée par une écluse rotative au-dessus d'un big bag.

Le filtre céramique permet d'atteindre des concentrations très basses pour les poussières, proche de 0 quelques soient la typologie de la biomasse en entrée.

L'encombrement est presque 2 fois moindre qu'un FAM avec la possibilité de filtrer les poussières jusqu'à quelques microns. Son efficacité est de l'ordre de 96 à 98 %. Le décolmatage est automatique toutes les 10 à 30 min (réglage) sans by-pass (en fonctionnement).

Le risque incendie est quasi nul compte tenu du matériau utilisé.

Le filtre céramique est by-passé en cas d'abaissement de la température de fumées en dessous d'une température minimum (80-100 °C) et en cas de dépassement des 300/350 °C afin de protéger le ventilateur.

Un des risques principaux est le goudronnage du média filtrant ce qui arrive en cas de très mauvaise combustion (bois humide). Une des solutions consiste au départ à faire un « pre-coating » du média au talc.

Cet équipement fonctionne sans multicyclone en amont, les grosses particules participant activement à la filtration (gâteau de filtration composé de particules de toutes tailles).

Le retour des entretiens montre que le produit est encore peu diffusé sur le marché français pour les chaudières bois. La principale inquiétude est le risque de goudronnage qui semble arriver fréquemment sur les projets induisant un surcoût de maintenance. L'augmentation rapide des pertes de charges a été aussi soulevé. Le média en céramique serait plus cher que les manches d'un FAM, donc plus cher en cas de renouvellement (entre 4 et 10 ans selon la qualité de la combustion).

Condenseur par voie humide

Cette nouvelle génération de laveurs-condenseurs (ou condenseur par voie humide) de fumées optimise la récupération de chaleur et assure une première étape de filtration des fumées :

- le laveur-condenseur comporte une importante zone de lavage qui refroidit efficacement les fumées en les saturant d'eau, créant de fait les conditions favorables à la récupération d'énergie ;
- le système filtre les particules fines PM_{2,5} et réduit de 98 % les émissions de SO₂.

Les entretiens n'ont pas permis de récolter des informations précises sur le laveur-condenseur. A priori, la filtration n'est pas suffisante pour répondre à la réglementation (concentration de poussières

supérieure à 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂) et la mise en place d'une filtration complémentaire est nécessaire en aval (ESP humide).

Récemment, deux installations biomasses équipées de laveurs-condenseurs ont été incriminés en tant que source de contamination à la Légionnelle⁵ qui aurait entraîné la mort de deux personnes. La présence de gouttelettes d'eau et de condensat dont la température est inférieure à 50 °C a permis le développement de la bactérie. Il est probable que suite à ce malheureux accident, la solution technique soit moins plébiscitée sur les projets.

Il est à noter qu'un futur décret va intégrer les condenseurs par voie humide dans la rubrique ICPE 2921 portant sur les installations de refroidissement évaporatif par dispersion d'eau dans un flux d'air généré par ventilation mécanique. En effet cette rubrique sera étendue aux systèmes de récupération de la chaleur par dispersion d'eau dans les fumées sous le régime de déclaration avec contrôle périodique. Environ 30 sites seront concernés en France.

5.3 Les techniques de réduction des oxydes d'azote (NOx)

Avec l'évolution des seuils de VLE des NOx, les chaudières neuves entre 1 et 10 MW devront toutes être conçues en bas-NOx et/ou avec déNOx (dénitrification).

5.3.1 L'origine des NOx

Sous le terme d'oxydes d'azote (NOx), il est compris :

- le monoxyde d'azote (NO) ;
- le dioxyde d'azote (NO₂) ;
- le protoxyde d'azote (N₂O).

Deux types de NOx existent :

- Les NOx dits « combustibles », qui sont formés par la décomposition de l'azote contenu dans le bois, ce qui dépend de la nature du bois. Ils représentent 65 à 95 % environ des émissions de NOx par les chaufferies biomasse.
- Les NOx dits « thermiques », qui sont formés par la décomposition de l'azote contenu dans l'air, durant la combustion, ce qui dépend de la température et de l'excès d'air. Ce mécanisme apparaît de manière significative au-delà de 1300-1400 °C.

Dans le deuxième cas, en cas de combustion incomplète, c'est du CO qui peut alors être formé. Il y a donc un enjeu à maîtriser la température de combustion pour ne pas former de CO et minimiser la formation de NOx thermiques.

Il existe deux familles de techniques de réduction des NOx :

- Les techniques préventives, dites de bas-NOx : ce sont des mesures primaires qui visent à limiter la formation de polluants pendant la combustion, à travers la conception de la chaudière ;
- Les techniques curatives, dites de déNOx : ce sont des mesures secondaires destinées à détruire les polluants déjà formés, via l'insertion d'un équipement spécifique.

5.3.2 Les mesures primaires préventives

Les mesures primaires ont lieu durant la combustion, par modification des conditions de fonctionnement dans le foyer. Elles consistent en :

- l'introduction du combustible de manière continue et régulière ;
- l'étagement de la combustion pour limiter l'augmentation de la température ;
- l'augmentation du volume de la chambre de combustion ;
- la maîtrise de l'air comburant réglage de l'excès d'air, recirculation des fumées dans la zone de flamme où se forment les NOx, la température et le taux d'oxygène.

Une conception bas-NOx induit généralement un surcoût de 30 % par rapport à une conception classique.

⁵ Décembre 2019, chaufferie des Tanneries à Lingolsheim, 24 personnes ont été hospitalisées, dont deux sont décédées

5.3.3 Les mesures secondaires curatives

Les mesures secondaires, qui ont lieu après la production des NO_x, se basent sur une réaction chimique de réduction, par injection d'un agent réducteur (ammoniac ou urée) selon deux procédés :

- Procédé de réduction sélective non catalytique, dit SNCR (durant la combustion, pour des températures élevées – 850 à 1050 °C) ;
- Procédé de réduction sélective catalytique, dit SCR (après la combustion, pour des températures plus basses – 200 à 450 °C).

Les entretiens n'ont pas été très riches sur ce sujet, ces équipements concernant principalement les grosses chaufferies biomasse. Nous remettons en lumière dans ce paragraphe les résultats d'une étude conduite pour l'ADEME en 2013 « *Bonnes pratiques bas-NO_x pour chaudière à biomasse* »⁶.

Les deux procédés se distinguent notamment par leur efficacité : en moyenne il est obtenu un taux d'abaissement de 50 % pour le SNCR contre 80 % pour le SCR.

L'étude démontre que :

- Jusqu'à 20 MW, dans le cas d'une installation neuve, la configuration la plus avantageuse économiquement est celle intégrant un foyer dimensionné bas-NO_x ;
- Pour les puissances > 20 MW, dans le cas d'une installation neuve, la configuration associant une unité SNCR à un foyer standard est la plus avantageuse économiquement ;
- Pour les installations existantes, la SNCR est la technologie recommandée pour des puissances supérieures à 10 MW ;
- La SCR n'est pas aujourd'hui une solution économiquement compétitive pour abattre les NO_x. Elle ne pourrait se justifier que si la réglementation évoluait vers des valeurs nettement plus basses (< 80 mg/Nm³, appliqué à ce jour dans la réglementation ICPE 2771 incinérateur qui concerne des projets biomasse en bois déchets de taille supérieur à 15 MW).

Les risques identifiés dans cette étude sont les suivants :

- SNCR :
 - Possibilité d'émissions d'ammoniac à la cheminée si l'installation est mal réalisée,
 - Risque de corrosion de la chaudière,
 - Difficulté à gérer la variabilité des conditions de combustion de certaines installations (variabilité combustible, taux de charge, etc.) ;
- SCR :
 - Risque d'empoisonnement/colmatage du réacteur catalytique,
 - Possibilité d'émissions d'ammoniac à la cheminée (limité) si installation mal réalisée,
 - Risque de corrosion de l'économiseur (limité).

5.3.4 Retour terrain

Pour les chaufferies biomasses, il semblerait que les exploitants, en lien avec les chaudiéristes, essayent actuellement de privilégier les mesures primaires qui concernent principalement les chaudières eau chaudes. Pour les chaufferies vapeur, ou eau surchauffée, la mise en place des mesures secondaires (SNCR) semble nécessaire pour atteindre les VLE NO_x de la directive MCP 2018. Les exploitants ont très peu de retour d'expérience sur ces systèmes. L'exploitation de ces systèmes semble compliquée (gel du produit injecté en hiver par exemple) et les résultats ne sont pas toujours conformes, dépendant de nombreux facteurs (combustible, réglage chaudière) dont le pilotage est difficile à optimiser.

Les chaudiéristes interrogés assurent maîtriser le procédé SNCR pour atteindre des niveaux de concentration inférieurs à 200 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ mais rappellent que ces choix techniques ont un surcoût très important (160 k€ pour 8 MW).

Un point de vigilance serait à accorder aux combustibles plus azotés (ligneux, écorces) qui ne permettraient pas d'atteindre les objectifs de performance du Fonds Chaleur (300 mg/Nm³ à 6 % d'O₂) uniquement avec des mesures primaires. Pour les projets de tailles intermédiaires (1-5 MW), la mise en place d'un système SNCR semble inadapté tant financièrement que techniquement (exploitation).

⁶ [ADEME/ATANOR/COMPTE R/Institut PRIME/ATANOR, janvier 2013](#)

5.3 Conclusion

Le graphique ci-après (Figure 9) restitue en fonction des gammes de puissance de chaudière, les technologies disponibles pour la filtration des poussières (cyclone, électrofiltre, filtre à manche) et la filtration des autres polluants (NO_x, SO₂ : dioxyde de soufre, HCl : Chlorure d'hydrogène, HF : fluorure d'hydrogène, COV : composés organiques volatils et métaux) qui concernent principalement les chaufferies utilisant d'autres combustibles que du bois propre (bois adjuvanté, incinération, combustible solide de récupération). Cependant ces polluants seront mesurés sur les sites audités afin de vérifier qu'ils sont bien négligeables sur des chaufferies de taille intermédiaire fonctionnant avec du bois propre.

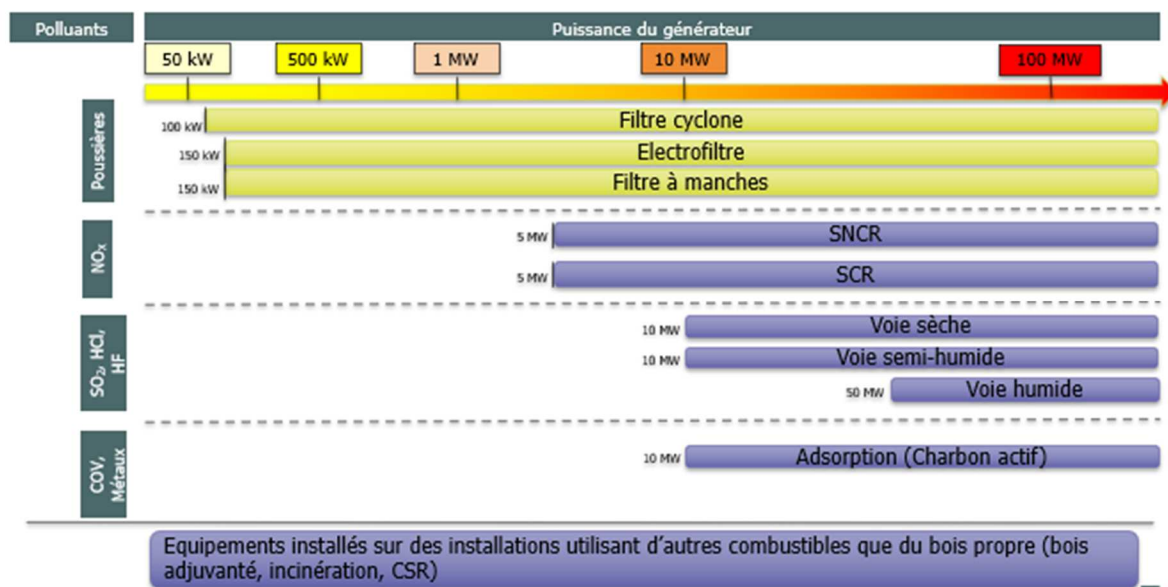


Figure 9 : Technologies disponibles pour la filtration des fumées (source INDDIGO)

Concernant les équipements qui ont été audités dans ce projet (principalement les équipements de dépoussiérage sur la gamme 100 kW à quelques MW, le Tableau 8 présente une synthèse des avantages et inconvénients de chaque solution.

Système de dépoussiérage classique	Avantages	Inconvénients
Cyclone	<ul style="list-style-type: none"> 1er niveau de filtration des poussières avec un investissement réduit (Jusqu' 100 mg/Nm³ à 6% d'O₂) Présence amont d'un FAM ou d'un ESP non systématique, mais pertinent en termes de performance pour l'exploitation 	<ul style="list-style-type: none"> Peu d'impact sur les particules fines
Filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> Performance garantie plus élevée que l'ESP Seuil de rejet garanti quel que soit le combustible biomasse Seuil de rejet constant en sortie Investissement moins élevé à débit d'air identique et seuil de rejet identique 	<ul style="list-style-type: none"> Changement de manches nécessitant jusqu'à 2 jours d'intervention Besoin de place pour le changement de manches Nécessité de système de détection et extinction incendie Augmentation des pertes de charges Sensibilité aux polluants acides Nuisance acoustique Coût d'exploitation plus élevé (durée de vie des manches de 3 ans)
Electrofiltre	<ul style="list-style-type: none"> Pertes de charges moins importantes Coût d'exploitation plus faible 	<ul style="list-style-type: none"> Encombrement : nécessite une vitesse d'écoulement des gaz plus faible et un volume élevé Coût élevé pour les plus petites puissances Nécessite une habilitation électrique pour l'entretien Nuisance acoustique

Systèmes de dépolluage moins diffusés sur le marché	Avantages	Inconvénients
Filtre céramique	<ul style="list-style-type: none"> Encombrement plus faible qu'un FAM ou un ESP Pas de risque incendie du fait du média filtrant utilisé Economie du multicyclone en amont puisque les grosses particules participent à la bonne filtration du procédé 	<ul style="list-style-type: none"> Risque de goudronnage au démarrage assez fréquent d'après les retours d'expérience Média céramique plus cher en cas de renouvellement que les manches d'un FAM
Electrofiltre intégrée	<ul style="list-style-type: none"> Bien moins cher que les systèmes classiques FAM ou ESP Exploitation peu couteuse 	<ul style="list-style-type: none"> Nettoyage tous les mois (2h) assez méticuleux Performance moyenne satisfaisante aujourd'hui pour les projets inférieurs à 5 MW (50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂)

Tableau 8 : Synthèse avantage et inconvénient des solutions de dépolluage

La performance sur site des installations de traitement des fumées pour les poussières est synthétisée dans le graphe ci-dessous (Figure 10) :

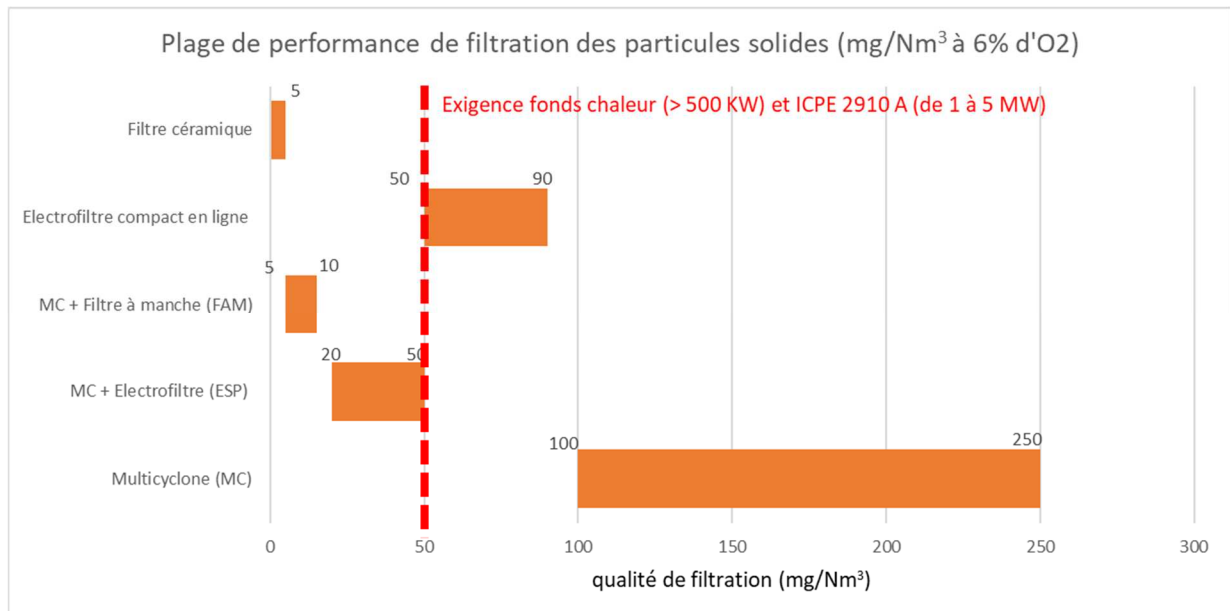


Figure 10 : Synthèse de l'étude concernant la plage de performance de filtration des poussières de différents systèmes de filtration

Ces équipements sont installés en fonction de la réglementation associée au projet, en fonction de sa taille et/ou de sa localisation (Plan de Protection de l'Atmosphère, PPA) mais aussi en fonction des exigences du Fonds Chaleur.

En synthèse entre 1 MW et 5 MW, le seuil à ne pas dépasser pour les poussières de 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ est de rigueur pour les nouveaux projets et peut descendre à 30 mg/Nm³ pour les projets supérieurs à 20 MW mais aussi pour les projets supérieurs à 5 MW bénéficiant du Fonds Chaleur.

Pour les projets inférieurs à 1 MW et qui sont subventionnés par le Fonds Chaleur (> 1200 MWh/an), l'imposition vient uniquement de l'ADEME. Pour ces chaudières, le seuil à ne pas dépasser de 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ pour les poussières, 300 ou 500 mg/Nm³ pour les NO_x.

Pour atteindre des émissions de poussières inférieures à 50 mg/Nm³, la mise en place d'un électrofiltre ou d'un filtre à manche est nécessaire. L'atteinte des 300 mg/Nm³ pour les NO_x est possible en utilisant les technologies bas NO_x (surdimensionnement des chambres de combustion) si et seulement si le combustible est faiblement chargé en azote.

Pour les chaudières plus petites (< 1200 MWh/an soit environ en dessous de 400 à 500 kW), il n'y a pas d'imposition sur les émissions de polluants, sauf s'il y a des prescriptions locales spécifiques (PPA, critères subventions régions).

Généralement, ces chaudières sont simplement équipées de cyclone (interne à la chaudière) ou de multicyclone externe.

6. Campagne de mesures sur six chaudières bois

Les données ci-dessous sont présentées dans le rapport d'annexe en parties 3 et 4.

- Le planning de réalisation des campagnes de mesures ;
- Une analyse technique et fonctionnelle des six projets étudiés ;
- Les résultats détaillés des mesures de polluants sur les six sites étudiés.

Les chaudières sont identifiées dans les tableaux sous la nomenclature : CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6. Cinq chaudières sur six sont de puissances inférieures à 800kW, une chaudière est de puissance supérieure à 1 MW (1,65 MW).

6.1 Echantillonnage des sites

Le choix des six sites finalement retenus (sur dix visités et quelques sites analysés sur dossier) s'appuie sur les prérequis suivants, nécessaires à l'instrumentation en vue de mesurer les poussières et autres polluants sur une campagne de mesure de quelques jours :

- Présence d'une trappe avec un conduit amont et aval suffisamment long (5 diamètres nominal (DN⁷) dans l'idéal) ;
- Accessibilité de la trappe avec suffisamment de place autour de la trappe pour accéder et positionner le matériel, et une hauteur de la trappe, nécessitant ou non la pose d'un échafaudage.

En lien avec l'état de l'art des systèmes de filtration réalisés et comme déjà évoqué, la taille des projets retenus ne permet pas de faire une ventilation des projets en fonction des quatre typologies (ESP, FAM, deNOx, condensation).

Il est intéressant aussi de noter qu'il n'a pas été aisé de trouver six sites compatibles pour les mesures. Pour la majorité des cas :

- Il a fallu créer des trappes : pour alléger les coûts des mesures, le choix a été fait de ne pas mettre en place des trappes normalisées, un orifice de 10 cm par 10 cm étant suffisant pour faire les mesures ;
- Sur les trappes existantes, comme sur celles créées, les longueurs droites situées en amont et aval de la trappe étaient dans la plupart des cas inférieures à celles 5 recommandées. L'accessibilité à la trappe n'était pas évidente (en hauteur et aussi parfois avec difficulté pour mettre en place un échafaudage).
-

Ainsi les configurations des installations, leur fonctionnement par cycle ainsi que leur niveau d'émission ne permettaient pas de réaliser des prélèvements conformes aux exigences fixées par l'accréditation COFRAC.

6.2 Méthodologie pour la réalisation des campagnes de mesures sur site

Les composés suivants ont été mesurés :

- Gaz de combustion (CO, CO₂, O₂, COVT, NOx);
- Poussières, sous 2 granulométries (PM₁₀ et PM_{2,5}) ;
- HAP ;
- Métaux ;

⁷ Le diamètre nominal (DN) d'un tube correspond à son diamètre intérieur conformément à la norme EN ISO 6708

- Carbone suie (BC) - EC/OC ;
- Particules totales TSP (phase solide et condensable) et solides SP ;
- Classes de volatilité.

6.2.1 Contraintes opérationnelles des campagnes de mesures sur site

6.2.1.1 Chaudières entre 1 et 20 MW

La durée de réalisation des essais sur la chaudière > 1 MW (CH6), bénéficiant d'un système de filtration plus performant a dû être allongée afin d'obtenir des limites de quantification (LQ) de mesure ($LQ_{mesure} = LQ_{analytique} / Volume\ prélevé$) suffisamment basses (Tableau 918) pour les méthodes de prélèvements manuelles afin de permettre la caractérisation des polluants visés dans le cahier de charge.

6.2.1.2 Chaudières < 1 MW

Certaines chaudières de « petites puissances » (non soumises à la réglementation ICPE) ont nécessité la mise en place de trappes de prélèvement pour permettre la réalisation des prélèvements listés dans le cahier de charge. Cela concerne trois chaudières : la chaudière CH1, la chaudière CH2 et la chaudière CH3. Cette mise en place (choix du prestataire, choix de l'emplacement des trappes, validation des devis, organisation des travaux de modification des conduits et planification des prestations co-dépendante de ces travaux) a été gérée par l'Ineris en amont de la réalisation des campagnes d'essais avec l'aide d'Inddigo.

Campagnes d'essais	CH5	CH6	CH4	CH1	CH2	CH3
Polluants	LQ de mesure					
PM1, 2,5 et 10 (mg/m ³) ⁸	1,64	0,15	4,49	5,25	1,87	2,71
PM _{solide} (mg/m ³)	2,28	0,26	9,49	11,59	3,27	3,01
PM _{solide+condensable} (mg/m ³)	5,68	1,51	5,11	8,50	3,51	-
HAP (µg/m ³)	0,004	0,003	0,125	0,110	0,032	0,043
Métaux (mg/m ³)	0,025	0,027	0,015	0,040	0,002	0,246
Carbone Suie (mg/m ³)	0,011	0,001	0,065	0,337	0,090	0,002

Tableau 9 : LQ de mesure calculée pour chaque prélèvement manuel et pour chaque campagne d'essais

6.2.2 Méthodes de prélèvement manuelles et de mesurages en continu

La liste des paramètres mesurés et des normes/méthodes internes associées sont répertoriées dans le tableau 19 ci-dessous.

Polluants :	Paramètres :	Méthodes de prélèvement :	Normes :
Gaz de Combustion	O ₂ , CO ₂ , CO, NO _x	Analyseur PG250	NF EN 14792 - NF EN 15058 - NF X 20-380 - NF EN 14789
	COVT	Analyseur FID	NF EN 12619
PM: Fractions granulométriques	PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₁₀	Impacteur manuel DEKATI®	NF EN ISO 23210
PM _{SP}	Fraction solide	Filtre chauffé	NF EN 13284-1 & NF X 44-052
PM _{TSP}	Fraction solide + condensable	Filtre chauffé + barboteurs IPA	Méthode interne*
HAP	Somme 8 HAP réglementaires	Filtre chauffé + condensats + résine	NF X 43-329
Métaux	Somme 16 Métaux	Filtre chauffé + barboteurs	NF EN 14385
Carbone suie	EC / OC	Dilution + filtre	Méthode interne**
Vitesse - débit	Débit-Vitesse de l'écoulement dans le conduit	Tube de pitot	ISO 10780 – EN ISO 16911-1

Tableau 10 : Méthodes de prélèvement manuelles et de mesurages en continu

⁸ Les m³ sont des Nm³. Il s'agit de l'écriture conventionnelle

Par soucis de compréhension, les deux méthodes internes Ineris sont détaillées ci-dessous. Les autres méthodes de mesure répondent aux exigences normatives et ne sont pas décrites dans ce rapport.

***Méthode à barboteurs IPA (SPC-IPA method):**

Cette méthode de prélèvement développée par l’Ineris est proche de la méthode EPA 5H.

La méthode SPC-IPA consiste à combiner l'échantillonnage de la fraction solide des particules sur un filtre chauffé (160°C) à la collecte de la fraction condensable des particules à l'aide de 2 ou 3 barboteurs remplis de 150 ml d'isopropanol (IPA) et placés en série dans une unité de refroidissement pour maintenir une température d'échantillonnage inférieure à 20°C permettant la condensation des gaz (Figure 16).

La ligne d'échantillonnage de la méthode SPC-IPA est composée de :

- une sonde droite ou spiralée chauffée à 160°C ;
- un boîtier de filtre contenant un filtre chauffé à 160°C contrôlé par un capteur de température ;
- 2,3 barboteurs placés dans un bain réfrigérant et remplis d'IPA (150 mL dans chaque) ;
- un dessiccateur (Silica-gel) pour protéger la pompe de l'humidité des gaz ;
- une pompe d'échantillonnage à froid ;
- un dispositif de mesure du volume de prélèvement équipé d'un contrôle de la température et de la pression pour exprimer les résultats dans des conditions STP.

La sonde est positionnée à contre-courant du flux de gaz de combustion avec une orientation de la buse à 180 °.

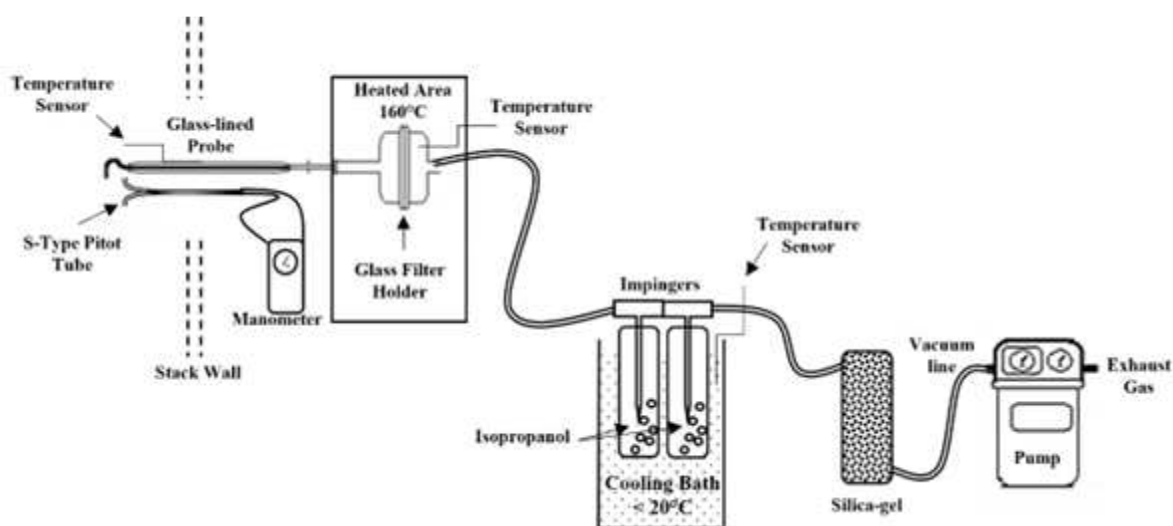


Figure 11 : Schéma de la ligne de prélèvement de la méthode à barboteur SPC-IPA pour la mesure des condensables

L'échantillonnage des particules solides est réalisé selon la norme NF EN 13284-1 pour la détermination de la concentration massique des poussières à faible échelle. La détermination de la concentration massique des poussières à petite échelle est réalisée par méthode gravimétrique manuelle. Les particules totales sont déterminées par la somme cumulée des masses des particules collectées, dans la sonde, sur le filtre et dans les barboteurs.

****Méthode Thermo-optique pour mesure EC/OC :**

Concernant les mesures de carbone suie, la méthode interne utilisée suit les préconisations décrites dans l'étude CARABLACK⁹(prélèvement sur filtre et analyse thermo-optique).

La méthode thermo-optique prend en compte les propriétés thermiques et optiques de la matière carbonée, pour corriger l'interférence liée au risque de pyrolyse de l'OC lors de la volatilisation de celui-ci. C'est une technique couramment utilisée actuellement en air ambiant, et désormais normalisée, avec la norme EN 16909 publiée en mai 2017.

⁹ CARABLACK – Rapport DRC- 18-142923-01309A

La méthode de mesurage thermo-optique repose sur la volatilisation et l'oxydation thermiques des composants de la matière particulaire contenant du carbone à des paliers de température définis, et sur la quantification du carbone libéré, auxquelles est ajoutée une correction optique pour l'estimation de la quantité de carbone pyrolytique. Cette méthode permet donc la quantification de TC, EC et OC avec un seul échantillon de filtre.

6.2.3 Méthodes d'analyses des échantillons collectés sur site

Les échantillons collectés sur site ont été analysés par le laboratoire de l'Ineris, les méthodes mises en œuvre sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Polluants :	Paramètres :	Méthodes analytiques :	Méthode	LQ analytiques :
PM: Fractions granulométriques	PM ₁ PM _{2,5} PM ₁₀	Pesée (filtres)	NF EN ISO 23210	1,0 mg 1,3 mg 1,6 mg
PM _{Solide}	Fraction solide	Pesée (filtres) Extraits secs (rinçage)	Méthode interne NF EN 13284-1	1,0 mg 2,0 mg
PM _{s condensables}	Fraction condensable	Pesée (filtres) Extraits secs (rinçage + barboteurs)	Méthode interne	1,0 mg 2,0 mg
HAP	Somme 8 HAP ¹⁰ réglementaires	ULPC – Fluorescence-UV (filtres, condensat, résine, rinçage)	NF X 43-329	Phase gazeuse : 0,02 µg Phase particulaire : 0,4 µg
Métaux	Somme 16 Métaux ¹¹	Minéralisation des échantillons Analyse des barboteurs, filtres et rinçage de canne par ICP-MS	NF EN 14385 NF EN 17294-2	Phase gazeuse : 2,8 µg/l Phase particulaire : 5,6 µg
Carbone suie	EC / OC	Thermo-optique (filtres)	NF EN 16909	6 µg

Tableau 11 : Méthodes d'analyses mises en œuvre sur les échantillons collectés lors des campagnes de mesure sur site.

6.3 Synthèse des résultats des campagnes de mesures

Nota:

Les prélèvements sur site ont été réalisés hors accréditation COFRAC et donc hors agrément.

De plus, les chaudières inférieures à 1 MW ne font pas l'objet de contrôles réglementaires des leurs émissions,

Ainsi, le positionnement des niveaux de concentration des différents polluants vis-à-vis des valeurs limites est présenté à titre indicatif et ne vaut pas déclaration de conformité/non conformité.

Chaudières Bois	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
Puissances	150 kW	200 kW	500 kW	720 kW	800 kW	1,65 MW
Année de mise en service	2010	2016	2017	2007	2018	2018
Combustible	Plaquettes bocagères	Bois d'élagage du site	Plaquettes forestières	Déchets verts + broyat palette SSD	Plaquettes de scierie	plaquettes forestières (50%) et de bois d'élagage (50%)

¹⁰ Fluoranthène, Benzo [A] anthracène, Benzo [b] fluoranthène, Benzo [k] fluoranthène, Dibenzo (a,h) anthracène, Benzo (g,h,i) perylene, Indeno (1,2,3-c,d) pyrene

¹¹ As : Arsenic, Cd : Cadmium, Co : Cobalt, Cr : Chrome, Cu : Cuivre, Mn : Manganèse, Ni : Nickel, Pb : Plomb, Sb : Antimoine, Se : Sélénium, Te : Tellure, Ti : Titanium, Tl : Thallium, V : Vanadium, Zn : Zinc

Date intervention	15 au 19/02 2021	22 au 26/02 2021	12 au 16/04 2021	14 au 18/12 2020	9 au 13/03 2020	6 au 10/07 2020
Allure	(On - Off) - 50 %	(On - Off) - 40 %	80 %	30 %	(On - Off) - 50 %	90 %
Filtration	Multicyclone externe	Cyclone intégré	Deux cyclones ACS	Cyclone intégré	Electrofiltre compact en ligne	Cyclone + Filtre à manche
Débit sur sec (m ³ /h)	327	449	1405	719	1229	1661
Humidité des gaz (%)	7,7	21	12,8	8,8	11,5	14,5
Température des fumées (°C)	108	75	126	78	81	120
Gaz de combustion						
O ₂ (%)	16,8	14,4	9,6	12,7	12,9	8,5
CO ₂ (%)	3,9	6,6	11,2	7,6	7,9	12,2
CO (mg/m ³)	3043,0	2508,6	494,5	8841,1	925,3	152,9
NO _x (mg NO ₂ / m ³)	356,3	358,5	233,4	205,1	171,8	210
COVt (mg C/ m ³)	180,6	142,2	27,6	330,8	14,2	0,5
Particules (solide et condensable) (mg/m³)						
PM _{solide} (mg/m ³)	483,5	133,7	128,4	341,0	84,2	0,1
PM _{solide + condensable} (mg/m ³)	504,0	135,9	Aucunes données	406,8	104,3	2,2
PM par classe granulométrique (mg/m³)						
PM ₁	267	70	106	357	26	0,2
PM _{2,5}	275	73	120	388	31	0,2
PM ₁₀	276	74	131	452	40	0,2
>PM ₁₀	277	75	140	493	46	0,2
Contributions par tranche granulométrique (%)						
Diamètre < 1 μm	97	93	70	71	57	100
1 μm < Diamètre < 2.5 μm	3	5	11	9	10	0
2.5 μm < Diamètre < 10 μm	0	1	9	11	20	0
Diamètre > 10 μm	0	1	9	9	13	0
8 HAP (μg/ m³)						
8 HAP (μg/ m ³)	176,6	54,5	22,5	340,1	1,6	0,08
16 Métaux (mg/ m³)						
16 Métaux (mg/ m ³)	7,0	1,1	11,6	3,3	2,3	0,03
BC (mg C/ m³)						
BC (mg C/ m ³)	84,4	6,6	4,3	11,7	3,4	0,008

Tableau 12 : Synthèse des résultats des polluants mesurés lors des campagnes d'essais réalisées sur six chaudières et corrigés à 6 % d'O₂

Les résultats détaillés des essais ainsi que les courbes des gaz de combustion sont donnés dans la partie 4 du rapport annexe chacune des chaudières étudiées.

Les six sites étudiés présentent des chaudières entre 150 kW et 1,65 MW. Lorsque qu'il y avait deux chaudières biomasse sur site, seule une a été étudiée. La puissance référencée est la puissance de la chaudière étudiée.

La chaudière la plus puissante (CH6) est considérée comme un point de comparaison avec une gamme de puissance plus élevée soumise à la réglementation ICPE 2910 A₁:

- Son taux de charge est élevé et elle fonctionne toute l'année : son temps de fonctionnement est de 3 000 heures pleine puissance
- Elle est équipée d'un filtre à manches.

La chaudière CH3 est considérée comme le fonctionnement de référence d'une majorité des chaudières sur ces gammes de puissances :

- Son taux de charge est bon (80 %) et son temps de fonctionnement représentatif d'un équipement qui fonctionne pour du chauffage soit 2 000 heures pleine puissance.
- Elle n'est pas équipée d'un système de filtration performant.

6.3.1 Monoxyde de carbone CO

Le graphique ci-après présente les résultats des campagnes de mesures sur les six chaudières étudiées et compare ces émissions :

- A la réglementation ICPE 2910 A en déclaration pour les chaudières de plus de 1 MW (Valeur limite d'émission (VLE) à 6 % d'O₂ = 250 mg/Nm³)

Aux exigences du Fonds Chaleur pour les chaudières entre 500 kW et 1 MW (même exigence que l'ICPE 2910 A).

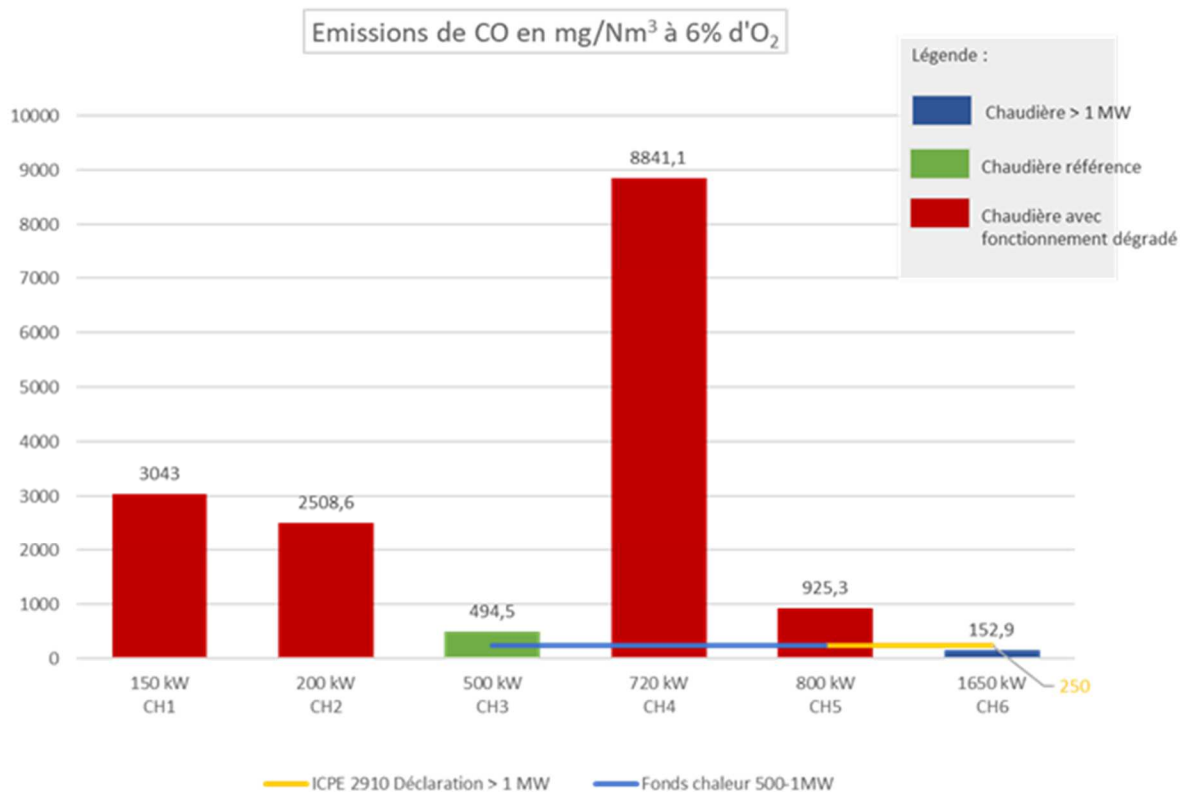


Figure 12 : Résultat des campagnes de mesures de CO ramenées à 6 % de O₂ pour les 6 chaudières étudiées

Quatre sites sur six sont au-dessus de 500 mg/Nm³. Ces dépassements sont corrélés avec une allure de fonctionnement faible, en dessous de 50 %.

Pour les deux autres sites (CH3 et CH6) :

- le site de 1650 kW (CH6) qui fait l'objet d'une déclaration ICPE 2019 A, respecte les exigences ICPE (< 250 mg/Nm³ à 6 % d'O₂) ;
- le site de référence de 500 kW (CH3) est au-dessus du seuil du Fonds Chaleur (250 mg/Nm³).

Les quatre sites concernés par des dépassements importants présentaient des taux de charge faibles, liés aux conditions climatiques clémentes pendant la période de réalisation des essais pour certains et à un surdimensionnement de la chaudière pour d'autres.

Pour rechercher les raisons de ces émissions de CO très importantes, les cycles de fonctionnement des chaudières ont été analysés à la lecture de l'évolution de l'oxygène pendant les mesures (Figure 13).

Pour la chaudière CH4, qui présente les résultats les plus médiocres, le taux de charge moyen de la chaudière pendant la campagne de mesures a été évalué à 30 %, du fait d'une météo clémente.

D'après le graphique (Figure 13), la chaudière fonctionne par succession de cycles on-off de 20 min avec oscillations autour du point de consigne.

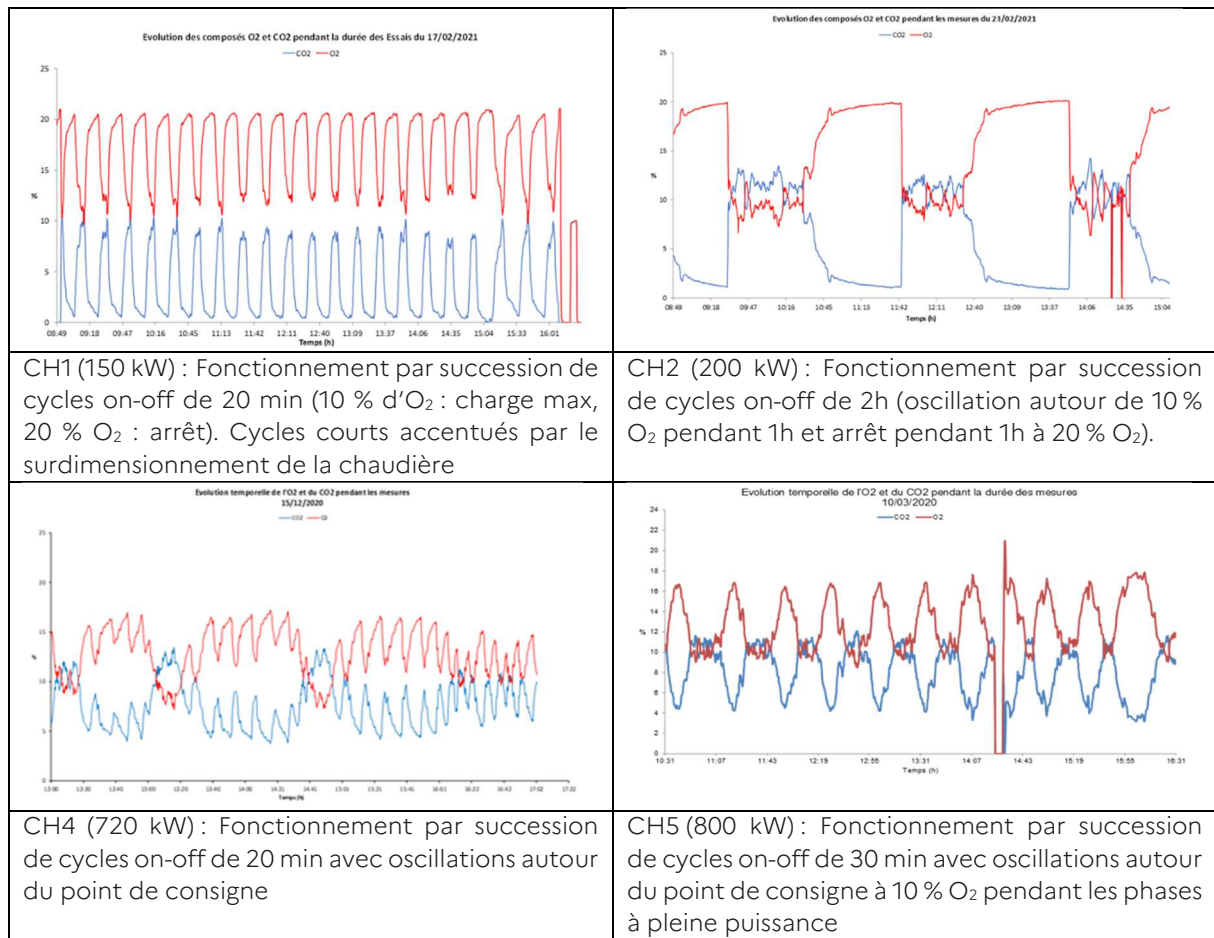


Figure 13 : Analyse des émissions O₂ et CO₂ pendant Les cycles de fonctionnement des chaudières

Si l'on met en parallèle ces oscillations avec la production de CO, on constate que :

- Les fortes hausses d'émissions de CO sont générées pendant les phases d'extinction (phase OFF).
- Pendant les phases de combustion, à pleine puissance, les émissions sur la période de mesure ont oscillé entre 250 et 3 000 mg/Nm³, soit au-delà des exigences du Fonds Chaleur.

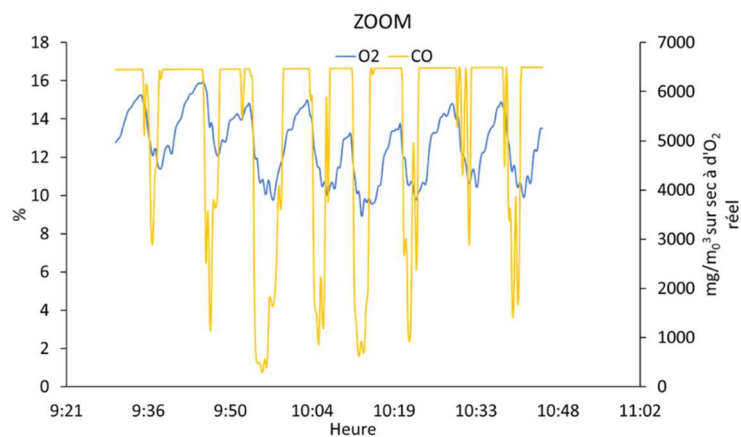


Figure 14 : Evolution O₂ et CO sur la période de mesure pour la chaudière CH4

La hausse des émissions pendant les phases d'extinction est observée également sur les trois autres chaudières qui présentent des résultats médiocres (Figure 15).

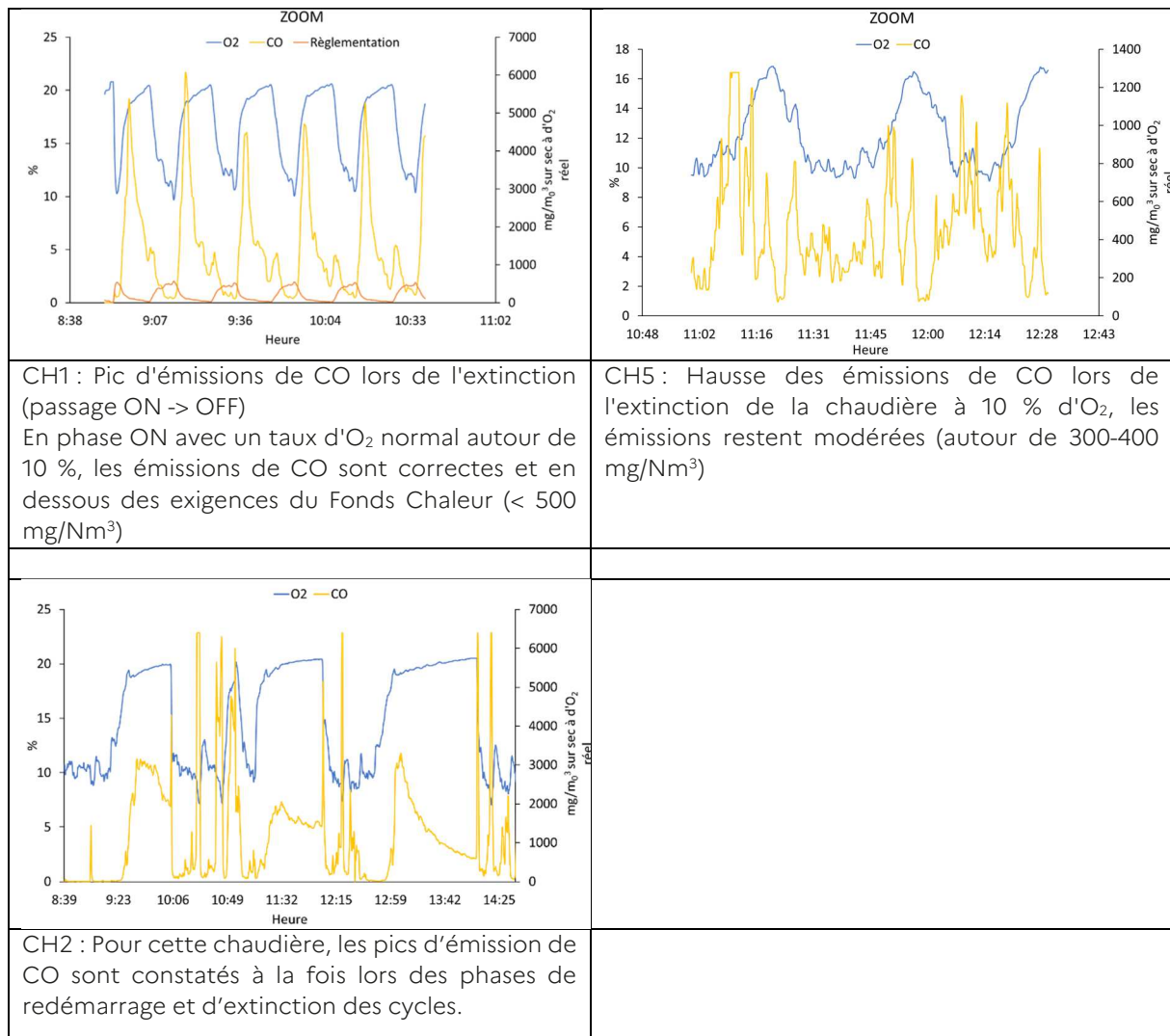


Figure 15 : Analyse des émissions O₂ et CO₂ pendant les cycles d'extinction et de redémarrage des chaudières CH1, CH2 et CH5

Pour le site CH3, malgré un taux de charge relativement élevé (80 %), l'analyse de la courbe O₂ montre que la chaudière ne fait pas de cycle pouvant générer des émissions de CO plus importantes (Figure 16). Les émissions de CO varient cependant aussi de façon importante (dans une moindre mesure que la chaudière CH4) et avec des dépassements très réguliers (pointe maximale de 1 500 mg/Nm³).

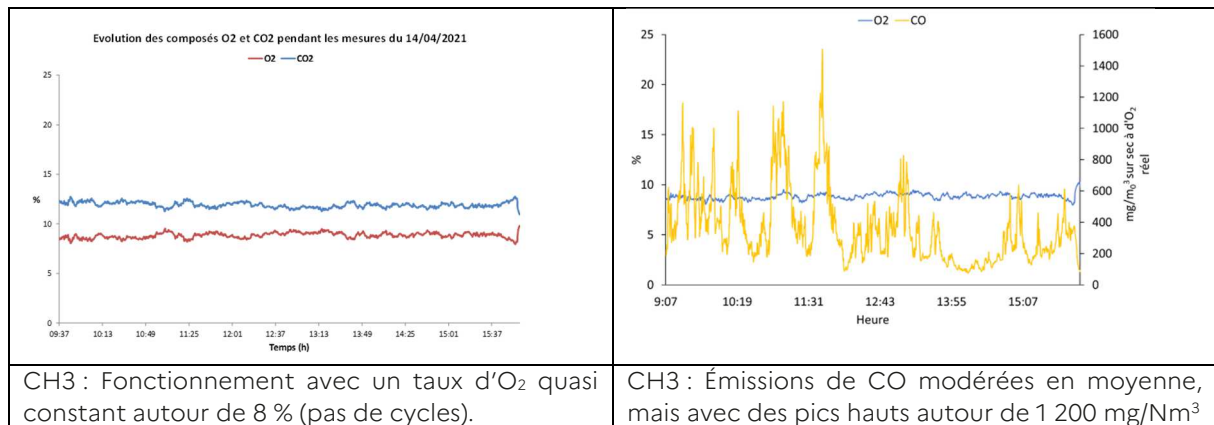


Figure 16 : Analyse des émissions O₂ et CO₂ de la chaudière CH3 (respectant les exigences du Fonds Chaleur)

6.3.2 Oxydes d'Azote (NOx)

Le graphique ci-dessous présente le résultat des campagnes de mesures sur les six chaudières étudiées et compare les émissions :

- A la réglementation ICPE 2910 en déclaration pour les chaudières de plus de 1 MW (VLE < 500 mg/Nm³ à 6 % d'O₂) ;
- aux exigences du Fonds Chaleur pour les chaudières entre 500 kW et 1 MW (VLE < 500 mg/Nm³ à 6 % d'O₂).

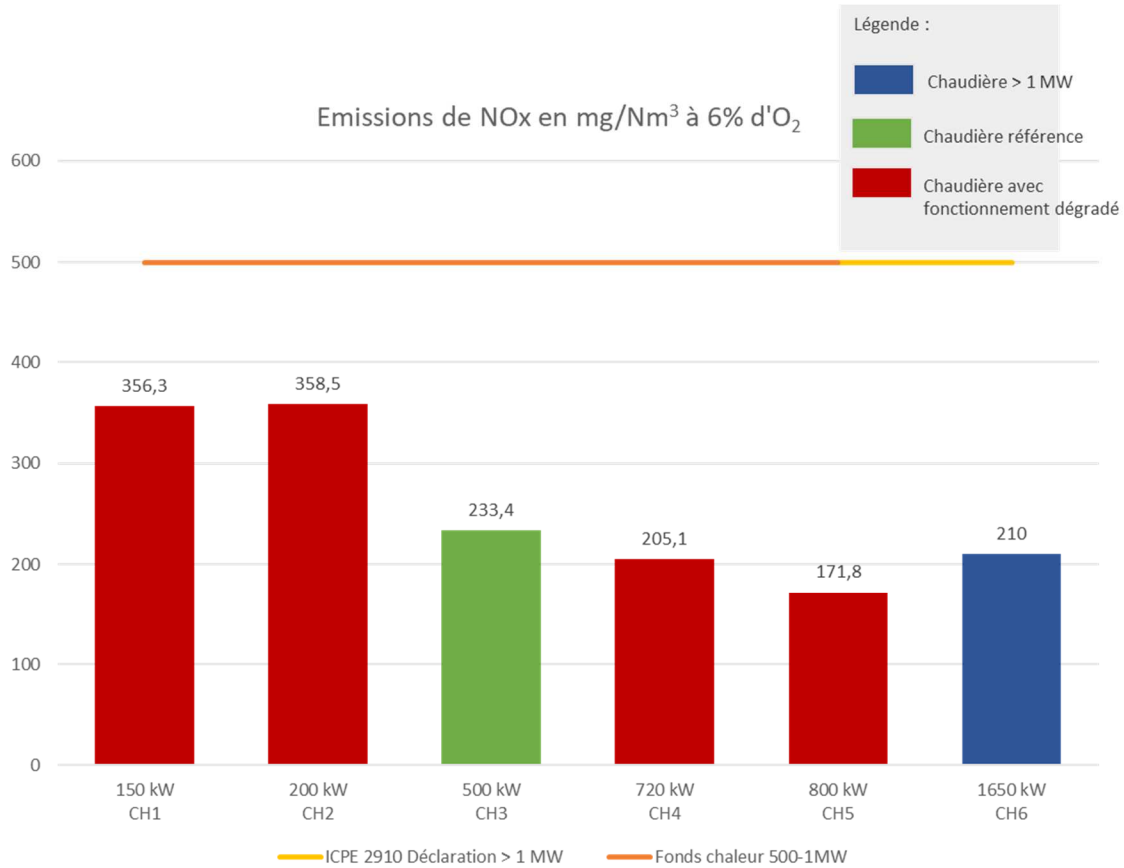


Figure 17 : Résultat des campagnes de mesures de Nox sur les six chaudières

Concernant les émissions de NOx, seules deux chaudières ont des émissions supérieures à 300 mg/Nm³ et toutes sont inférieures à 500 mg/Nm³.

Sur le panel des chaudières étudiées, les émissions de NOx ne semblent pas être une problématique. Les émissions de NOx sont en grande partie liées à la teneur en azote du combustible. Dans le panel audité, les deux sites présentant les émissions les plus élevées de NOx sont alimentés en bois d'élagage ou plaquettes bocagères, des combustibles plus chargés en azote que la plaquette forestière.

Chaudière Bois	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
Puissances	150 kW	200 kW	500 kW	720 kW	800 kW	1,65 MW
Année de mise en service	2010	2016	2017	2007	2018	2018
Combustible	Plaquettes bocagères	Bois d'élagage du site	Plaquettes forestières	Déchets verts + broyat palette SSD	Plaquettes de scierie	Plaquettes forestières (50 %) et bois d'élagage (50 %)
NOx (mg NO ₂ /m ³)	356,3	358,5	233,4	205,1	171,8	210

Tableau 13 : Caractéristiques des six chaudières et leurs émissions de NOx

6.3.3 Matière Particulaire

Le graphique ci-après (Figure 18 : Résultat des campagnes de mesures de particules solides sur les six chaudières) présente le résultat des campagnes de mesures sur les six chaudières étudiées et compare ces émissions :

- A la réglementation ICPE 2910 A en déclaration pour les chaudières de plus de 1 MW (VLE = 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂)
- Aux exigences du Fonds Chaleur pour les chaudières entre 500 kW et 1 MW (VLE = 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂).

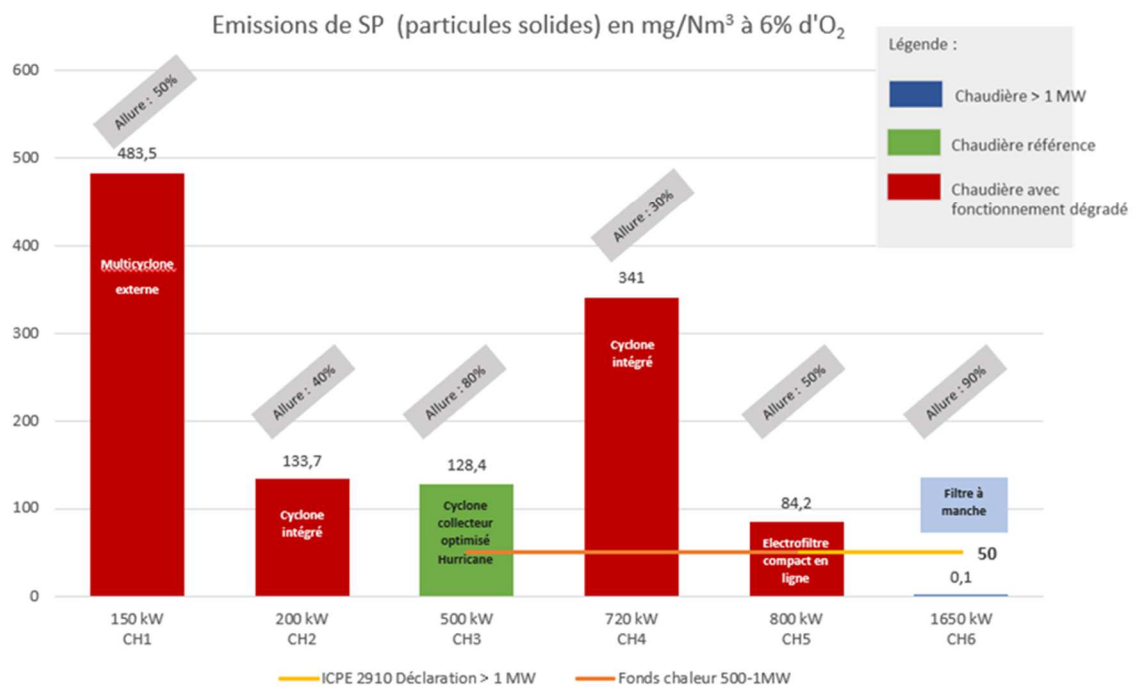


Figure 18 : Résultat des campagnes de mesures de particules solides sur les six chaudières

Hormis la chaudière ICPE (CH6, 1 650 kW) équipée d'un filtre à manches, aucun site ne respecte les exigences du Fonds Chaleur. Les émissions de particules solides (SP) sont bien au-delà des 50 mg/Nm³ et oscillent entre 85 et 485 mg/Nm³.

Parmi les chaudières non ICPE, la chaudière qui s'approche le plus des exigences du Fonds Chaleur est celle équipée d'un électrofiltre compact en ligne. Pour les autres, les émissions de particules solides (SP) dépassent la valeur de 125 mg/Nm³ avec un maximum à 483 mg/Nm³ pour la CH1.

Chaudières Bois	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
Puissances	150 kW	200 kW	500 kW	720 kW	800 kW	1,65 MW
Année de mise en service	2010	2016	2017	2007	2018	2018
Allure	(On - Off) - 50 %	(On - Off) - 40 %	80 %	30 %	(On - Off) - 50 %	90 %
Filtration	Multicyclone externe	Cyclone intégré	2 cyclones collecteurs optimisés (Hurricane)	Cyclone intégré	Electrofiltre compact en ligne	Cyclone + Filtre à manche
SP (mg/m ³)	483,5	133,7	128,4	341,0	84,2	0,1

TSP (mg/m ³)	504,0	135,9	Aucunes données	406,8	104,3	2,2
Contribution des condensables (%)	4	2	Aucunes données	16	19	Aucunes données
	PM par classe granulométrique (mg/m³)					
PM ₁	267	70	106	357	26	0,2
PM _{2,5}	275	73	120	388	31	0,2
PM ₁₀	276	74	131	452	40	0,2
	Contributions par tranche granulométrique (%)					
diamètre < 1 µm	<u>97</u>	<u>93</u>	<u>75</u>	<u>71</u>	<u>57</u>	<u>100</u>
1 µm < diamètre < 2.5 µm	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>10</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>0</u>
2.5 µm < diamètre < 10 µm	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>8</u>	<u>11</u>	<u>20</u>	<u>0</u>
diamètre > 10 µm	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>7</u>	<u>9</u>	<u>13</u>	<u>0</u>

Tableau 14 : Caractéristiques des six chaudières et de leurs émissions de particules solides et condensables

Il est constaté que les filtrations de type multicyclone généralement prévu en base sur les projets de petites tailles ne permettent pas d'abaisser significativement les émissions de particules.

Nous pouvons aussi corrélérer les émissions les plus importantes de particules avec les chaudières qui présentent le plus de cycles. En effet ce sont CH4 et CH1 qui ont les cycles les plus courts et qui présentent les émissions de particules les plus élevées.

Focus sur les particules fines des PM

L'installation ICPE de 1650 kW équipée d'un filtre à manches (CH6), avec des émissions de particules très faibles, confirme l'abattement par ce type d'installation de toutes les particules de plus de 1 µm. L'électrofiltre permet lui aussi des émissions faibles mais avec des particules résiduelles de toutes tailles.

Pour les autres sites, équipés de technologies cycloniques, l'abattement est plus important pour les particules de diamètre < 10 µm (PM₁₀). On observe que les PM₁ sont majoritaires et représente entre 70 et 97 % des poussières.

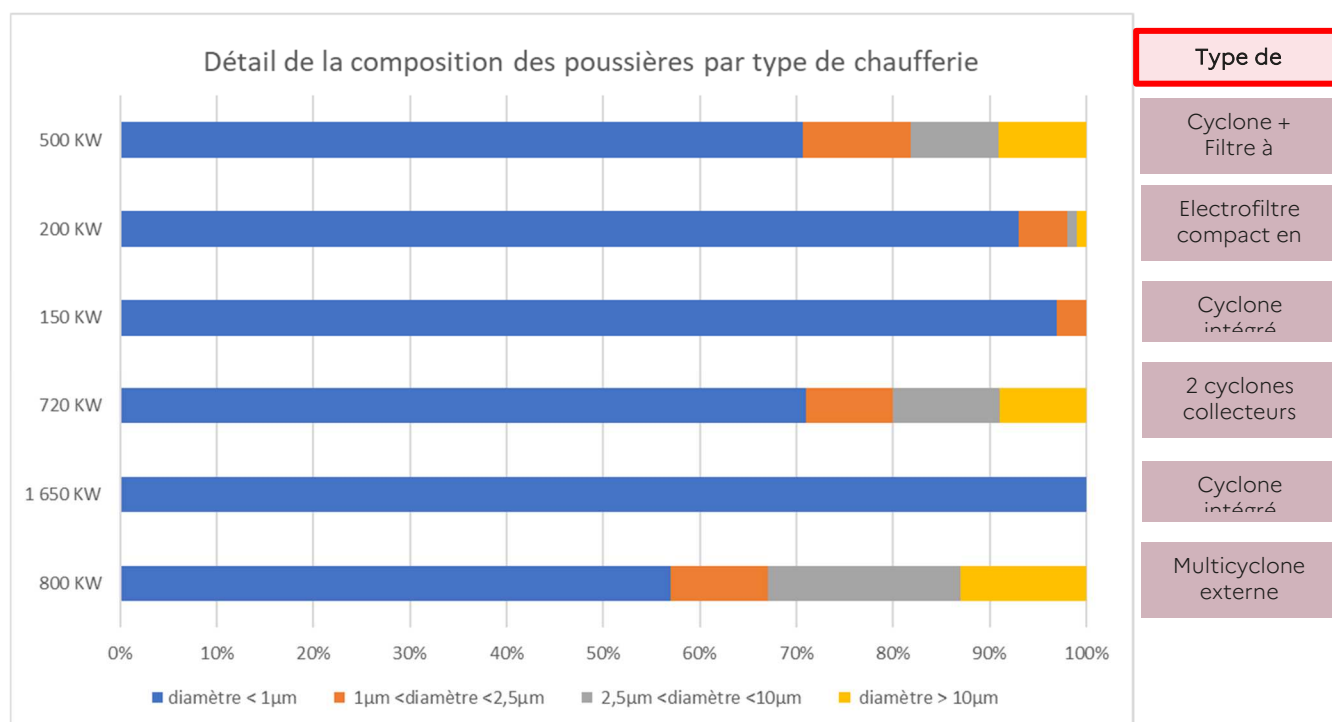


Figure 19 : Composition granulométrique des PM émises selon le type de chaudière

Fraction condensable

- Les résultats montrent que la contribution de la fraction condensable aux émissions totales de PM variait entre 2% et 20% selon les typologies de chaudière étudiées et leur régime de fonctionnement. La contribution des condensables aux TSP est la plus importante (16% et 19%) pour les chaudières 4 et 5.D e plus, contrairement à une chaudière fonctionnant à régime stabilisé et à charge nominale, une chaudière fonctionnant à charge réduite et qui cycle beaucoup (avec de nombreuses phases « arrêt/marche ») présentera des émissions de composés organiques plus importantes du fait d'une combustion dégradée.

Toute chose égale par ailleurs, les niveaux de concentrations de la fraction condensable des particules totales émises les chaudières étudiées restent faibles comparés aux niveaux de concentrations des particules solides. A

Ainsi, pour les chaudières étudiées et dans les conditions de tests, la contribution des condensables impacte peu les FE de TSP. Ces résultats restent toutefois à confirmer compte tenu du nombre limité de chaudières testées.

7. Comparaison des facteurs d'émissions issues des mesures à ceux utilisés par le Citepa

7.1 Facteurs d'émission des substances étudiées

En l'absence de données précises de consommations de bois pendant les essais ainsi que des pouvoirs calorifiques des combustibles utilisés, les coefficients de volume de gaz de combustion sec (DFGV) par défaut, présentés dans le tableau ci-dessous ont été utilisés pour convertir les concentrations mesurées en facteurs d'émission. Les autres caractéristiques des mesures effectuées utiles à l'analyse des résultats sont présentées. Les facteurs de conversion des mesures en concentrations vers les facteurs d'émission sont dépendants du taux en % O₂ réel, des unités utilisées et peuvent être supérieurs ou inférieurs à 1 000. Les systèmes de traitement de fumées couvrent principalement les particules et sont rappelés dans la partie dédiée.

Chaudières	Combustible	Humidité	Puissance	Facteur de charge	O ₂ (%)	DFGV à 10 % d'O ₂ (Nm ³ /GJ)	Facteur de conversion O ₂ réel (Nm ³ /GJ)	Commentaire
CH1	Plaquettes bocagères	25 %	150 kW	50 %	16,6	475,5	1 205	Chaudière surdimensionnée, fonctionnement par cycles « tout ou rien »
CH2	Bois d'élagage	30 %	200 kW	40 %	14,3	475,5	785	Fonctionnement par cycles « tout ou rien »
CH3	Plaquettes forestières	[20 - 30] %	500 kW	80 %	9,6	475,5	459	Mesures sur les condensables non réalisées
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	35 %	800 kW	30 %	12,7	518,6	689	Fonctionnement par cycles très courts autour du point de consigne
CH5	Plaquettes de scierie	[25 - 45] %	800 kW	50 %	12,9	475,5	648	Fonctionnement par cycles très courts autour du point de consigne
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	[30 - 35] %	1,65 MW	90 %	8,5	475,5	418	-

Tableau 15 : Condition de combustion des sites et coefficients de volume de gaz de combustion sec associés

7.2 Facteurs d'émission du monoxyde de carbone (CO)

Une fois les mesures de concentrations en CO converties en facteurs d'émission, les moyennes des résultats des campagnes de mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Chaudières	Combustible	Puissance	Facteur de charge	CO (mg/m ³)	CO (g/GJ)
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	50 %	1 017,6	1 227
CH2	Bois d'élagage	200 kW	40 %	1 099,9	864
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	80 %	373,9	171
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	30 %	4 875,2	3 361
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	50 %	498,6	323

CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	90 %	128,6	54
-----	--	---------	------	-------	----

Tableau 16 : Facteurs d'émissions moyens du CO par chaudières et conditions de combustion associées

Il apparaît que les émissions de monoxyde de carbone sont très fortement variables, entre 54 g/GJ et jusqu'à 3 361 g/GJ selon les chaudières. Ces niveaux d'émissions semblent être fortement liés aux facteurs de charge des différentes chaudières lors des tests. Plus celui-ci est faible, plus les émissions mesurées de CO sont élevées. C'est un paramètre qui peut donner des indications sur la qualité de la combustion lors des tests réalisés.

Ces résultats ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

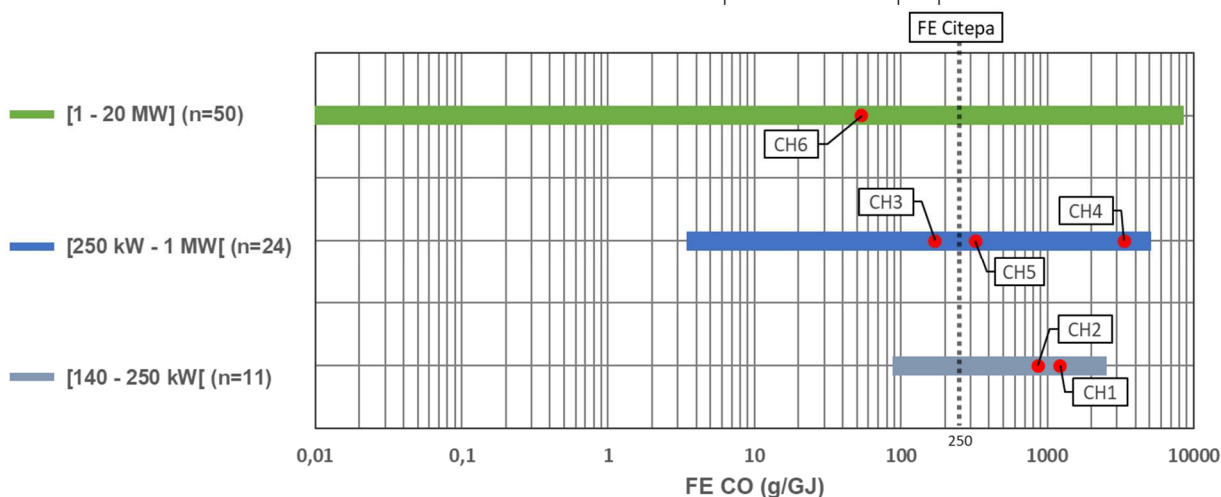


Figure 20 : Gammes de facteurs d'émission de CO par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Le nombre de points de mesures considérés (noté « n » dans les légendes des figures) est relativement élevé pour les deux intervalles de puissance considérés :

- 51 pour la gamme de puissance [1 - 20 MW] avec **103 g/GJ pour médiane** et **596 g/GJ pour moyenne** ;
- 40 pour la gamme de puissance [140 kW - 1 MW] avec **125 g/GJ pour médiane** et **585 g/GJ pour moyenne**.

Si dans les inventaires nationaux, les facteurs d'émission en CO utilisés pour la gamme de puissance [1-20 MW] paraissent adaptés, les petites chaudières de la campagne de mesure semblent être davantage émissives. Une solution intermédiaire pourrait consister à utiliser un facteur d'émission en CO de 435 g/GJ pour la gamme de puissance inférieure à 1 MW en accord avec les lignes directrices européennes¹².

7.3 Facteurs d'émission des oxydes d'azotes (NO_x)

Une fois les mesures de concentrations en NO_x converties en facteurs d'émission, les moyennes des résultats des campagnes de mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Chaudière	Combustible	Puissance	Facteur de charge	NO _x (mg/m ³)	NO _x (g/GJ)
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	50 %	120,1	145
CH2	Bois d'élagage	200 kW	40 %	157,8	124
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	80 %	179,1	82
CH4	Mélange de palettes SSD	800 kW	30 %	113,1	78

¹² EEA, «1a4 Small combustion - EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019, table 3.46.

	et de déchets verts (50/50)				
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	50 %	92,6	60
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	90 %	175,1	73

Tableau 17 : Facteurs d'émission moyens de NO_x par chaudière et conditions de combustion associées

Les niveaux d'émissions en oxydes d'azote se répartissent sur un intervalle assez restreint entre 60 et 145 g/GJ. Ces résultats ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émissions utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

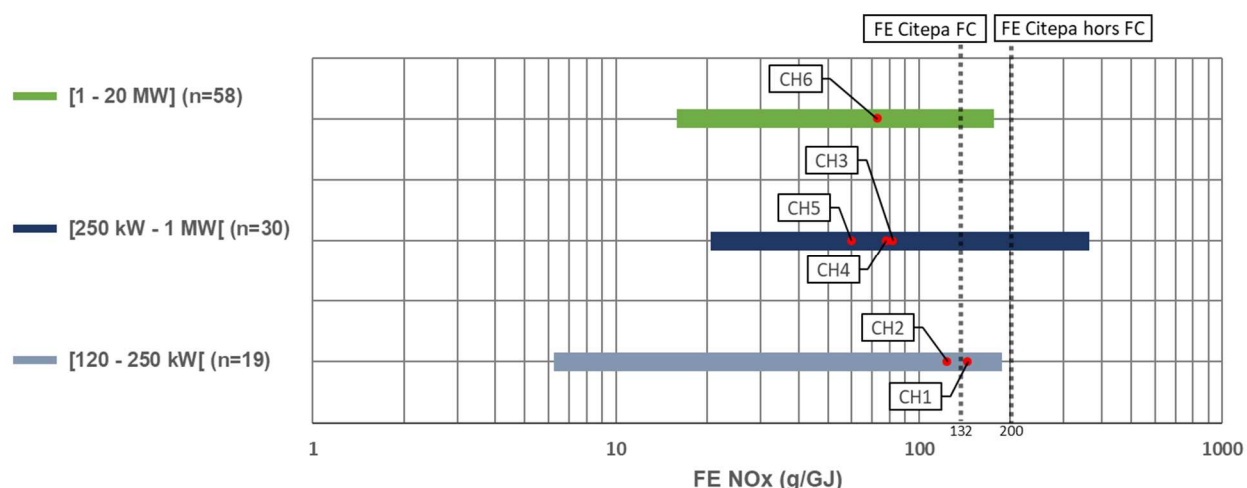


Figure 21 : Gamme de facteurs d'émission de NO_x par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Le nombre de points de mesures considérés (noté « n » dans les légendes des figures) est relativement élevé pour les deux intervalles de puissance considérés :

- 59 pour la gamme de puissance [1 - 20 MW] avec **65 g/GJ pour médiane** et **73 g/GJ pour moyenne** ;
- 54 pour la gamme de puissance [140 kW - 1 MW] avec **76 g/GJ pour médiane** et **83 g/GJ pour moyenne**.

Les différences entre les émissions observées entre les deux gammes de puissance ne sont pas significatives cependant le facteur d'émission utilisé pour les chaufferies du Fonds Chaleurs (132 g/GJ) repose sur de très nombreux rapports d'émissions (plus de 200 rapports sur plus de 100 chaufferies) et reste assurément représentatif.

En revanche, il semble pertinent d'abaisser le facteur d'émission actuellement utilisé (hors chaufferies Fonds Chaleur - 200 g/GJ) qui paraît assez élevé et qui pourrait être diminué à 132 g/GJ, la valeur utilisée pour les chaufferies couvertes par le Fonds Chaleur.

Pour les gammes de puissance inférieures à 1 MW et à l'inverse des autres polluants émis par la combustion, un facteur d'émission plus bas correspond à une production de NO_x thermique moins importante en lien direct avec les observations et les performances moindres de ces chaufferies. Pour ces chaufferies, il semble approprié d'utiliser un facteur d'émission de 80g/GJ entre la médiane et la moyenne observées.

7.4 Facteurs d'émission du dioxyde de soufre (SO₂)

Les émissions de dioxyde de soufre n'ont pas été mesurées dans le cadre de cette campagne d'essais. Le facteur d'émission actuellement utilisé (10 g/GJ) pour la gamme de puissance inférieure à 20 MW paraît cohérent (ordre de grandeur similaire) avec ce qui a été observé dans l'état de l'art bibliographique

(paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et il ne semble pas pertinent d'en proposer une évolution.

7.5 Facteurs d'émission de l'ammoniac (NH₃)

Les émissions d'ammoniac n'ont pas été mesurées dans le cadre de cette campagne d'essais. De plus, l'étude bibliographique n'a pas permis d'identifier des mesures réalisées sur des installations de puissance inférieure à 1 MW. Il n'est donc pas possible de réaliser une distinction selon les différentes gammes de puissance des chaufferies biomasse.

Le facteur d'émission utilisé dans les inventaires nationaux semble assez élevé (37 g/GJ) en comparaison de ce qui a été observé dans la littérature mais cela repose sur seulement deux études. Ainsi, cela ne permet pas de proposer une évolution suffisamment fiable du facteur d'émission actuellement utilisé.

7.6 Facteurs d'émission des Composés Organiques Volatils (COV)

Une fois les mesures de concentrations en COVT converties en facteurs d'émission, les moyennes des résultats des campagnes de mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous:

Chaudière	Combustible	Puissance	Facteur de charge	COVT (mgC/m ³)	COVT (g/GJ)
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	50 %	60,8	73
CH2	Bois d'élagage	200 kW	40 %	62,5	49
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	80 %	20,7	9
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	30 %	178,3	123
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	50 %	7,6	5
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	90 %	0,4	0,2

Tableau 18 : Facteurs d'émission moyens de COVT par chaudière et conditions de combustion associées

Les niveaux d'émissions en COVT se répartissent sur un intervalle entre 5 et 123 g/GJ, à l'exception du site CH6 qui atteint des niveaux d'émissions plus faibles (0,2 g/GJ). Le niveau d'émission plus élevé atteint lors de la campagne sur le site CH4 est à la fois lié au faible taux de charge ainsi qu'à la nature des combustibles utilisés. Les niveaux d'émissions importants des sites CH1 et CH2 sont liés au fonctionnement par cycle de ces chaufferies.

Ces résultats ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émissions utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution. La comparaison avec les facteurs d'émissions utilisés dans les inventaires nationaux doit être considérée avec prudence car non seulement les facteurs d'émissions présentés correspondent aux COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques) et non aux COV totaux mais également parce que les unités dans lesquels ceux-ci sont exprimés peuvent varier (équivalent Carbone, équivalent CH₄ ou total COVNM).

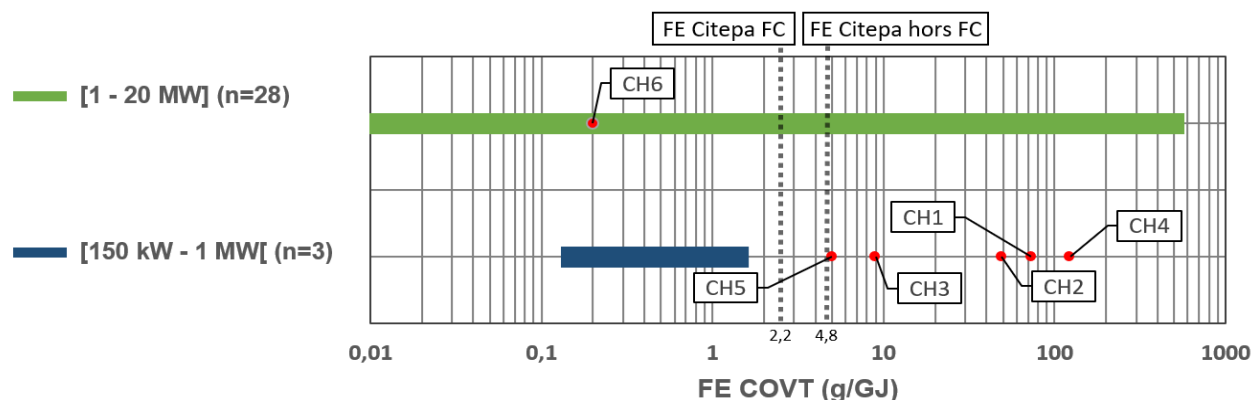


Figure 22 : Gammes de facteurs d'émission de COVT par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Si les résultats des campagnes de mesures se situent au-delà de l'intervalle de facteur d'émission observé pour les chaufferies de puissance inférieure à 1 MW, c'est davantage lié au faible nombre de point de mesure (noté « n » dans les légendes des figures) identifié dans l'étude bibliographique (paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) plutôt qu'à des cas qui seraient hors normes.

Le nombre de points de mesures considérés est contrasté entre les deux intervalles de puissance considérés, à savoir :

- 29 pour la gamme de puissance [1 - 20 MW] ;
- 8 seulement pour la gamme de puissance [140 kW - 1 MW] dont cinq issus de la campagne de mesure du projet CORTEA.

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **1 g/GJ** et la **moyenne** de **30 g/GJ**.

Si dans les inventaires nationaux, les facteurs d'émission en COVNM utilisés pour la gamme de puissance [1-20 MW] paraissent adaptés, les petites chaudières semblent être davantage émissives. Il paraît délicat de déduire un facteur d'émission à partir d'un si petit nombre de points de mesures. Une solution intermédiaire pourrait consister à utiliser un facteur d'émission en COVNM de 12 g/GJ pour la gamme de puissance inférieure à 1 MW en accord avec les lignes directrices européennes¹³.

7.7 Facteurs d'émission du méthane (CH₄)

Les émissions de méthane n'ont pas été spécifiquement mesurées, elles sont incluses parmi les COV totaux dans le cadre de cette campagne d'essais. De plus, l'étude bibliographique a seulement identifié un ensemble de six points de mesures réalisées sur des installations de puissance inférieure à 1 MW (parmi deux études). Il paraît peu pertinent d'en déduire un facteur d'émission spécifique à cette gamme de puissance.

Le facteur d'émission actuellement utilisé (3,2 g/GJ) pour la gamme de puissance inférieure à 20 MW paraît cohérent avec ce qui a été observé dans l'état de l'art bibliographique (paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et il ne semble pas pertinent d'en proposer une évolution.

7.8 Facteurs d'émission des particules

7.8.1 Total Suspended Particulate (TSP)

Une fois les mesures de concentrations en particules totales (solides et condensables) converties en facteurs d'émission, les moyennes des résultats des campagnes de mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous. Des mesures ont pu être effectuées à la fois sur les particules solides et sur les particules solides et condensables, à l'exception de la campagne de mesure sur CH3 qui ne mesure que la fraction solide.

Chaudière	Combustible	Puissance	Système de traitement de fumées	Facteur de charge	Solides et condensables		Condensables		Proportion condensable (%)
					TSP (mg/m ³)	TSP (g/GJ)	TSP (mg/m ³)	TSP (g/GJ)	
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	Multicyclone	50 %	140,5	169	23,9	29	17 %
CH2	Bois d'élagage	200 kW	Cyclone	40 %	66,6	52	29,2	23	44 %
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	Deux cyclones ACS	80 %	102,6 (SP)	47			
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	Cyclone	30 %	198,1	137	10,3	7	5 %

¹³ EEA, «1a4 Small combustion – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019, table 3.46.

CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	Filtre Heizoclean	50 %	47,9	31	7,4	5	15 %
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	Cyclone et filtre à manches	90 %	1,78	0,74	0,5	0,21	28 %

Tableau 19 : Facteurs d'émission moyens de TSP par chaudière et conditions de combustion associées

Les niveaux d'émissions en TSP (particules solides (SP pour « Solid Particles » dans la figure ci-dessous et condensables) se répartissent sur un intervalle assez restreint entre 31 et 169 g/GJ, à l'exception du site CH6 qui atteint des niveaux d'émissions bien plus faibles (0,74 g/GJ). Ceci est certainement dû à sa puissance plus importante ainsi qu'à la présence d'un filtre à manches sur ce site combiné à un cyclone. Il est délicat de comparer la part condensable des émissions de particules pour le site CH6 puisque les émissions sont très proches voire inférieures aux limites de quantifications des appareils de mesures.

De façon générale et en accord avec ce qui a été observé dans la revue bibliographique, on observe que la part condensable dans les émissions de particules des chaufferies biomasse de petites et moyenne puissances n'est pas prépondérante et ne revêt pas l'importance qu'elle peut avoir dans le cadre des estimations des émissions du bois domestique. On peut considérer dans la suite de ce paragraphe que les facteurs d'émission proposés couvrent bien les particules condensables.

Ces résultats ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émissions utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

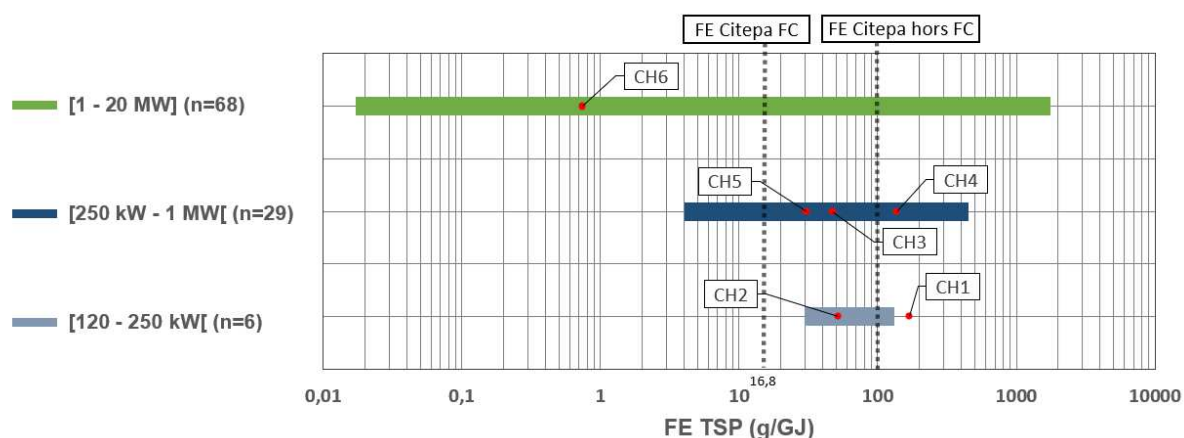


Figure 23 : Gamme de facteurs d'émission des TSP par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Le nombre de points de mesures considérés (noté « n » dans les légendes des figures) est important pour les deux intervalles de puissance considérés, à savoir :

- 70 pour la gamme de puissance [1 - 20 MW] avec **38 g/GJ pour médiane** et **72 g/GJ pour moyenne** ;
- 40 pour la gamme de puissance [120 kW - 1 MW] avec **65 g/GJ pour médiane** et **113 g/GJ pour moyenne**.

Les différences qui transparaissent entre les niveaux d'émissions des deux gammes de puissances considérées sont directement corrélées à la qualité de la combustion et aux systèmes de traitement des fumées mis en place par les chaufferies. Ces systèmes sont en général plus performants pour les installations de puissance plus importante qui sont soumises à des exigences réglementaires.

Pour la gamme de puissance inférieure à 1 MW, d'après la moyenne et la médiane des facteurs d'émission observés parmi les points de mesures, il paraît pertinent d'utiliser un facteur d'émission moyen de 100 g/GJ pour ces installations. Cela serait en cohérence avec les lignes directrices européennes (EMEP/EEA air

polluant emission inventory guidebook 2019) pour cette catégorie d'installation sachant que cet ordre de grandeur inclut bien la part condensable des émissions de particules totales.

7.8.2 PM₁₀

Les données de granulométrie des PM₁₀ issues des campagnes de mesures sont directement indiquées en % et ne nécessitent pas de conversion particulière. Les résultats moyens sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Chaudière	Combustible	Puissance	Système de traitement de fumées	Facteur de charge	PM ₁₀ /TSP (%)
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	Multicyclone	50 %	100 %
CH2	Bois d'élagage	200 kW	Cyclone	40 %	99 %
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	Deux cyclones ACS	80 %	93 %
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	Cyclone	30 %	91 %
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	Filtre Heizoclean	50 %	87 %
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	Cyclone et filtre à manches	90 %	100 %

Tableau 20 : Granulométrie moyenne des PM₁₀ par chaudière et conditions de combustion associées

La granulométrie observée des PM₁₀ au sein des TSP varie entre 87 % et 100 %, en cohérence avec ce qui avait été observé dans l'étude bibliographique (paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), à savoir entre 88 % et 100 %. Les inventaires nationaux utilisent des granulométries en PM₁₀ situées entre 78 % et 95 % selon les secteurs considérés. Une meilleure connaissance des équipements de traitements des fumées utilisés dans tel ou tel secteur (chauffage urbain, industrie, tertiaire, agriculture) devrait permettre d'améliorer la précision de ces hypothèses granulométriques.

Peu d'études couvrent spécifiquement la granulométrie des PM₁₀ au sein des TSP mais les niveaux d'émissions résultant dans les inventaires nationaux sont bien cohérents avec ce qui est observé dans la littérature. De plus, au vu de l'étendue des niveaux de granulométries possibles et puisque les niveaux d'émissions sont déjà différenciés par le facteur d'émission en TSP, il ne semble pas nécessaire d'associer une granulométrie spécifique à la gamme de puissance inférieure à 1 MW.

7.8.3 PM_{2,5}

Les données de granulométrie des PM_{2,5} issues des campagnes de mesures sont directement indiquées en % et ne nécessitent pas de conversion particulière. Les résultats moyens sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Chaudière	Combustible	Puissance	Système de traitement de fumées	Facteur de charge	PM _{2,5} /TSP (%)
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	Multicyclone	50 %	100 %
CH2	Bois d'élagage	200 kW	Cyclone	40 %	98 %
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	Deux cyclones ACS	80 %	85 %
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	Cyclone	30 %	80 %
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	Petit électrofiltre en ligne	50 %	67 %
CH6	Mélange de bois d'élagage et de	1,65 MW	Cyclone et filtre à manches	90 %	100 %

	plaquettes forestières (50/50)				
--	-----------------------------------	--	--	--	--

Tableau 21 : Granulométrie moyenne des PM_{2,5} par chaudière et conditions de combustion associées

La gamme des granulométries des PM_{2,5} au sein des TSP est plus étendue, entre 67 % et 100 % selon les sites. Les sites équipés de systèmes de traitements de fumées plus efficaces présentent un niveau de granulométrie fine plus important (en %) mais sur une quantité plus faible de TSP émise au total.

Très peu d'études identifiées couvrent spécifiquement la granulométrie des PM_{2,5} au sein des TSP ou même directement les émissions de PM_{2,5} (deux seulement). Les inventaires nationaux utilisent des granulométries en PM_{2,5} situées entre 61 % et 93 % selon les secteurs considérés. Une meilleure connaissance des équipements de traitements des fumées utilisés dans tel ou tel secteur (chauffage urbain, industrie, tertiaire, agriculture) devrait permettre d'améliorer la précision de ces hypothèses granulométriques.

Au vu de l'étendue des niveaux de granulométries possibles et puisque les niveaux d'émissions sont déjà différenciés par le facteur d'émission en TSP, il ne semble pas nécessaire d'associer une granulométrie spécifique à la gamme de puissance inférieure à 1 MW.

7.8.4 PM_{1,0}

Les données de granulométrie des PM_{1,0} issues des campagnes de mesures sont directement indiquées en % et ne nécessitent pas de conversion particulière. Les résultats moyens sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Chaudière	Combustible	Puissance	Système de traitement de fumées	Facteur de charge	PM ₁ /TSP (%)
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	Multicyclone	50 %	97 %
CH2	Bois d'élagage	200 kW	Cyclone	40 %	93 %
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	Deux cyclones ACS	80 %	75 %
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	Cyclone	30 %	71 %
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	Petit électrofiltre en ligne	50 %	57 %
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	Cyclone et filtre à manches	90 %	100 %

Tableau 22 : Granulométrie moyenne des PM_{1,0} par chaudière et conditions de combustion associées

La gamme des granulométries des PM_{1,0} au sein des TSP est beaucoup plus étendue, entre 57 % et 100 % selon les sites.

L'efficacité des filtres à manches étant très élevée, l'ensemble des particules restantes après traitement des fumées sur le site CH6 ont un diamètre moyen observé inférieur à 1 µm. Les inventaires nationaux ne couvrent les émissions de PM_{1,0} qu'à titre indicatif, utilisant une granulométrie située entre 48 % et 75 % selon les secteurs considérés.

7.8.5 PM_{0,1}

Les émissions de PM_{0,1} n'ont pas été spécifiquement mesurées dans les poussières dans le cadre de cette campagne d'essais. De plus, ces émissions ne sont pas couvertes par les inventaires nationaux d'émissions.

7.8.6 Carbone suie ou Black Carbon (BC)

Une fois les mesures de concentrations en Carbone Suie ou Black Carbon, assimilé à l'Elemental Carbon (EC), converties en facteurs d'émission, les moyennes des résultats des campagnes de mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous:

Chaudière	Combustible	Puissance	Facteur de charge	O ₂ de référence	OC (mg/m ³)	BC (mg/m ³)	BC (mg/GJ)	% PM _{2,5} - solides	% PM _{2,5} - totales
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	50 %	10 %	58,38	2,30	1 094	0,7 %	0,6 %
CH2	Bois d'élagage	200 kW	40 %	10 %	3,24	0,20	95	0,2 %	0,2 %
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	80 %	11 %	0,64	2,25	1 178	2,9 %	-
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	30 %	11 %	5,92	1,20	685	0,7 %	0,6 %
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	50 %	11 %	1,24	5,56	2 911	16 %	14 %
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	90 %	6 %	0,01	0,00	-	-	-

Tableau 23 : Facteurs d'émission moyens de Black Carbon par chaudière et conditions de combustion associées

Les mesures réalisées sur le site CH6 n'ont pas permis de quantifier le Black Carbon dans les fumées lors de la campagne et seulement 0,01 mg/Nm³ d'Organic Carbon (OC) ont été mesurés. Pour les autres chaudières de puissance plus modestes, les émissions de Black Carbon s'échelonnent sur un intervalle assez large, entre 95 mg/GJ et 2 911 mg/GJ.

Comparées en proportions des PM_{2,5} solides, celles-ci constituent entre 0,2 % et 2,9 %. Une proportion beaucoup plus importante a été calculée (16 % des PM_{2,5} solides, 14 % des PM_{2,5} totales) pour le site de CH5 pour lequel on observe à la fois un faible niveau d'émissions de particules, une proportion réduite de PM_{2,5} au sein des TSP et un niveau élevé d'Elemental Carbon mesuré.

Ces résultats ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

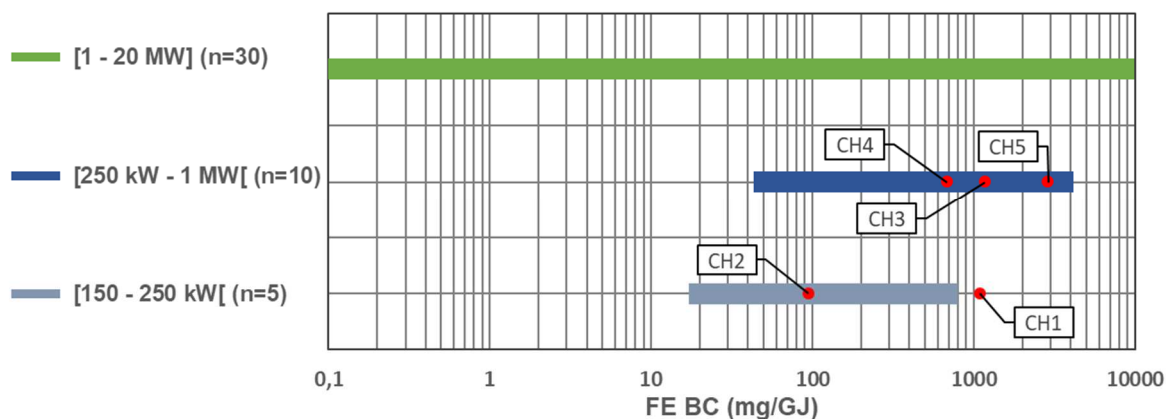


Figure 24 : Gammes de facteurs d'émission de Black Carbon par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Le nombre de points de mesures (noté « n » dans les légendes des figures) considérés (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) est proche pour les deux intervalles de puissance considérés, à savoir :

- 28 pour la gamme de puissance [1 - 20 MW] avec **107 mg/GJ pour médiane** et **1 487 mg/GJ pour moyenne** ;
- 20 pour la gamme de puissance [120 kW - 1 MW] avec **230 mg/GJ pour médiane** et **756 mg/GJ pour moyenne**.

Malgré les très faibles concentrations mesurées pour la chaudière CH6, la différence entre les médianes et moyennes observées ne paraît pas suffisamment marquée pour justifier une distinction entre les deux gammes de puissance.

Dans les inventaires nationaux, les émissions de Black Carbon sont déterminées à partir d'un pourcentage des PM_{2,5} et non directement d'un facteur d'émission en g/GJ. Les proportions en BC utilisées varient selon le secteur considéré :

- 3,3 % pour le secteur du chauffage urbain ;
- 28 % pour les secteurs tertiaire, agricole et de l'industrie manufacturière.

En cohérence avec les observations de l'état de l'art bibliographique, avec la campagne de mesure et avec les lignes directrices européennes (EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019), il semble pertinent d'utiliser une granulométrie plus faible pour les secteurs tertiaire, agricole et industriel. Les lignes directrices européennes¹⁴ proposent une valeur intermédiaire cohérente de 15 % de BC parmi les PM_{2,5} totales.

7.9 Facteurs d'émission des métaux

Une fois les mesures de concentrations en métaux lourds converties en facteurs d'émission, les moyennes des résultats des campagnes de mesures sont présentées dans le Tableau 24:

Parmi les émissions de métaux mesurées, la chaudière la moins émissive est de loin celle de CH6. Parmi les chaudières de puissance inférieure à 1 MW, le site de CH2 est le moins émissif quelque que soit le métal considéré.

Toutes chaudières confondues, le zinc et le manganèse sont les deux métaux les plus émis en masse suivi par le plomb.

Chaudière	Combustible	Puissance	Facteur de charge	ML (mg/GJ)								
				As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	V	Pb	Zn
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	50 %	87	8,3	11	50	232	67	0,8	60	1 831
CH2	Bois d'élagage	200 kW	40 %	1,4	1,2	1,9	11	47	0,9	0,2	12	303
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	80 %	15	25	4,6	63	164	29	13	181	3 431
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	30 %	22	3,7	33	88	63	5,3	1,2	127	867
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	50 %	3,5	3,1	10	17	181	10	0,3	240	309
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	90 %	0,2	0,3	0,5	0,9	0,5	1,0	0,2	0,7	5,4

Tableau 24 : Facteurs d'émission moyens de métaux lourds par chaudière et conditions de combustion associées

Pour l'ensemble des métaux, si les résultats des campagnes de mesures se situent au-delà de l'intervalle de facteur d'émission observé pour les chaudières de puissance inférieure à 1 MW, c'est davantage lié au

¹⁴ EEA, «1a4 Small combustion – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019, table 3.48.

faible nombre de point de mesure identifié dans l'étude bibliographique plutôt qu'à des cas qui seraient hors normes.

7.9.1 Plomb

Les résultats pour le plomb ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

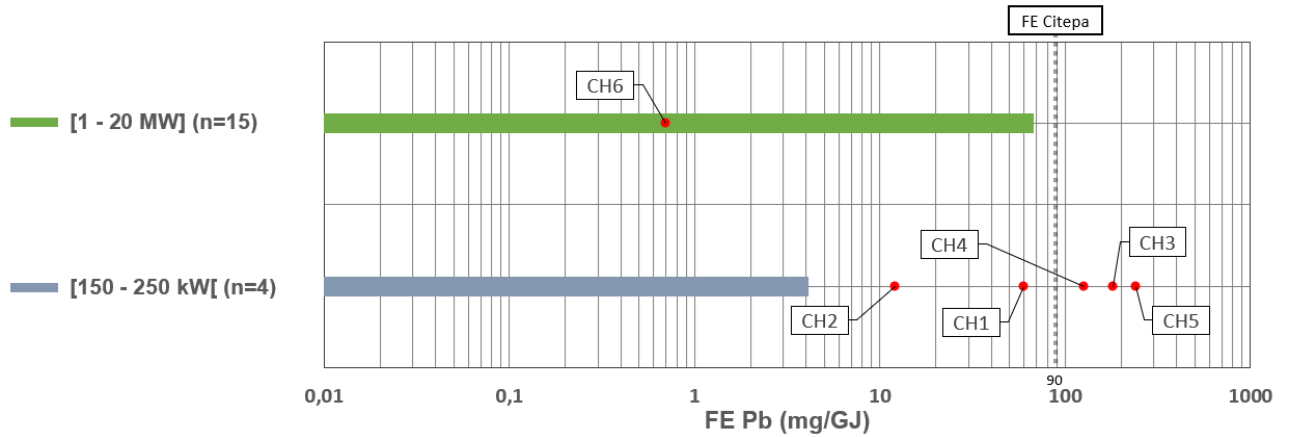


Figure 25 : Gammes de facteurs d'émission de plomb par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **8 mg/GJ** et la **moyenne** de **32 mg/GJ**.

Il semble pertinent d'utiliser un facteur d'émission pour le plomb un peu plus bas que celui utilisé actuellement (90 mg/GJ). Ainsi le passage à un facteur d'émission en Pb de 32 g/GJ moyenne observée sur les valeurs de l'étude bibliographique et les campagnes de mesures, paraît approprié. Cette valeur est cohérente avec les lignes directrices européennes¹⁵ (27 mg/GJ).

7.9.2 Cadmium

Les résultats pour le cadmium ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

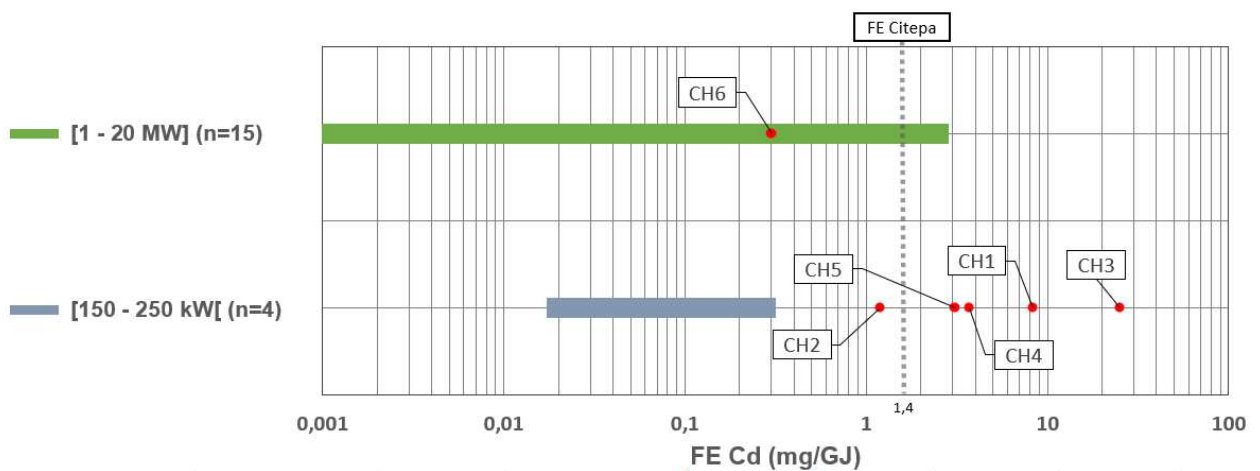


Figure 26 : Gammes de facteurs d'émission de cadmium par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **0,3 mg/GJ** et la **moyenne** de **2 mg/GJ**.

¹⁵ EEA, «1a4 Small combustion – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019, table 3.10.

En comparaison, la valeur de 1,4 mg/GJ actuellement considérée dans les inventaires d'émissions, située entre la médiane et la moyenne observées, paraît adaptée.

7.9.3 Arsenic

Les résultats pour l'arsenic ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

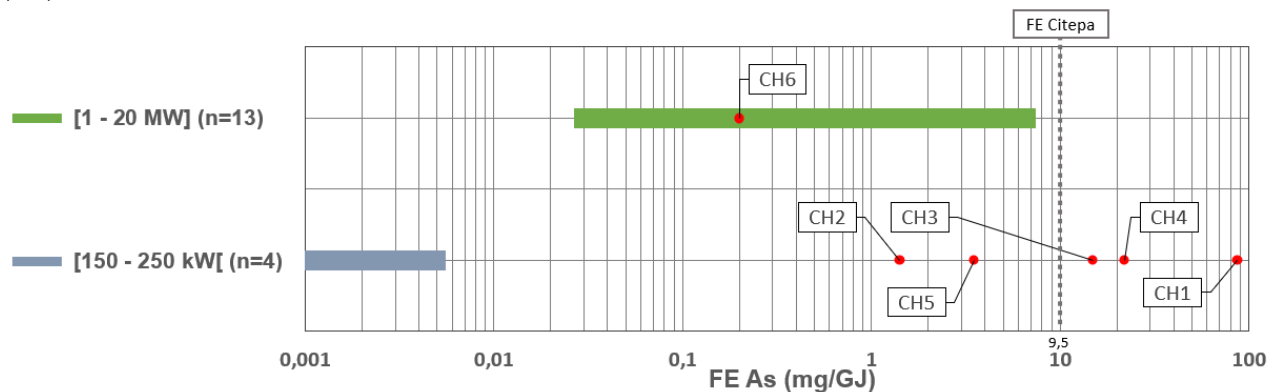


Figure 27 : Gammes de facteurs d'émission d'arsenic par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **0,4 mg/GJ** et la **moyenne** de **7 mg/GJ**.

Il semble pertinent d'utiliser un facteur d'émission pour l'arsenic un peu plus bas que celui utilisé actuellement (9,5 mg/GJ). Ainsi le passage à un facteur d'émission en As de 7 mg/GJ, moyenne observée sur les valeurs de l'étude bibliographique et les campagnes de mesures, paraît approprié. Ce changement ne représente pas une évolution significative.

7.9.4 Nickel

Les résultats pour le nickel ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

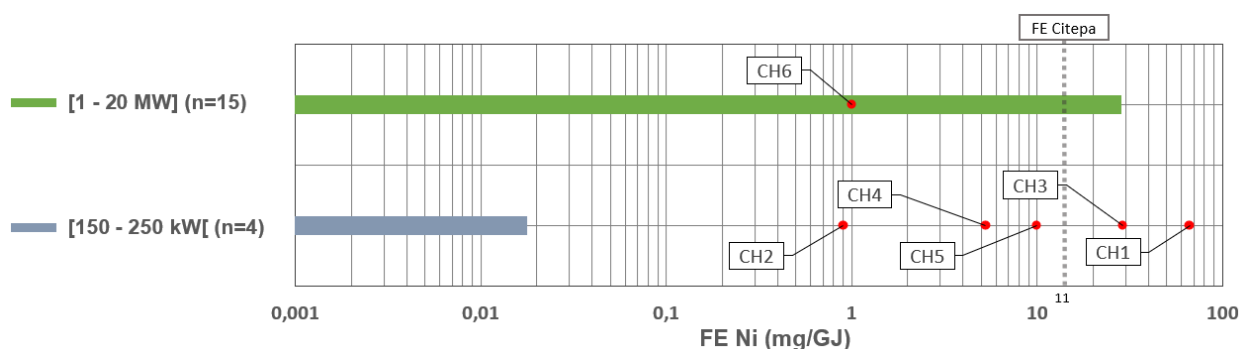


Figure 28 : Gammes de facteurs d'émission de nickel par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **2 mg/GJ** et la **moyenne** de **8 mg/GJ**.

Il semble pertinent d'utiliser un facteur d'émission pour le nickel un peu plus bas que celui utilisé actuellement (11 mg/GJ). Ainsi le passage à un facteur d'émission en Ni de 8 mg/GJ, moyenne observée sur les valeurs de l'étude bibliographique et les campagnes de mesures, paraît approprié. Ce changement ne représente pas une évolution significative.

7.9.5 Cuivre

Les résultats pour le cuivre ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

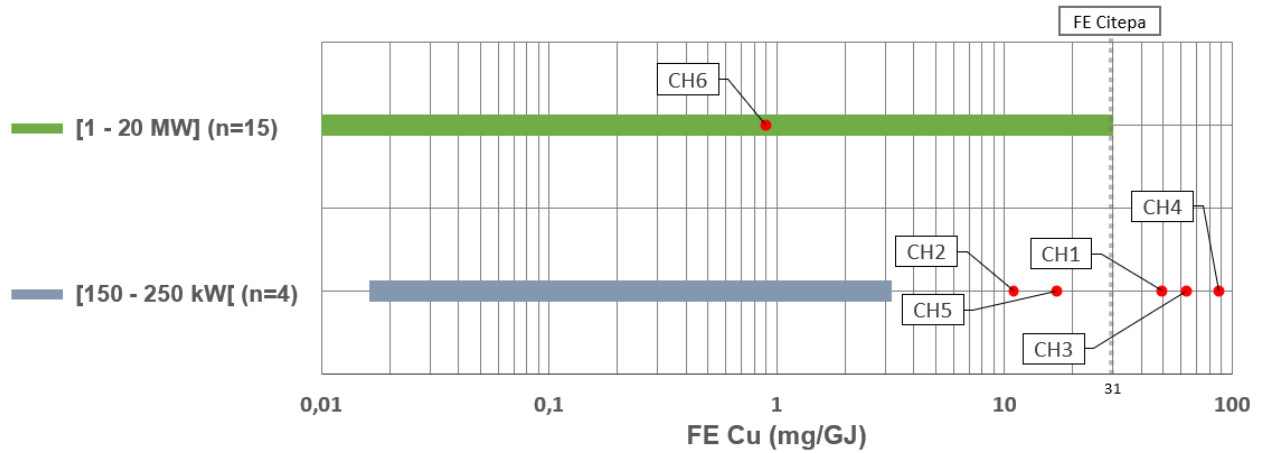


Figure 29 : Gammes de facteurs d'émission de cuivre par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **9 mg/GJ** et la **moyenne** de **15 mg/GJ**.

Il semble pertinent d'utiliser un facteur d'émission pour le cuivre un peu plus bas que celui utilisé actuellement (31 mg/GJ). Ainsi le passage à un facteur d'émission en Cu de 15 g/GJ, moyenne observée sur les valeurs de l'étude bibliographique et les campagnes de mesures, paraît approprié. Ce changement ne représente pas une évolution significative.

7.9.6 Zinc

Les résultats pour le zinc ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

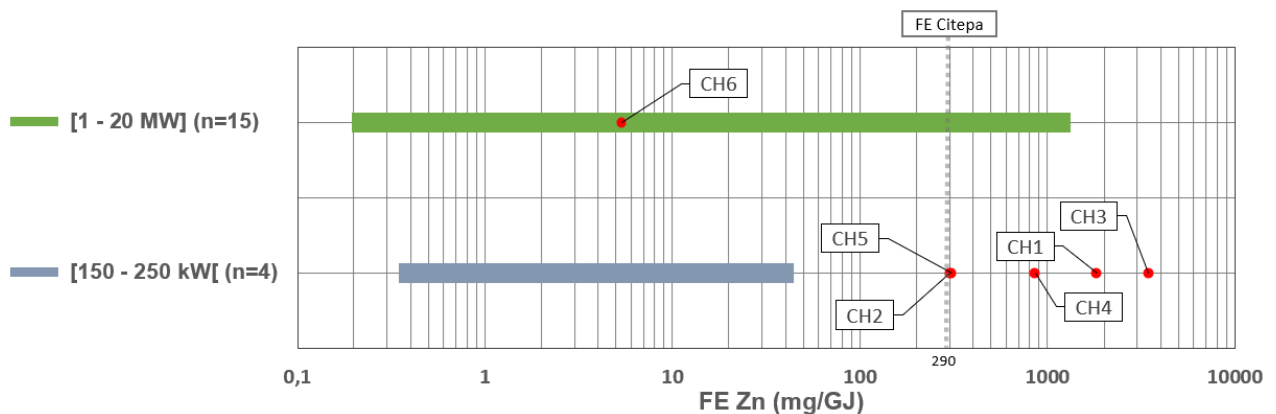


Figure 30 : Gammes de facteurs d'émission de zinc par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **68 mg/GJ** et la **moyenne** de **431 mg/GJ**.

En comparaison, la valeur de 290 mg/GJ actuellement considérée dans les inventaires d'émissions, située entre la médiane et la moyenne observées, paraît adaptée.

7.9.7 Chrome

Les résultats pour le chrome ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émission utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

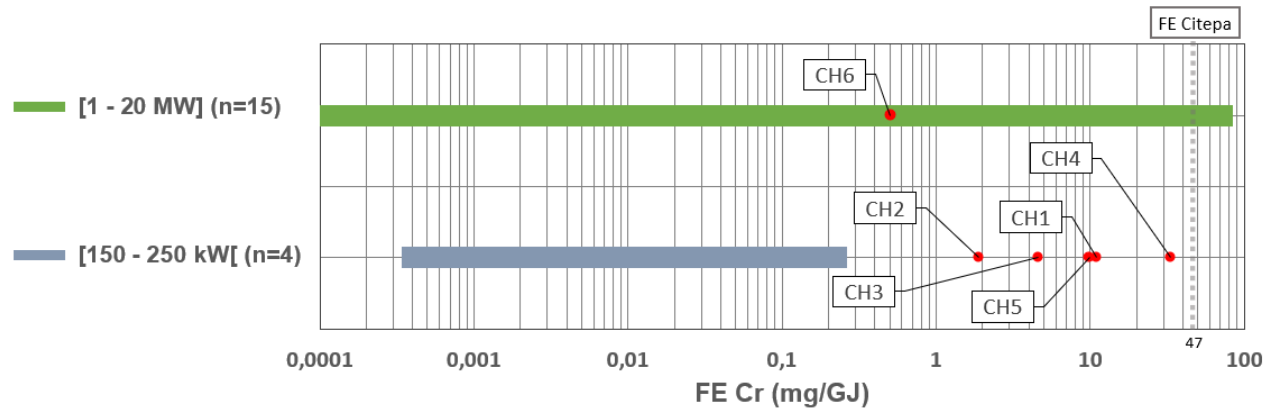


Figure 31 : Gammes de facteurs d'émission de chrome par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **2 mg/GJ** et la **moyenne** de **9 mg/GJ**.

Il semble pertinent d'utiliser un facteur d'émission pour le chrome un peu plus bas que celui utilisé actuellement (47 mg/GJ). Ainsi le passage à un facteur d'émission en Ni de 23 g/GJ provenant des lignes directrices européennes¹⁶ paraît réaliser un compromis à la baisse acceptable avec la médiane et la moyenne observées.

7.9.8 Vanadium

Les résultats pour le vanadium ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique seulement à titre informatif car ce métal n'est pas couvert dans les inventaires nationaux.

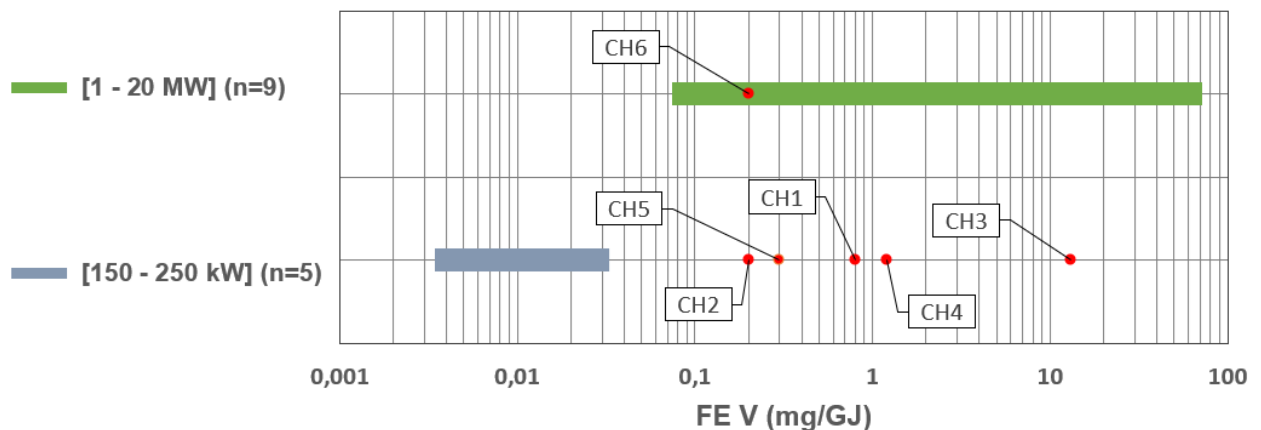


Figure 32 : Gammes de facteurs d'émission de vanadium par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **0,3 mg/GJ** et la **moyenne** de **6 mg/GJ**.

¹⁶ EEA, «1a4 Small combustion – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019, table 3.10.

7.9.9 Manganèse

Les résultats pour le manganèse ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique seulement à titre informatif car ce métal n'est pas couvert dans les inventaires nationaux.

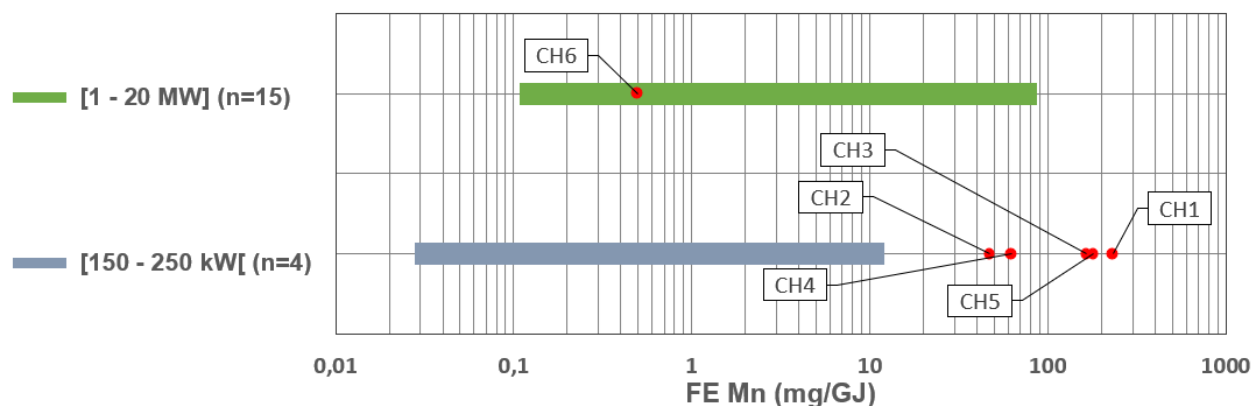


Figure 33 : Gammes de facteurs d'émission de manganèse par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la médiane observée est de 9 mg/GJ et la moyenne de 42 mg/GJ.

7.9.10 Synthèse Métaux Lourds

Dans l'étude bibliographique (paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), seules deux études couvrant les métaux pour la gamme de puissance spécifique inférieure à 1 MW ont été identifiées. Il paraît délicat d'en déduire des facteurs d'émission représentatifs pour cette gamme de puissance. Les évolutions des facteurs d'émission proposé couvrent donc l'ensembles des chaufferies bois inférieures et supérieures à 1 MW en puissance.

De plus, cet état de l'art permet de mettre en évidence qu'une partie de ces facteurs d'émission semble un peu trop élevée dans les inventaires nationaux (notamment pour le plomb, l'arsenic, le cuivre ou le chrome).

Le tableau ci-dessous résume les évolutions proposées indépendamment des gammes de puissances des chaufferies biomasse :

Métaux Lourds	Facteur d'émission actuel	Facteur d'émission moyen	Facteur d'émission médian	Lignes Directrices EMEP/EEA 2019	Facteur d'émission proposé
	mg/GJ				
Pb	90	32	8	27	32
Cd	1,4	0,3	2	13	Pas d'évolution proposée
As	9,5	7	0,4	0,19	7
Ni	11	8	2	2	8
Cu	31	15	9	6	15
Zn	290	431	68	512	Pas d'évolution proposée
Cr	47	9,1	2	23	23
V	Non couverts dans les inventaires nationaux				
Mn	Non couverts dans les inventaires nationaux				

Tableau 25 : Proposition d'évolution des facteurs d'émission en métaux lourds

Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus constituent une baisse des facteurs d'émission utilisés, soit en utilisant le facteur moyen observé dans l'étude bibliographique soit la valeur proposée dans les lignes directrices européennes¹⁷, en choisissant la plus conservatrice des deux.

7.10 Facteurs d'émission des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les émissions spécifiques des 8 HAP couverts dans les inventaires nationaux ont été mesurées dans le cadre de cette campagne d'essais. Une fois les mesures de concentrations en HAP converties en facteurs d'émission, les moyennes des résultats des campagnes de mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Chaudière	Combustible	Puissance	Facteur de charge	O ₂ de référence	8 HAP (µg/m ³)	8 HAP (mg/GJ)
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	50 %	10 %	129,5	62
CH2	Bois d'élagage	200 kW	40 %	10 %	39,9	19
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	80 %	11 %	13,7	7,2
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	30 %	11 %	226,7	129
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	50 %	11 %	1,1	0,6
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	90 %	6 %	0,081	0,028

Tableau 26 : Facteurs d'émission moyens de la somme des 8 HAP par chaudière et conditions de combustion associées

Les résultats pour les 8 HAP ont été comparés aux données issues de l'étude bibliographique et aux facteurs d'émissions utilisés dans les inventaires nationaux afin de déterminer s'il était pertinent d'en proposer une évolution.

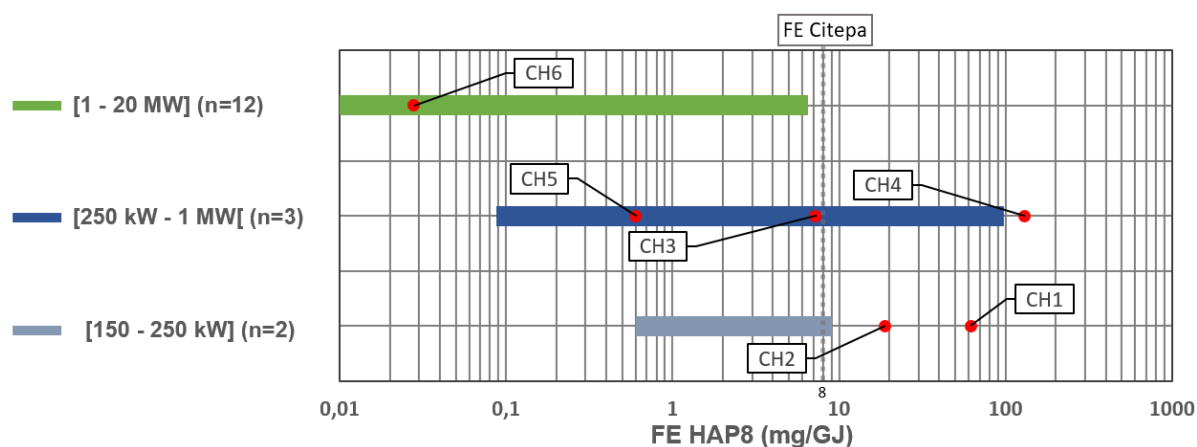


Figure 34 : Gamme de facteurs d'émission des 8HAP par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure

Sur l'ensemble de ces deux gammes de puissance, la **médiane** observée est de **0,3 mg/GJ** et la **moyenne** de **10,7 mg/GJ**.

Si les résultats des campagnes de mesures se situent en-deçà de l'intervalle de facteurs d'émission observé pour les chaufferies de puissance inférieure à 1 MW, c'est davantage lié au faible nombre de points de mesure (noté « n » dans les légendes des figures) identifié dans l'étude bibliographique (paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) plutôt qu'à des cas qui seraient hors normes. Seules trois études couvrant les 8 HAP pour la gamme de puissance spécifique inférieure à 1 MW ont été identifiées. Il paraît délicat d'en déduire des facteurs d'émission représentatifs.

¹⁷ EEA, «1a4 Small combustion – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019, table 3.10.

En revanche, cet état de l'art et les campagnes de mesures permettent de mettre en évidence que ces facteurs d'émission semblent cohérents avec ceux utilisés dans les inventaires nationaux.

Les différentes proportions mesurées des 8HAP couverts par l'inventaire national sont présentées dans le tableau ci-dessous:

chaudière	Combustible	Puissance	Facteur de charge	Proportion par HAP (en %)								8 HAP (mg/GJ)
				Bbf	Bkf	Bap	IndPy	FluorA	Baa	BahA	BghiPe	
CH1	Plaquettes bocagères	150 kW	50 %	8%	3%	5%	4%	68%	8%	0,1%	4%	62
CH2	Bois d'élagage	200 kW	40 %	5%	8%	3%	6%	66%	5%	5%	0,05%	19
CH3	Plaquettes forestières	500 kW	80 %	8%	3%	4%	2%	68%	11%	0,2%	4%	7,2
CH4	Mélange de palettes SSD et de déchets verts (50/50)	800 kW	30 %	22 %	8%	13%	14%	2%	15%	1%	26%	129
CH5	Plaquettes de scierie	800 kW	50 %	9%	2%	2%	4%	71%	4%	1%	6%	0,6
CH6	Mélange de bois d'élagage et de plaquettes forestières (50/50)	1,65 MW	90 %	12%	5%	5%	11%	35%	24%	1%	7%	0,028
Proportions dans l'inventaire national (en %)												Total
Chauffage urbain, Industrie et Agriculture				14%	4%	6%	26%	38%	3%	3%	6%	7,8
Tertiaire				10%	6%	9%	5%	54%	14%	1%	3%	8

Tableau 27: Proportions observées des 8 HAP par chaudière et conditions de combustion associées

Les proportions parmi les 8 HAP couverts dans les inventaires nationaux sont relativement comparables pour l'ensemble des chaudières couvertes par la campagne de mesure, à l'exception notable de celles des Quatre Routes du Lot :

- Pour le benzo(b)fluoranthène (Bbf), entre 5 et 12 % (22 % pour la chaudière des Quatre Route du Lot) ;
- Pour le benzo(k)fluoranthène (Bkf), entre 2 et 8 % ;
- Pour le benzo(a)pyrène (Bap), entre 2 et 5 % (13 % pour la chaudière des Quatre Route du Lot) ;
- Pour l'indéno(1,2,3cd)pyrène (IndPy), entre 2 et 14 % ;
- Pour le fluoranthène (FluorA), entre 35 et 71 % (2 % pour la chaudière des Quatre Route du Lot) ;
- Pour le benzo(a)anthracène (Baa), entre 4 et 24 % ;
- Pour le dibenzo(a,h)anthracène(BahA), entre 0,1 et 5 % ;
- Pour le benzo (g,h,i)pérylène (BghiPe), entre 0,05 et 7 % (26 % pour la chaudière des Quatre Route du Lot).

Dans les inventaires nationaux, les proportions entre ces HAP sont cohérentes (ie. situées dans les intervalles observés ou proches de ces intervalles) pour presque tous les polluants. Seule la proportion de l'IndPy utilisée dans les secteurs du chauffage urbain de l'industrie et du tertiaire paraît trop élevée : 26 % alors qu'elle ne dépasse pas 14 % sur l'ensemble des sites de la campagne de mesure. Il pourrait être pertinent de rééquilibrer les proportions de IndPy et de FluorA dans les inventaires nationaux.

Facteurs d'émission des dioxines et furannes (PCDD/F)

Les émissions de dioxines et furannes n'ont pas été mesurées dans le cadre de cette campagne d'essais.

Le nombre de points de mesures provenant de l'étude bibliographique est similaire entre les deux intervalles de puissance considérés, à savoir :

- 25 (20 hors déchets de bois) pour la gamme de puissance [1 - 20 MW] ;
- 24 (12 seulement hors déchets de bois) pour la gamme de puissance [150 kW - 1 MW].

Ce sont les combustibles biomasse identifiés comme ayant été traités qui sont les plus émetteurs de dioxines et furannes, davantage que la gamme de puissance considérée. Si ces combustibles spécifiques sont exclus du calcul au titre qu'ils devraient être incinérés dans des installations adaptées (incinérateurs), **la moyenne et la médiane** des points de mesures provenant de l'étude bibliographique sont respectivement de **78 ng I-TEQ/GJ** et **11 ng I-TEQ/GJ**.

En comparaison, la valeur de 40 ng I-TEQ/GJ actuellement considérée dans les inventaires d'émissions paraît adaptée.

7.11 Conclusion

Les différents résultats des campagnes de mesures ainsi que l'importante revue bibliographique sur les émissions des chaudières biomasse de puissance inférieure à 20 MW a permis de proposer une évolution méthodologique des facteurs d'émissions résumée dans le tableau ci-dessous.

Polluants	Couvert par la campagne de mesure	Synthèse Bibliographie et Campagnes de mesure				Facteur d'émission proposé		Facteurs d'émission dans l'édition 2022 des inventaires nationaux
		< 1 MW	[1 - 20 MW]	< 1 MW	[1 - 20 MW]	< 1 MW	[1 - 20 MW]	
		Médiane		Moyenne				< 20 MW
CO	Oui	125 g/GJ	103 g/GJ	585 g/GJ	596 g/GJ	435 g/GJ	<i>Pas d'évolution proposée</i>	250 g/GJ
NO _x	Oui	73 g/GJ	65 g/GJ	83 g/GJ	76 g/GJ	80 g/GJ	132 g/GJ	132 g/GJ (FC) et 200 g/GJ (hors FC)
SO ₂	Non	<i>Pas d'évolution proposée</i>						10 g/GJ
NH ₃	Non	<i>Pas d'évolution proposée</i>						37 g/GJ
COVM	COV totaux	1 g/GJ		30 g/GJ		12 g/GJ	<i>Pas d'évolution proposée</i>	2,2 g/GJ (FC) et 4,8 g/GJ (hors FC)
CH ₄	Non	<i>Pas d'évolution proposée</i>						3,2 g/GJ
TSP	Oui	65 g/GJ	38 g/GJ	113 g/GJ	72 g/GJ	100 g/GJ	<i>Pas d'évolution proposée</i>	16,8 g/GJ et 100 g/GJ (hors FC)
PM ₁₀	Oui	<i>Pas d'évolution de la granulométrie</i>						
PM _{2,5}	Oui	<i>Pas d'évolution de la granulométrie</i>						
BC	Oui	0,23 g/GJ	0,11 g/GJ	0,76 g/GJ	1,5 g/GJ	Evolution spécifique sur la granulométrie des PM_{2,5}		
ML	Oui	Spécifique selon ML				Evolutions spécifiques selon ML		
HAP	Oui	0,1 mg/GJ		3,9 mg/GJ		<i>Pas d'évolution proposée sur le total 8 HAP</i>		
PCDD/F	Non	11 ng I-TEQ/GJ		78 ng I-TEQ/GJ		<i>Pas d'évolution proposée</i>		

Tableau 28 : Proposition d'évolution des facteurs d'émission des chaufferies biomasses de puissance inférieure à 20 MW

Ces évolutions ont été mises en place avec une identification spécifique de la part de consommation de biomasse liée aux chaufferies de puissance inférieure à 1 MW dans les inventaires nationaux. Ces évolutions ont également fait l'objet d'échanges lors des GCIE et ont *in fine* été validées et implémentées dans les inventaires nationaux dans l'édition 2023.

8. Evaluation de l'impact de l'évolution des facteurs d'émission des chaufferies industrielles sur les émissions nationales

Suite à la proposition de nouveaux facteurs d'émission, l'objectif est d'évaluer l'impact de cette révision des niveaux d'émissions de chaudières inférieures à 1 MW et entre 1 et 20 MW par rapport aux émissions nationales.

8.1 Création d'une catégorie de puissance < 1 MW

A partir des données de recensement des installations du CIBE il est possible d'identifier pour les années 2018-2020, la part de consommation de biomasse des chaufferies de puissance comprise entre [50 kW – 1 MW]. En attribuant cette part à une nouvelle catégorie de puissance inférieure à 1 MW dans les inventaires nationaux indistinctement pour les chaufferies des quatre secteurs identifiés *ie.* Chauffage urbain, industrie, tertiaire et agriculture, il est possible d'évaluer les impacts de cette nouvelle catégorie et des changements de facteurs d'émission proposés dans la tâche 3.

En l'absence de données antérieures à 2018, la proportion de consommation des installations de puissance inférieure à 1 MW en 2018 (environ 13 %) est conservée constante sur la période 1990-2017.

8.2 Impact sur les émissions nationales

Le tableau ci-dessous présente les évolutions de facteurs d'émission proposées en tâche 3 et *in fine* approuvées par le GCIIE.

Polluants	Facteur d'émission proposé		Facteurs d'émission dans l'édition 2022 des inventaires nationaux
	< 1 MW	[1 - 20 MW]	< 20 MW
CO	435 g/GJ	<i>Pas d'évolution proposée</i>	250 g/GJ
NO _x	80 g/GJ	132 g/GJ	132 g/GJ (FC) et 200 g/GJ (hors FC)
COVNM	12 g/GJ	<i>Pas d'évolution proposée</i>	2,2 g/GJ (FC) et 4,8 g/GJ (hors FC)
TSP	100 g/GJ	<i>Pas d'évolution proposée</i>	16,8 g/GJ et 100 g/GJ (hors FC)
BC	15 % des PM _{2,5} (chaufferies industrie, tertiaire et agriculture)		28 % des PM _{2,5} (chaufferies industrie, tertiaire et agriculture)
Pb	32 mg/GJ		90 mg/GJ
As	7 mg/GJ		9,5 mg/GJ
Ni	8 mg/GJ		11 mg/GJ
Cu	15 mg/GJ		31 mg/GJ
Cr	23 mg/GJ		47 mg/GJ

Tableau 29 : Proposition d'évolution des facteurs d'émission des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 20 MW

Pour rappel, le GCIIE (Groupe de Concertation et d'Information sur les Inventaires d'Emissions) correspond au groupe de travail qui accepte ou non les évolutions méthodologiques des inventaire nationaux. Celui qui avise sur les évolutions méthodologiques se réunit habituellement en octobre chaque année. Dans cette partie, la légende « Evolution méthodologique » correspond donc à la proposition d'évolution méthodologique qui a été faite en GCIIE en octobre 2022. La légende « Inventaire 2022 » correspond aux chiffres de la dernière édition disponible de l'inventaire national à savoir 2022.

Les évolutions approuvées par le GCIIE sont comparées au total national de l'édition 2022 des inventaires nationaux réalisés par le Citepa :

- Les émissions de monoxyde de carbone (CO) **augmentent légèrement** en lien avec le FE spécifique plus élevé de 435 g/GJ utilisé pour les chaufferies de puissance inférieures à 1 MW.

- Les émissions des oxydes d'azotes (NO_x) **diminuent légèrement** en lien avec le FE spécifique plus faible de 80 g/GJ utilisé pour les chaufferies de puissance inférieures à 1 MW. Ne plus distinguer les chaufferies biomasse financées par le Fonds Chaleur (FC) de celles non financées contribue également à la baisse observée.
- Les émissions de composés organiques volatils non méthanique (COVNM) **augmentent légèrement** en lien avec le FE spécifique plus élevé de 12 g/GJ utilisé pour les chaufferies de puissance inférieures à 1 MW.

Polluants	CO					NO _x				
	Δ (en t)	Δ (en %)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national	Δ (en t)	Δ (en %)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national
			Inventaire 2022	Evolution méthodologique				Inventaire 2022	Evolution méthodologique	
1990	+213	+8,8%	0,02%	0,02%	+0,002%	-662	-34%	0,1%	0,1%	-0,03%
1995	+491	+7,9%	0,07%	0,07%	+0,005%	-1 574	-32%	0,3%	0,2%	-0,08%
2000	+488	+8,2%	0,09%	0,10%	+0,007%	-1 556	-33%	0,3%	0,2%	-0,09%
2005	+855	+7,8%	0,21%	0,23%	+0,016%	-2 755	-31%	0,6%	0,4%	-0,18%
2010	+1 420	+7,5%	0,46%	0,49%	+0,034%	-4 212	-28%	1,3%	0,9%	-0,37%
2015	+1 428	+7,7%	0,70%	0,76%	+0,054%	-2 632	-20%	1,4%	1,1%	-0,28%
2020	+1 496	+7,6%	0,91%	0,98%	+0,069%	-1 933	-14%	2,0%	1,7%	-0,29%
Polluants	COVNM					TSP				
	Δ (en t)	Δ (en %)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national	Δ (en t)	Δ (en %)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national
			Inventaire 2022	Evolution méthodologique				Inventaire 2022	Evolution méthodologique	
1990	+8	+18%	0,002%	0,002%	+0,000%	-	-	0,08%	0,08%	-
1995	+19	+16%	0,005%	0,006%	+0,001%	-	-	0,22%	0,22%	-
2000	+19	+17%	0,006%	0,006%	+0,001%	-	-	0,23%	0,23%	-
2005	+33	+16%	0,013%	0,015%	+0,002%	-	-	0,47%	0,47%	-
2010	+56	+16%	0,029%	0,034%	+0,005%	+36	+0,5%	0,85%	0,86%	+0,004%
2015	+62	+20%	0,030%	0,035%	+0,006%	+216	+3,8%	0,73%	0,75%	+0,028%
2020	+69	+23%	0,032%	0,040%	+0,007%	+339	+6,9%	0,69%	0,73%	+0,047%

Tableau 30 : Impact de l'évolution des facteurs d'émission pour le CO, les NO_x, les COVNM et les TSP des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 50 MW

Les impacts des évolutions proposées sur les émissions de particules sont très limités et sont plus significatifs sur les émissions de black Carbon ou carbone suie (BC) comme l'illustre le Tableau 31 :

Polluants	PM _{2,5}					BC				
	Δ (en t)	Δ (en %)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national	Δ (en t)	Δ (en %)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national
			Inventaire 2022	Evolution méthodologique				Inventaire 2022	Evolution méthodologique	
1990	-	-	0,2%	0,2%	-	-99	-46%	0,3%	0,2%	-0,13%
1995	-	-	0,4%	0,4%	-	-221	-46%	0,6%	0,3%	-0,27%
2000	-	-	0,6%	0,6%	-	-224	-46%	0,7%	0,4%	-0,32%
2005	-	-	1,2%	1,2%	-	-388	-46%	1,5%	0,8%	-0,68%
2010	+24	+0,5%	2,5%	2,5%	+0,01%	-588	-46%	2,9%	1,6%	-1,35%
2015	+153	+3,9%	2,7%	2,8%	+0,11%	-402	-43%	3,0%	1,7%	-1,30%
2020	+112	+3,3%	3,0%	3,1%	+0,10%	-314	-41%	4,1%	2,4%	-1,67%

Tableau 31 : Impact de l'évolution des facteurs d'émission pour les TSP, les PM_{2,5} et le BC des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 50 MW

Concernant les métaux lourds, la révision à la baisse des facteurs d'émission de l'arsenic (As), du plomb (Pb), du nickel (Ni), du cuivre (Cu) et du chrome (Cr) pour l'ensemble des chaufferies biomasse sans distinction de puissance entraînent les impacts détaillés ci-dessous (Tableau 32) :

Polluants	Pb				As			
	Δ (en kg)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national	Δ (en kg)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national
		Inventaire 2022	Evolution méthodologique			Inventaire 2022	Evolution méthodologique	
1990	-562	0,0%	0,0%	-0,01%	-24	0,5%	0,4%	-0,14%
1995	-1 434	0,2%	0,1%	-0,10%	-62	1,4%	1,0%	-0,36%
2000	-1 386	0,8%	0,3%	-0,53%	-60	1,5%	1,1%	-0,39%

2005	-2 551	2,6%	0,9%	-1,65%	-110	3,5%	2,6%	-0,93%
2010	-4 396	6,1%	2,3%	-3,94%	-189	9,4%	7,1%	-2,48%
2015	-4 305	7,8%	2,9%	-5,02%	-186	13,0%	9,9%	-3,42%
2020	-4 574	9,8%	3,7%	-6,32%	-197	17,1%	13,2%	-4,49%
Polluants	Δ (en kg)	Ni			Cu			
		Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national	
Inventaire 2022	Evolution méthodologique	Δ (en kg)	Inventaire 2022		Evolution méthodologique			
1990	-29	0,0%	0,0%	-0,01%	-155	0,1%	0,1%	-0,05%
1995	-74	0,1%	0,1%	-0,03%	-396	0,4%	0,2%	-0,19%
2000	-72	0,1%	0,1%	-0,04%	-382	0,4%	0,2%	-0,22%
2005	-132	0,3%	0,2%	-0,09%	-704	0,9%	0,5%	-0,49%
2010	-227	1,0%	0,7%	-0,26%	-1 213	2,7%	1,3%	-1,40%
2015	-223	1,9%	1,4%	-0,53%	-1 187	5,4%	2,7%	-2,80%
2020	-237	4,1%	3,0%	-1,11%	-1 262	11,5%	5,9%	-5,92%

Polluants	Cr			
	Δ (en kg)	Proportion des chaufferies biomasses <50MW par rapport au total national		Par rapport au total national
		Inventaire 2022	Evolution méthodologique	
1990	-233	0,2%	0,1%	-0,08%
1995	-593	0,5%	0,3%	-0,28%
2000	-574	0,6%	0,3%	-0,33%
2005	-1 055	1,4%	0,7%	-0,73%
2010	-1 819	4,1%	2,1%	-2,10%
2015	-1 781	8,2%	4,2%	-4,20%
2020	-1 893	17,4%	9,3%	-8,89%

Tableau 32 : Impact de l'évolution des facteurs d'émission pour les métaux lourds spécifiques des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 50 MW

Ces évolutions ont toutes un impact relativement limité au regard du total national. Pour l'ensemble des métaux lourds concernés cependant, les impacts observés peuvent atteindre jusqu'à quelques pourcents du total national. Dans les inventaires nationaux d'émissions la part relative des émissions de métaux lourds liée à la combustion domestique augmente avec la diminution en valeur absolue depuis 1990 provenant des autres sources d'émission de ces métaux lourds.

8.3 Conclusion :

L'ensemble de ces évolutions méthodologiques ont un impact limité sur les inventaires nationaux, notamment sur les années historiques lorsque très peu d'installations étaient concernées et lorsque d'autres sources d'émissions étaient plus prépondérantes. Pour autant, les facteurs d'émission proposés sont davantage en accord avec ce qui a été observé dans l'état de l'art bibliographique et au cours des campagnes de mesures réalisées au cours du présent projet. Des figures complémentaires illustrant l'impact de ces évolutions méthodologiques sont présentées en annexe.

Une meilleure connaissance de la répartition des différentes chaufferies biomasse selon leur puissance depuis 1990 pourra permettre d'affiner les calculs d'inventaires d'émissions.

9. Préconisations

Les préconisations pour la conception et le suivi des performances des chaufferies bois de taille intermédiaire en vue de réduire leurs émissions, a fait l'objet d'un rapport dédié. Les préconisations ont été axés autour de 3 thématiques :

- Le bon dimensionnement de la chaudière et la réduction des cycles ;
- La mise en place de système de filtration adapté aux objectifs à atteindre ;
- Le choix d'un combustible adapté à la technologie et taille de la chaudière.

10. Conclusion / Perspectives

Le projet de recherche ACIBIOQA s'est attelé à mieux quantifier les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse inférieures à 20 MW. Plusieurs études avaient déjà été commanditées par l'ADEME sur des chaufferies de puissance supérieure. Très rapidement, le projet s'est orienté sur les chaufferies inférieures à 1 MW, gamme de puissance qui aujourd'hui fait très peu l'objet de suivi des émissions car pas soumise à la réglementation ICPE.

Le projet a débuté par un état de l'art sur la connaissance des émissions des installations de combustion biomasse des chaufferies inférieures à 20 MW qui s'est appuyé sur plus d'une trentaine de publications françaises et internationales. Cette analyse bibliographique a permis une comparaison avec les facteurs d'émission aujourd'hui utilisés par le Citepa dans les inventaires nationaux pour les polluants les plus couramment suivis (CO, NO_x, SO₂, NH₃, COV et CH₄), mais aussi pour les métaux, les HAP, les dioxines et furanes. Pour les particules, l'état de l'art a détaillé les émissions en fonction de la composition granulométrique des particules (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁) et parfois la quantification de la partie condensable.

Les résultats et préconisations établies dans le projet s'appuient sur l'examen d'une dizaine de chaufferies bois, dont six ont été retenues pour la réalisation d'une campagne de caractérisation des émissions atmosphériques. Ces chaudières ont fait l'objet de mesures des émissions des principaux polluants atmosphériques réglementés (NO_x, CO, Poussières, COV, SO₂) mais aussi les particules fines, les condensables et le Black Carbon.

Les résultats ont été analysés au regard de la réglementation, mais aussi de l'état de l'art réalisé sur les facteurs d'émissions en vue de proposer une évolution de ces facteurs d'émissions pour la réalisation des inventaires nationaux. Sur les six chaudières étudiées, une seule est soumise au régime ICPE 2910 A et trois ont une puissance supérieure à 500 kW (seuil du Fonds Chaleur pour les engagements sur les poussières, les NO_x et les CO).

Pour les émissions de monoxyde de carbone (CO) et de poussières (particules solides), les résultats sont très éloignés des exigences du Fonds Chaleur, mais s'expliquent sur le panel de chaudières étudiées par un fonctionnement par cycle répété avec une faible charge (surdimensionnement ou saison intermédiaire). Les courbes CO/O₂ ont montré que les phases d'arrêt et de redémarrage des chaudières génèrent des émissions importantes notamment de CO.

Par ailleurs, ces chaudières n'indiquaient aucun dysfonctionnement important visible qui auraient pu alerter sur des émissions de CO importantes. Certaines affichaient cependant un rendement chaudière faible traduisant une mauvaise combustion, mais non relevé par les maîtres d'ouvrages. La réduction des cycles d'arrêt et de redémarrage très fréquent, de l'ordre de plusieurs fois sur 1h semble un levier important pour réduire ces émissions.

Concernant les poussières, les mesures ont montré que les multicyclones, classiquement installés sur ces tailles de chaudières, limitent faiblement les émissions et pas en deçà de 125 mg/Nm³, et qu'un équipement de type filtre à manche ou électrofiltre est nécessaire pour répondre aux exigences du Fonds Chaleur (à partir de 500 kW) ou de la réglementation ICPE (à partir de 1 MW) soit 50 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ maximum. Par ailleurs, pour les gammes de puissance étudiées dans ce projet, la prise en compte de la fraction des condensables ne joue pas un rôle déterminant vis à vis de la conformité aux exigences du Fonds Chaleur (à partir de 500 kW) ou de la réglementation ICPE (à partir de 1 MW) soit 50 mg/Nm³ à 6% d'O₂.

Le travail sur la réduction du nombre de cycles devrait aussi avoir un impact significatif sur la baisse des émissions de poussières, la filtration restant cependant l'outil le plus efficace et sur pour les réduire.

Concernant les NO_x, les résultats sont satisfaisants, conformes aux exigences de l'ADEME et de la réglementation ICPE pour l'ensemble des sites. Cependant, Nox et CO évoluant de façon opposés (plus de CO, moins de Nox et vice-versa), il convient de rester vigilant sur ce polluant en choisissant un combustible faiblement chargé en azote.

Les mesures ont permis de valider ou d'ajuster les valeurs des facteurs d'émission des différents polluants utilisés par le Citepa pour quantifier les quantités émises chaque année par les chaufferies biomasse centralisées de moins de 20 MW. Une nouvelle catégorie de puissance < 1 MW a pu être proposée avec certains facteurs d'émission spécifiques pour être prise en compte dans les inventaires nationaux.

D'une manière générale la contribution des chaufferies biomasses inférieures à 20 MW au sein des émissions nationales restent marginales. Par conséquent l'impact des changements méthodologiques d'estimation des émissions de ces sources de polluants restent marginaux à l'échelle des émissions françaises malgré l'évolution de ces facteurs (à la baisse pour les NOx, à la hausse pour les CO). Cependant, même si ces installations ne sont pas prédominantes dans le parc actuel pour le calcul global d'émissions nationales, la question de leur impact sur la qualité de l'air reste un sujet majeur au niveau local. Par ailleurs, les installations de puissance inférieure à 1 MW se développent aujourd'hui fortement afin de répondre aux objectifs de déploiement de la chaleur renouvelable en France. Au vu des résultats observés dans le cadre de ce projet, il apparaît donc essentiel de maîtriser leurs émissions pour limiter leur impact sur la qualité de l'air et pérenniser les solutions techniques.

L'étude a permis l'élaboration d'un guide de recommandations synthétisant les pistes d'optimisation à mettre en œuvre tout au long du développement et de l'exploitation d'une chaufferie bois :

- Réduire les cycles de variation de charge par un dimensionnement juste et suffisant de la puissance de la chaudière, éventuellement couplée à un stockage thermique ;
- Choisir un traitement de fumée en adéquation avec son objectif d'abattement des poussières ;
- Choisir un triptyque combustible/chaudière/traitement de fumée cohérent,
- Surveiller la qualité des combustibles livrés,
- Suivre la performance de son installation et ajuster les réglages de la chaudière aux conditions réelles de fonctionnement et aux caractéristiques du combustible.

Le recours à un professionnel RGE pour la conception et l'installation d'un projet biomasse est nécessaire à l'atteinte de ces objectifs.

Ainsi le projet a permis de :

- Mieux connaître les émissions de chaufferie de puissance inférieure à 1 MW en réalisant des mesures sur des durées plus longues englobant les différentes phases de fonctionnement d'une chaudière (démarrage, arrêt, charge partielle, ...) /
- Proposer de nouvelles valeurs pour les facteurs d'émissions des chaudières biomasse utilisés par le Citepa pour réaliser annuellement l'inventaire des émissions de polluants à l'échelle nationale.
- Etablir un rapport de recommandations et de bonnes pratiques pour la conception et l'exploitation afin de réduire l'impact des chaufferies biomasse sur la qualité de l'air. Cette partie fait l'objet d'un rapport dédié.

Le projet ACIBIOQA met en avant l'influence de la variation de charge et du cyclage fréquent sur la dégradation des émissions des chaufferies de petite puissance. Il semble pertinent de poursuivre les travaux dans cette direction et de chercher à mieux connaître les solutions pour gérer la charge (stockage thermique, installation de chaudières en cascade, ...) et les bénéfices associés. C'est une piste de recherche qui reste à explorer.

LISTE DES ANNEXES

Les annexes sont regroupées dans un rapport dédié :

1. Etat de l'art des émissions des installations de combustion biomasse de puissance inférieure à 20 MW
2. Méthodologie de calcul des facteurs d'émission dans les inventaires nationaux réalisés par le CITEPA
3. Logistique des campagnes de mesures sur site
4. Descriptif des sites retenus et résultats détaillés des campagnes d'essais
5. Références bibliographiques

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 3 : Récapitulatif des gammes de facteurs d'émission par puissance et par polluant	10
Tableau 11 : Synthèse des exigences réglementaires sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse soumises à la rubrique ICPE 2910	11
Tableau 12 : Synthèse des exigences réglementaires sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse non soumises à la rubrique ICPE 2910A	12
Tableau 13 : Synthèse des exigences d'écoconception de l'UE sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse.....	12
Tableau 14 : Synthèse des exigences réglementaires sur les émissions de polluants pour les chaufferies biomasse	13
Tableau 15 : Intérêt du maintien d'un multicyclone devant un FAM ou un ESP.....	16
Tableau 16 : Avantages/inconvénients des petits électrofiltres	22
Tableau 17 : Synthèse avantage et inconvénient des solutions de dépoussiérage.....	27
Tableau 18 : LQ de mesure calculée pour chaque prélèvement manuel et pour chaque campagne d'essais	29
Tableau 19 : Méthodes de prélèvement manuelles et de mesurages en continu	29
Tableau 20 : Méthodes d'analyses mises en œuvre sur les échantillons collectés lors des campagnes de mesure sur site.....	31
Tableau 21 : Synthèse des résultats des polluants mesurés lors des campagnes d'essais réalisées sur six chaudières et corrigés à 6 % d'O ₂	32
Tableau 22 : Caractéristiques des six chaudières et leurs émissions de NO _x	36
Tableau 23 : Caractéristiques des six chaudières et de leurs émissions de particules solides et condensables	38
Tableau 24 : Condition de combustion des sites et coefficients de volume de gaz de combustion sec associés	40
Tableau 25 : Facteurs d'émissions moyens du CO par chaudières et conditions de combustion associées	41
Tableau 26 : Facteurs d'émission moyens de NO _x par chaudière et conditions de combustion associées	42
Tableau 27 : Facteurs d'émission moyens de COVT par chaudière et conditions de combustion associées	43
Tableau 28 : Facteurs d'émission moyens de TSP par chaudière et conditions de combustion associées	45
Tableau 29 : Granulométrie moyenne des PM ₁₀ par chaudière et conditions de combustion associées..	46
Tableau 30 : Granulométrie moyenne des PM _{2,5} par chaudière et conditions de combustion associées..	47
Tableau 31 : Granulométrie moyenne des PM _{1,0} par chaudière et conditions de combustion associées..	47
Tableau 32 : Facteurs d'émission moyens de Black Carbon par chaudière et conditions de combustion associées	48
Tableau 33 : Facteurs d'émission moyens de métaux lourds par chaudière et conditions de combustion associées	49
Tableau 34 : Proposition d'évolution des facteurs d'émission en métaux lourds	55
Tableau 35 : Facteurs d'émission moyens de la somme des 8 HAP par chaudière et conditions de combustion associées	56
Tableau 36 : Proportions observées des 8 HAP par chaudière et conditions de combustion associées..	57
Tableau 37 : Proposition d'évolution des facteurs d'émission des chaufferies biomasses de puissance inférieure à 20 MW	58
Tableau 38 : Proposition d'évolution des facteurs d'émission des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 20 MW	59
Tableau 39 : Impact de l'évolution des facteurs d'émission pour le CO, les NO _x , les COVNM et les TSP des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 50 MW	60
Tableau 40 : Impact de l'évolution des facteurs d'émission pour les TSP, les PM _{2,5} et le BC des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 50 MW	60
Tableau 41 : Impact de l'évolution des facteurs d'émission pour les métaux lourds spécifiques des chaufferies biomasse de puissance inférieure à 50 MW	61

FIGURES

Figure 6 : Nomenclature ICPE pour les chaufferies (Source FNCCR) : DC déclaration, E enregistrement, A autorisation	11
---	----

Figure 7 : Entretien réalisés et technologies.....	14
Figure 8 : Principe de cheminement des fumées en installation de combustion biomasse (Source INDDIGO)	15
Figure 9 : Multicyclone (source AIRLIS).....	16
Figure 10 : Schéma de principe d'un électrofiltre (Source R&R BETH)	17
Figure 11 : Schéma de principe d'un filtre à manches (Source Compte R).....	19
Figure 12 : Petit électrofiltre (source Heizomat)	22
Figure 13 : Représentation du filtre céramique (Source Glosfume)	23
Figure 14 : Technologies disponibles pour la filtration des fumées (source INDDIGO)	26
Figure 15 : Synthèse de l'étude concernant la plage de performance de filtration des poussières de différents systèmes de filtration	27
Figure 16 : Schéma de la ligne de prélèvement de la méthode à barboteur SPC-IPA pour la mesure des condensables	30
Figure 17 : Résultat des campagnes de mesures de CO ramenées à 6 % de O ₂ pour les s chaudières étudiées.....	33
Figure 18 : Analyse des émissions O ₂ et CO ₂ pendant Les cycles de fonctionnement des chaudières.....	34
Figure 19 : Evolution O ₂ et CO sur la période de mesure pour la chaudière CH4	34
Figure 20 : Analyse des émissions O ₂ et CO ₂ pendant les cycles d'extinction et de redémarrage des chaudières CH1, CH2 et CH5	35
Figure 21 : Analyse des émissions O ₂ et CO ₂ de la chaudière CH3 (respectant les exigences du Fonds Chaleur).....	35
Figure 22 : Résultat des campagnes de mesures de Nox sur les six chaudières.....	36
Figure 23 : Résultat des campagnes de mesures de particules solides sur les six chaudières	37
Figure 24 : Composition granulométrique des PM émis selon le type de chaudière.....	38
Figure 25 : Gammes de facteurs d'émission de CO par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	41
Figure 26 : Gammes de facteurs d'émission de NOX par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	42
Figure 27 : Gammes de facteurs d'émission de COVT par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	44
Figure 28 : Gammes de facteurs d'émission des TSP par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	45
Figure 29 : Gammes de facteurs d'émission de Black Carbon par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure	48
Figure 30 : Gammes de facteurs d'émission de plomb par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	51
Figure 31 : Gammes de facteurs d'émission de cadmium par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	51
Figure 32 : Gammes de facteurs d'émission d'arsenic par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	52
Figure 33 : Gammes de facteurs d'émission de nickel par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	52
Figure 34 : Gammes de facteurs d'émission de cuivre par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	53
Figure 35 : Gammes de facteurs d'émission de zinc par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	53
Figure 36 : Gammes de facteurs d'émission de chrome par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	54
Figure 37 : Gammes de facteurs d'émission de vanadium par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	54
Figure 38 : Gammes de facteurs d'émission de manganèse par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure	55
Figure 39 : Gammes de facteurs d'émission des 8HAP par gamme de puissance d'appareil et résultats moyens des campagnes de mesure.....	56

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
ACIBIOQA	Amélioration des connaissances en matière d'impact des chaufferies biomasse sur la qualité de l'air
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
BC	Black Carbon
CARABLACK	Caractérisation des émissions atmosphériques de Black Carbon aux rejets de sources fixes
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV et COSV	Composés organiques volatils et semi-volatils
COVT	Composés organiques volatils totaux
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
EC/OC	Element Carbon Organic Carbon
ENR	Energies Renouvelables
GCIIE	Groupe De Concertation et d'Information sur les Inventaires d'Emissions
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques
ICPE	Installations Classées Pour l'Environnement
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
NH ₃	Ammoniac
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NO	Oxydes d'azote
NO ₂	Dioxyde d'azote
NO _x	Oxydes d'azote
O ₂	Oxygène
PCDD/F	dioxine et furanes (polychlorodibenzo-furanes ou polychlorodibenzo-dioxines)
PM	Particulate Matter en anglais : particules fines
PM ₁	particules d'un diamètre inférieur à 1 micron
PM ₁₀	particules d'un diamètre inférieur à 10 microns
PM _{2,5}	particules d'un diamètre inférieur à 2.5 microns
SO ₂	Dioxyde de soufre
TSP	Total Suspended particulates (Total des particules en suspension)
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

EMISSIONS ATMOSPHERIQUES DES CHAUFFERIES BOIS DE PUISSANCE INFÉRIEURE A 1 MW

Première source d'énergie renouvelable utilisée en France, la combustion du bois émet des polluants et peut à certaines périodes de l'année et dans certaines zones géographiques, contribuer de façon significative à la pollution de l'air extérieur.

Contrairement aux chaufferies biomasse centralisées soumises au contrôle des ICPE, et au chauffage domestique au bois largement documenté, les émissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW sont mal connues.

Après un état de l'art exhaustif et inédit des connaissances des émissions dans cette gamme de puissance de combustion, le projet a consisté à mener des campagnes d'analyses des émissions polluantes de six installations, couplées à l'analyse de leurs conditions de fonctionnement.

Les résultats obtenus ont permis de revoir les valeurs des facteurs d'émissions de ces petites chaufferies. Ils ont confirmé les performances des systèmes de traitement de fumée. Ils ont également mis en évidence l'impact des phases d'arrêts et de redémarrage des chaudières.

Des recommandations à destination de la filière en termes de dimensionnement initial et de mode de fonctionnement sont proposées, afin d'optimiser les performances des installations de combustion de biomasse de puissance inférieure à 1 MW.

Six chaudières biomasse de puissances comprises entre 150 KW et 1,6 MW ont fait l'objet d'une campagne de mesures des polluants atmosphériques.

Les résultats ont permis l'élaboration de préconisations à destination de la filière afin d'optimiser les performances de ces installations et de diminuer leurs émissions de polluants.

