

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

ANNEXES


EXPERTISES

**Mai
2023**

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. 148 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 2018-65

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

SOMMAIRE

1. ETAT DE L'ART DES EMISSIONS DES INSTALLATIONS DE COMBUSTION BIOMASSE DE PUISSANCE INFERIEURE A 20 MW	4
2. METHODOLOGIE DE CALCUL DES FACTEURS D'EMISSION DANS LES INVENTAIRES NATIONAUX REALISES PAR LE CITEPA.....	101
3. LOGISTIQUE DES CAMPAGNES DE MESURES SUR SITE	109
4. DESCRIPTIF DES SITES RETENUS ET RESULTATS DETAILLES DES CAMPAGNES D'ESSAIS	111
5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	158
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	161

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

1.1. 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 doivent permettre d'identifier des gammes de facteurs d'émission selon ces paramètres, qui pourront servir de référence à la comparaison avec les résultats qui seront obtenus dans le cadre de ce projet.

1.2. Méthodologie

Les références étudiées couvrent une très grande variété de combustibles biomasse. Afin d'en simplifier l'étude, ceux-ci ont été rassemblés par grandes catégories décrites ci-dessous :

Grandes catégories de combustibles	Liste détaillée	Références concernées
Plaquettes forestières et assimilés	Bois, Plaquettes forestières, copeaux de bois (avec ou sans écorce), brique de bois, brique de bois basse densité, bois non-traité, plaquettes de saule, plaquettes d'épicéa, plaquettes de pin, plaquettes de hêtre, bois d'épicéa non traité, bois de saule (mélangé à 20 % de granulés)	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]
Granulés	Granulés de bois, granulés de bois basse densité, granulés de moutarde d'Abyssinie, de peuplier et mélange, granulés de contreplaqué et de paille de riz, granulés de bois (tronc), de bois (écorce) et mélange,	[1], [22], [3], [23], [24], [25], [26], [22], [27], [28]
Produits connexes de scieries	Chutes et sciure de bois, déchets de bois, sciure et écorce de bois, résidus forestiers, résidus de scierie,	[22], [9], [12], [13], [15], [29], [22], [28], [17], [18], [19], [20], [30]



Sous-produits agricoles	Paille de blé (et kaolin), paille de colza (et kaolin), miscanthus (dopé au Ca(OH) ₂), balle de riz, bagasse, mélange bois et coques de noix de coco,	[31], [5], [9]
Bois déchets	Panneaux de particules, palettes, produits bois en fin de vie, panneaux avec durcissant, bois d'épicéa traité (CCB), déchets de bois urbains,	[14], [15], [16], [17], [18], [19]

Tableau 1 : Grands types de combustibles et listes détaillées associées

Aucune des études identifiées dans la littérature ne semble utiliser du bois sous forme de bûches, davantage réservé à un usage résidentiel.

Il a déjà été établi par ailleurs que certaines caractéristiques du combustible peuvent influencer les émissions de la combustion notamment :

- le taux d'humidité du combustible ;
- la nature et la dimension des combustibles ;
- le type d'essence de biomasse.

D'autres paramètres peuvent également influencer sur la combustion de la biomasse dont :

- la nature du foyer ;
- l'allure ou le taux de charge ;
- l'excès d'air ;
- l'existence ou non d'un système de traitement de fumée ou d'abattement et le type de système.

Par ailleurs, les méthodes d'échantillonnages et de mesures choisies pour telle ou telle substance, gazeuse ou particulaire, peuvent également avoir un impact sur les résultats d'émissions de polluants d'une étude et sur leur représentativité vis-à-vis des émissions réelles.

Un certain nombre d'études identifiées dans le cadre de cet état des connaissances scientifiques présente les émissions uniquement en concentrations mesurées avec un référentiel de mesure généralement précisé. Afin de pouvoir comparer de manière efficace et pratique les résultats de ces études, des conversions ont été réalisées pour transformer ces concentrations (mg/Nm³) en facteurs d'émission (g/GJ). Le calcul peut se faire de différentes façons à partir de la consommation et d'analyses du combustible et du débit des fumées si elles sont connues, ou en utilisant par défaut un coefficient de volume de gaz de combustion sec dépendant de la composition du combustible. Cette méthode suppose des conditions de combustion stœchiométriques. Elle est illustrée par la formule ci-dessous [32] [33] valable pour des combustibles secs :

$$DFGV_{stœchio} = [(8,8930 * y_C) + (20,9724 * y_H) + (3,3190 * y_S) - (2,6424 * y_O) + (0,7997 * y_N)] / PCI$$

Avec :

- y_i : fraction de l'élément i dans le combustible ;
- DFGV : le coefficient de volume de gaz de combustion sec (Dry Flue Gas Volume) (en m³.GJ⁻¹) en conditions stœchiométriques ;
- PCI : pouvoir calorifique inférieur du combustible (en GJ.kg⁻¹).

Il est également possible d'adapter cette formule pour considérer les fractions de cendres et d'humidité du combustible. La formule appliquée pour réaliser cette conversion vers le facteur d'émission est la suivante :

$$FE (kg.GJ^{-1}) = [C]_{x\% O_2} * (20.9 - x) / (20.9 - w) * DFGV_{stœchio} * (20.9) / (20.9 - w)$$

Avec :

- FE : le facteur d'émission du polluant considéré ;
- [C] : la concentration du polluant mesurée à x % d'O₂ (en kg.m⁻³) ;
- w : la concentration d'O₂ de référence utilisée.

Les coefficients des références utilisés [34], [33] et [32] sont présentés en annexe 1 du rapport final.

Coefficient DFGV utilisé pour		Référence associée	DFGV à 10 % O ₂ (Nm ³ .GJ ⁻¹)
Plaquettes forestières sans précision du type d'essence		[34]	475,5
Plaquettes forestières avec précision du type d'essence	Conifères	[33]	479
	Feuillus		477
Granulés de bois		[32]	Varie avec l'humidité
Autre type de granulés		[33]	Selon la nature de la biomasse
Produits connexes de scierie		[32]	Varie avec l'humidité
Sous-produits agricoles		[32]	Selon la nature de la biomasse
Déchets bois		[32]	Varie avec l'humidité

Tableau 2 : Coefficients DFGV utilisés selon le type de combustible

Les unités des facteurs d'émission et des concentrations varient selon les polluants considérés. Dans les tableaux présentant les résultats, les valeurs issues de la méthode de conversion présentée ci-dessus sont indiquées **en vert**. Les moyennes et les médianes issues de cette recherche bibliographique ont été présentées lorsque le nombre de mesures était suffisant pour qu'elles soient significatives (nombre d'études identifiées supérieur à deux ou nombre total de mesures supérieur à vingt).

Certains articles scientifiques passent en revue la littérature disponible sur les émissions engendrées par la combustion du bois, mais leur périmètre est souvent plus limité (uniquement les émissions de particules [35] ou de dioxines [17]) et focalisé sur les émissions d'appareils résidentiels.

À titre indicatif, certaines chaudières de puissance inférieures à 250 kW mais proches de cette limite ont également été étudiées.

Par ailleurs, l'ensemble des rapports méthodologiques disponibles des inventaires nationaux d'émissions de polluants (IIR – Informative Inventory Report) ont été consultés. Il en ressort que la gamme de puissance étudiée dans ce rapport [250 kW - 20 MW] est difficilement identifiable dans les IIR et que la combustion de biomasse est répartie dans plusieurs secteurs NFR (Nomenclature For Reporting), notamment :

- 1A1a - Industries de l'énergie (chauffage urbain) ;
- 1A2 - Industrie manufacturière ;
- 1A4a - Commercial/Institutionnel ;
- 1A4c - Agriculture et foresterie.

Une très grande majorité de pays se contente d'utiliser les facteurs d'émission proposés par défaut dans les lignes directrices européennes (EMEP/EEA [36]). Les pays qui utilisent une méthodologie différente s'appuient généralement sur des documents non accessibles qu'il est donc difficile d'évaluer.

1.3. 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 procédé se présente sous 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'étude menée par Chandrasekaran et al. (2001) [3] porte sur les émissions de gaz et de particules ainsi que sur l'efficacité thermique de différentes chaudières à bois de puissance comprise entre 150 kW et 500 kW. Les combustibles utilisés pour la réalisation des tests sont des granulés et des plaquettes de bois à des taux d'humidité variant entre 4,6 % et 26 %.

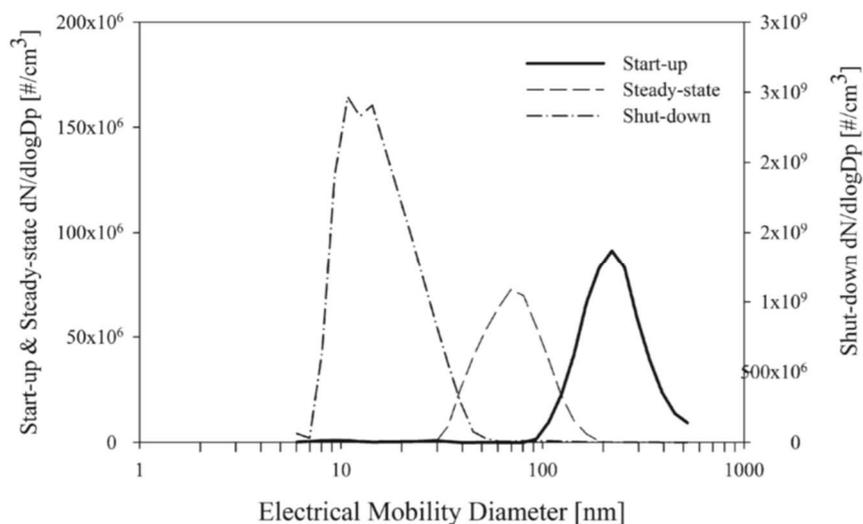


Figure 1 : Distribution granulométrique des particules ultrafines mesurées en diamètre de mobilité électrique lors des phases de démarrage, stationnaire et d'arrêt [3]

Ainsi, dans le cas des particules, cette étude observe un décalage du diamètre moyen particulaire (Geometric Mean Diameter, GMD) lors des phases de démarrage et d'arrêt par rapport au fonctionnement nominal. En effet, lors de la phase de démarrage, le diamètre moyen des particules émises est plus important que lors de la phase stationnaire et d'arrêt. Ce phénomène est imputé à la basse température de l'enceinte de combustion dans laquelle une quantité importante de matière imbrûlée est emportée par le flux d'air entrant [3] [5].

À l'inverse lors de la phase de fin de combustion, des émissions de particules en nombres dont le diamètre moyen est plus fin (GMD centré sur 15 nm) que lors de la phase stationnaire (GMD centré sur 70 nm) sont observées. Ces particules sont formées par un dégagement de vapeur qui nucléée de petites particules, restées imbrûlées car le processus de flambage actif a cessé [6].

Par ailleurs, le niveau des rejets évolue également selon les différentes phases de combustion : si les aires sous les courbes (soit les nombres de particules) de la Figure 1 ci-dessus semblent similaires pendant les phases de démarrage et l'état stationnaire (modes culminant entre $5,10^7 \text{ #/cm}^3$ et $1,0^8 \text{ #/cm}^3$), le nombre de particules observées pendant la phase d'arrêt (mode culminant à 3.10^9 #/cm^3) se situe plusieurs ordres de grandeurs au-dessus des autres phases.

Les travaux de Lundgren et al. (2004) [6], portent sur les rejets de divers composés, émis par un appareil de combustion d'un nouveau type (en 2003) divisé en deux modules de combustion de [50 - 150] kW et [150 - 350] kW. Ces travaux proposent, entre autres, une analyse des émissions de CO lors des phases de démarrage et d'arrêt. L'une des caractéristiques de cette installation est la large plage de puissance thermique sur laquelle elle peut fonctionner (jusqu'à 10 % de sa charge maximale) tout en restant à des valeurs d'émission relativement basses. Les combustibles utilisés sont des plaquettes forestières.

Ainsi, dans le cas du monoxyde de carbone, des valeurs sensiblement plus élevées que durant la phase stationnaire sont observées lors des phases de démarrage et d'arrêt. Au regard des études s'intéressant à cette variabilité, il ressort que les fortes émissions de CO lors du démarrage sont corrélées à l'augmentation progressive de la température et à la diminution de l'excédent d'O₂ dans l'enceinte de combustion [6].

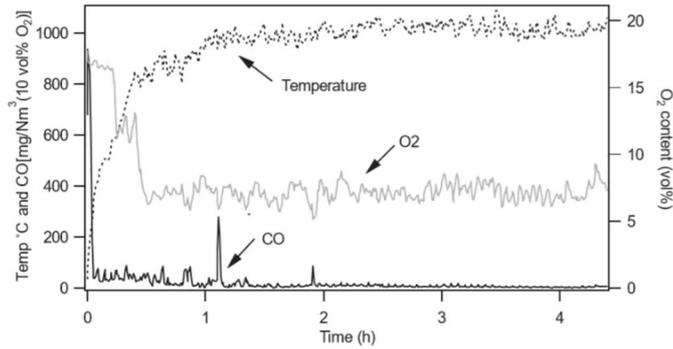


Figure 2 : Température de l'enceinte de combustion, contenu en O₂ et émissions de CO pour un combustible à 35 % d'humidité [6]

Cette étude met également en avant une variation de la durée de la phase de démarrage en fonction de l'humidité du combustible. En effet, plus le combustible est humide, plus le temps nécessaire pour sécher la biomasse sera conséquent, et ainsi plus longue sera la montée en température avant d'atteindre les conditions optimales.

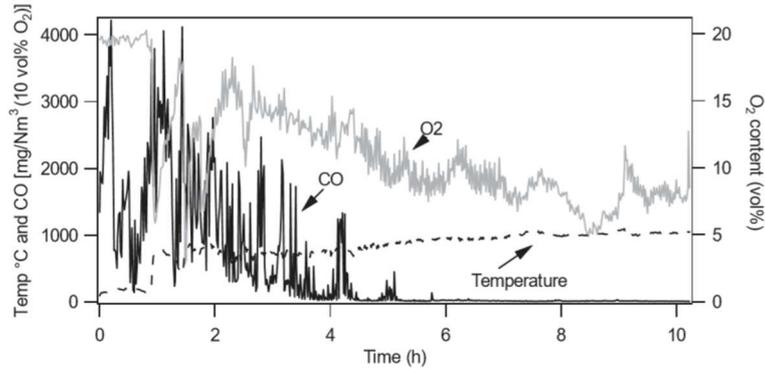


Figure 3 : Température de l'enceinte de combustion, contenu en O₂ et émissions de CO pour un combustible à 58 % d'humidité [6]

De la même manière sur la phase de transition entre combustion stationnaire et fin de combustion, une augmentation des émissions de CO corrélée à la baisse de la température de l'enceinte et à l'augmentation de l'excédent d'O₂ est observée.

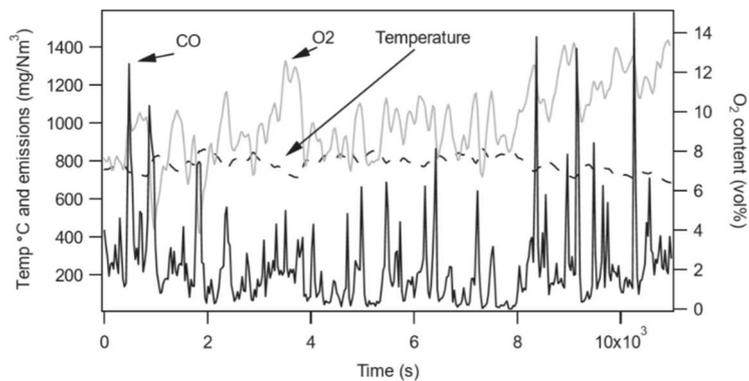


Figure 4 : Température de l'enceinte de combustion, contenu en O₂ et émissions de CO pour un combustible à 52 % d'humidité [6]

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 sont accrues 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.

1.4. Facteurs d'émission du monoxyde de carbone CO

Le monoxyde de carbone est produit lors de combustions incomplètes, déficitaires en oxygène. Comme celui-ci est incolore, inodore et très toxique à forte concentration (décès en moins de deux heures à partir de 1 600 ppm), il est la cause d'intoxications domestiques, parfois mortelles en cas d'absence de détection. Dans l'air ambiant, les concentrations en CO n'atteignent pas les valeurs limites réglementaires.

Les facteurs d'émission répertoriés dans la littérature ont été estimés pour plusieurs types d'appareils : des chaudières à grilles fixes ou mouvantes et plus marginalement des chaudières à lit fluidisé, des stockers, etc.

Les principales méthodes de mesures ayant permis l'obtention de ces données sont : l'analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la détection via des cellules électrochimiques et la méthode de la corrélation par filtres gazeux.

L'ensemble des données relatives aux émissions de CO est inventorié dans le tableau ci-dessous. Les résultats montrent une gamme très étendue de facteurs d'émission résultant entre autres de la très grande variabilité des dispositifs et des conditions de combustion. Les résultats des études tendent à montrer que plus on s'éloigne des conditions standards (permettant une combustion complète) et plus les émissions sont élevées. Les études traitées font état d'une gamme de facteurs d'émission variant de **4 g/GJ** à **7 364 g/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission relevé durant cette analyse bibliographique est de **4 g/GJ** et est issu d'une installation de combustion d'une puissance nominale de 350 kW et consommant des plaquettes forestières à plus de 40 % d'humidité, avec un taux de charge entre 70 et 100 % et 7 à 7,5 % d'O₂ [6].
- Le facteur d'émission le plus important rencontré est de **7 364 g/GJ** et est issu d'une installation à grille fixe d'une puissance nominale de 1,75 MW, alimentée aux granulés de bois à 7,7 % d'humidité, à faible taux de charge (20 %) et faible apport d'O₂ (7,5 %) [1].

Enfin, on peut noter que le facteur d'émission moyen résultant de l'ensemble des études (hors valeurs inférieures à la limite de quantification) s'élève à **558 g/GJ** et le facteur d'émission médian à **108 g/GJ**.

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les installations de combustion inférieures à 20 MW des secteurs de l'industrie, du chauffage urbain, et du tertiaire et fonctionnant à la biomasse est de **250 g/GJ**.

Combustible	Humidité	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteurs d'émission CO (g/GJ) ¹	Commentaire	Référence			
Granulé de bois	7,7 %	1,75 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	« Conventionnelle »		[7,5 - 9,9] % O ₂	[45 - 7 364]		[1]			
			50 %			[4,7 - 9,2] % O ₂	[505 - 4 484]					
Granulé de bois – basse densité			100 %			[3,7 - 9,5] % O ₂	[21 - 142]					
	8,8 %	2,50 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %			9,3 % O ₂	44					
Briquettes de bois			50 %			9,6 % O ₂	758					
			100 %			7,4 % O ₂	292					
Brique de bois – basse densité							[3,9 - 7,5] % O ₂			[95 - 265]		
							6,3 % O ₂			269		
Paille de blé	Faible	3,5 MW (grate boiler)	75 %			Land Lancom III gas analyseur - electrochemical sensor	6 800			6 % O ₂	2 373	Mesures lues sur graphique
Paille de blé + kaolin				1 600	558							
Paille de colza				5 555	1 938							
Paille de colza + kaolin				2 400	837							
Granulés de bois	4,6 %	150 kW	76 %	Gas Filter Correlation (48i Thermo Scientific)			102 ± 2,51		[3]			
Plaquettes forestières	26 %	150 kW	60 %				125 ± 4,29					
Granulés de bois	5,1 %	500 kW	[75 - 124] %				734 ± 125					
Miscanthus dopé à l'hydroxide de calcium (2% massique)		400 kW (rotation combustion boiler)	100 %	AirPointer (Recordummestechnik GmbH) - NDIR Gas Filter Correlation		T = 25°C P = 1 013 hPa	21 ± 6	Stable 1 (slightly disturbed)	[5]			
							4 425 ± 1 328	Burnout				
							58 ± 17	Start				
							7 ± 2	Stable 2				

¹ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

Plaquettes forestières		1,5 MW (moving grate boiler)	26,7 %				103 ± 31		
			[27 → 107] %				344 ± 103		
			107 %				33 ± 10		
			[107 → 120] %				229 ± 69		
			120 %				[94 - 163] ± [28 - 49]		
Plaquettes forestières	42,8 %	350 kW	71 %	FTIR	11	7,5 % O ₂	4		[6]
	44,7 %		100 %		11	7 % O ₂	4		
	[30 - 58] %	500 kW	100 %		15	4,7 % O ₂	5		
Plaquettes forestières	20 %	250 kW understoker furnace	81 %		11	11 % O ₂	6	R = 0 % ²	[37]
			70 %		14		7		
			64 %		18		9		
			78 %		19		10	R = 31 %	
			79 %		20		10	R = 30 %	
			76 %		18		9	R = 27 %	
			49 %		10		5	R = 38 %	
			55 %		21		11	R = 0 %	
Plaquettes forestières	23,3 %	Rotating grate combustion unit 10 MW		Gas analyzer (ABB, Cemas Gas Analysing Rack), FTIR	Below accuracy range (100 ppm)	7,7 ± 0,5 % O ₂			[7]/ [12]
Plaquettes forestières ('bole')	[41 - 43] %	Inclined grate stocker 2,05 MW	[35 - 70] %	TEIModel48 gas filter correlation infrared analyzer set at a range of 0-1000 cm ³ m ⁻³ CO			193		[8]
Plaquettes forestières ('mill end')	[43 - 45] %						193,9		

² Recirculation rate (%) (mass of recirculated flue gas/total mass of combustion air)

Granulés (Brassica carinata)	5 %	250 kW grate fired thermal conversion system	67 %	Flue gas analyzer Testo 350XL – electrochemical sensor		10,9 ± 0,6 % O ₂	144 ± 49		[23]
Granulés (Populus sp)	4,9 %		102 %			10,2 ± 0,5 % O ₂	91 ± 15		
Granulés (50% Brassica - 50% Populus)	4,9 %		77 %			11,8 ± 0,3 % O ₂	96 ± 54		
Plaquettes forestières	10,6 %	Boiler 140 kW	100 %	NDIR MIR 2M – Infrared Gas Filter Correlation	[377 – 5 000]	[0 - 18,2] % O ₂	[244 - 2 177]		[10]
Sciure et écorce de bois	22 %	Rotating grate 5 MW	[76 - 82] %			5,2 % O ₂	79 ± 77		[12]
	17 %		[74 - 80] %			5,1 % O ₂	68 ± 65		
Plaquettes forestières	24 %	Rotating grate 15 MW	[83 - 87] %			5 % O ₂	6.6 ± 0.6		
Sciure et écorce de bois	24 %	Rotating grate 10 MW	[69 - 82] %			4,6 % O ₂	≈ 12		
Plaquettes forestières	24 %	Gasification combustion 7 MW	[61 - 67] %			4 % O ₂	117 ± 304		
Plaquettes forestières / Sciure et écorce de bois		Reciprocating-grate boiler 12MW	63 %	FTIR	15	6 % O ₂	5	min : 0 mg/m ³ max : 82 mg/m ³	[13]
Granulés de bois (tronc)	8,3 %	500 kW reprocating grates boiler	63 %	FTIR		7,5 % O ₂	37 ± 64		[26]
	7,7 %		72 %			7,6 % O ₂	110 ± 100		
Granulés de bois (écorce)	10 %		64 %			8,1 % O ₂	140 ± 193		
Granulés de bois	9,2 %		82 %			7,7 % O ₂	161 ± 113		
Mélange granulés de bois (tronc et écorce)	8,3 %		66 %			7,4 % O ₂	242 ± 404		
Copeaux, chutes et sciure de bois	7,7 %	1,5 MW (with moving grates)	Bas	Chimiluminescence	873 ppm	8,0 % O ₂ , gaz sec	473		[22]
			Moyen		445 ppm	7,7 % O ₂ , gaz sec	236		
Granulés de bois	7,3 %	1,5 MW (with moving grates)	Bas (20%)		75 ppm	9,5 % O ₂ , gaz sec	44		

Bois naturel, panneaux de particules, palettes, etc.	[5 - 55] %	[0,2 - 8] MW			384	Conditions standards	202	min : 5 g/GJ max : 917 g/GJ (58 mesures)	[14]
Plaquettes forestières	38,7 %	8 MW	63 %	Infrarouge	28	6 % O ₂	16		[15]
Produits bois (fin de vie)	32,7 %	1,8 MW	107 %		39,2		14		
	35,3 %	2,5 MW	64 %		63,6		19		
Plaquettes forestières	22,8 %	6 MW	82 %		297		109		
Déchets de bois	38,3 %	7,2 MW lit fluidisé	55 %		152		59		
Plaquettes forestières	43,1 %	2,5 MW	76 %		75,3		29		
	41,4 %	10 MW	101 %		0,5		0		
	17,8 %	300 kW	68 %		170		78		
	19,9 %	21 MW	110 %		69,3		26		
Bois non-traité	Haute	15 MW (water cooled vibrating grate-firing bed)					85 ± 45		
				83 ± 33		43 ± 17	Medium dilution (DR = 20-40)		
				94 ± 30		49 ± 16	Hot sampling		

Tableau 3 : Facteurs d'émission du CO pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La figure 1 ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission du monoxyde de carbone du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

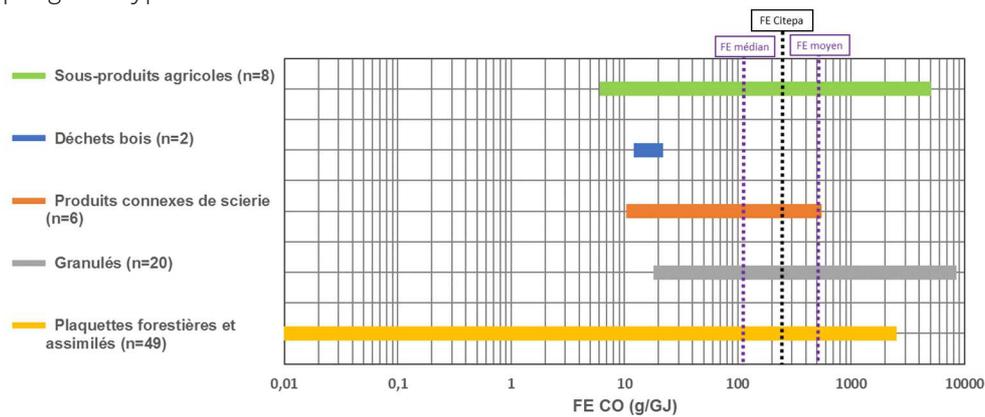
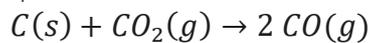


Figure 5 : Gammes des facteurs d'émission de CO par catégorie de combustible

La catégorie « Plaquettes forestières et assimilés » est la plus représentée dans la littérature. C'est celle qui présente la plus large gamme de facteurs d'émission avec une moyenne vers **325 g/GJ** et une médiane à **107 g/GJ**. La catégorie « Granulés » indique une gamme moins étendue et présente le facteur d'émission le plus élevé, à savoir **7 364 g/GJ**. La moyenne de cette catégorie est bien plus haute, à **991 g/GJ** avec une médiane à **125 g/GJ**.

Ce grand écart observable d'un extrême à l'autre de la gamme des facteurs d'émission relevés s'explique d'une part par la grande variabilité des dispositifs et des conditions de combustion et d'autre part, par les conditions de formation du CO. Seules quelques études obtiennent certaines mesures correspondant à des facteurs d'émission supérieurs à 1 000 g/GJ.

En effet, dans des conditions d'apport de dioxygène insuffisant, la combustion est incomplète et génère du CO au détriment du CO₂. De plus selon l'équilibre de Boudouard, une partie du dioxyde de carbone généré par la combustion est réduite par le carbone solide du combustible selon le mécanisme suivant :



En outre, lorsque l'oxygénation du foyer est insuffisante mais que la réaction est suffisamment exothermique pour maintenir une température de flamme assez haute, le monoxyde de carbone interagit avec l'O₂ atmosphérique pour former du dioxyde de carbone. Ces réactions thermo-chimiques interviennent dans des proportions propres aux conditions de combustion de chaque appareil et contribuent ainsi à la formation ou à la transformation du CO. Enfin, on peut souligner que les émissions de carbone inorganique trouvent leur source dans le carbone organique présent dans la biomasse sous forme de chaînes carbonées. Or le contenu en carbone des différents combustibles biomasse est variable. Il représente généralement 40 à 50 % de la composition massique. Tous ces processus sont constitutifs de la grande variabilité que l'on observe d'une borne à l'autre de la gamme des facteurs d'émission relevés dans la littérature.

La Figure 6 ci-dessous présente les facteurs d'émissions de CO par gamme de puissance des appareils.

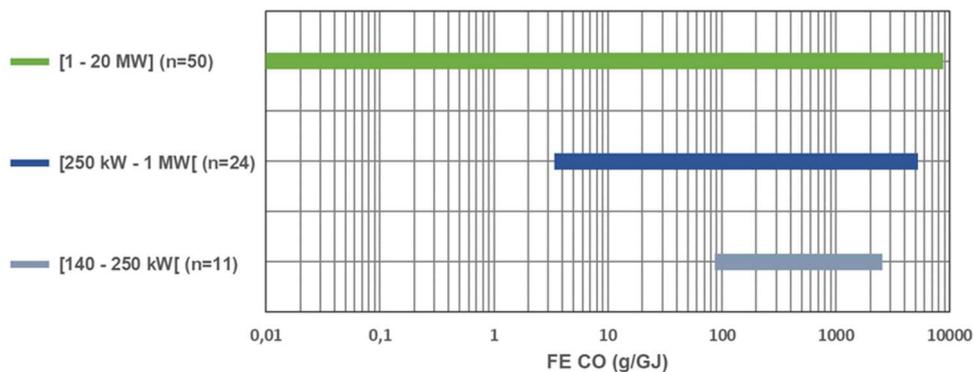


Figure 6 : Gammes des facteurs d'émission de CO par gamme de puissance d'appareil

Les chaudières plus puissantes permettent d'atteindre les émissions faibles en monoxyde de carbone, ce qui laisse supposer que plus les appareils de combustion sont puissants, plus la combustion est complète. Ce type de chaudières présente aussi les émissions de CO les plus élevées.

En revanche aux vues des résultats inventoriés dans le tableau ci-dessus, et tout particulièrement ceux de l'étude [5], on constate que les émissions sont variables en fonction de la phase de combustion. Il semble que lors de la phase de fin de combustion (ou phase de burnout) les émissions soient significativement plus importantes que lors des phases stables.

1.5. Facteurs d'émission des oxydes d'azotes NO_x

Les oxydes d'azote sont produits lors des processus de combustion, des procédés industriels, par l'activité biologique des sols et par l'activité électrique de la foudre. La dénomination NO_x regroupe deux espèces chimiques, le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO₂. Ce sont des composés très réactifs qui sont au centre de la chimie atmosphérique ; ils jouent un rôle essentiel dans la formation photochimique de l'ozone troposphérique et dans la formation de particules secondaires (nitrates). Une forte concentration des NO_x peut également conduire à la formation d'acide nitrique, un acide fort qui a une influence directe sur l'acidité des eaux de pluie. Le NO₂ a des impacts sanitaires (sur le système respiratoire notamment) et il conduit à des dépôts d'azote dans l'environnement encore trop importants.

Au travers de cette recherche bibliographique, nous avons relevé des facteurs d'émission d'oxydes d'azote pour divers types d'appareils : des chaudières à grille (fixe, mouvante, inclinée), des chaudières à combustion rotative, des foyers volcans et des chaudières à lit fluidisé.

Les méthodes de mesure ayant permis l'obtention de ces résultats sont principalement : la chimiluminescence, la détection via des cellules électrochimiques et l'utilisation d'analyseur infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).

L'ensemble des données relatives aux émissions de NO_x (exprimés généralement en équivalent NO₂) sont inventoriées dans le tableau ci-dessous. Les résultats montrent une gamme étendue de facteurs d'émission résultant de la grande variabilité des dispositifs et des conditions de combustion. En effet ceux-ci oscillent entre **7 g/GJ** et **340 g/GJ** :

- Le facteur d'émission le plus faible relevé durant cette étude est de **7 g/GJ** et est issu d'une installation d'une puissance nominale de 140 kW fonctionnant à 100 % de son taux de charge nominal, à 0 % d'O₂ et alimentée aux plaquettes forestières à 10,6 % d'humidité [10].
- À l'inverse le facteur d'émission le plus important rencontré dans cette étude est de **340 g/GJ** et est issu d'une installation à grille d'une puissance nominale de 250 kW fonctionnant à 67 % de son taux de charge nominal, à 10,9 % d'O₂ et consommant de la biomasse agricole (granulés de brassica carinata) à 5 % d'humidité [23].

Au regard de la littérature, on peut noter que le facteur d'émission moyen résultant de cette étude s'élève à **77 g/GJ** et le facteur d'émission médian est de **68 g/GJ**.

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les NO_x pour des installations de combustion de puissance inférieures à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de **200 g/GJ** pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et **132 g/GJ** pour celles qui en font partie.

Combustible	Humidité	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission NO _x (g/GJ) ³	Commentaires	Référence
Granulé de bois	7,7 %	1,75 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	« Conventiennelle »		[7,5 - 9,9] % O ₂	[17 - 25]		[1]
			50 %			[4,7 - 9,2] % O ₂	[26 - 33]		
			100 %			[3,7 - 9,5] % O ₂	[37 - 39]		
Granulé de bois – basse densité	8,8 %	2,50 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %			9,3 % O ₂	39		
			50 %			9,6 % O ₂	33		
			100 %			7,4 % O ₂	30		
Briquettes de bois	8,8 %	2,50 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	[3,9 - 7,5] % O ₂	[39 - 47]				
50 %			6,3 % O ₂	35					
100 %			6,3 % O ₂	35					
Paille de blé	Faible	3,5 MW (grate boiler)	75 %	Land Lancom III gas analyseur (cellules électrochimiques d'après la data sheet)	290	6 % O ₂	101	Mesures lues sur graphique	[31]
Paille de blé + kaolin					285		99		
Paille de colza					375		131		
Paille de colza + kaolin					435		152		
Copeaux, chutes et sciure de bois	7,70 %	1,5 MW (with moving grates)	Bas	Chimiluminescence	43 ppm	8,0 % O ₂ , gaz sec	23		[22]
			Moyen		59 ppm	7,7 % O ₂ , gaz sec	31		
Granulés de bois	7,30 %	1,5 MW (with moving grates)	Bas (20 %)		61 ppm	9,5 % O ₂ , gaz sec	36		
Plaquettes forestières		10 MW (rotating grate)		FTIR (Fourier Transform Infrared Analyser)		7,7 ± 0,5 % O ₂	146 ± 9	Exprimé en NO ₂ équivalent	[2]
Granulés de bois	4,6 %	150 kW	76 %	Chimiluminescence (42i Thermo Scientific)			17,3		[3]
Plaquettes forestières	26 %	150 kW	60 %				127		
Granulés de bois	5,1 %	500 kW	[75 - 124] %				35,9		
Bois non-traité	Haute				104 ± 9		54 ± 5		[4]

³ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

		15 MW (water cooled vibrating grate-firing bed)			103 ± 7	T = 273K, P = 1 atm, 11 % O ₂	54 ± 4	Résultats exprimés en NO ₂ équivalent, selon 3 configurations testées - SNCR	
					100 ± 9		52 ± 5		
Miscanthus dopé à l'hydroxide de calcium (2% massique)		400 kW (rotation combustion boiler)	100 %	AirPointer (Recordum mestechnik GmbH) - Chemiluminescence (EN14211)		T = 25°C, P = 1 013 hPa	103 ± 65	Résultats exprimés en NO ₂ équivalent	[5]
Plaquettes forestières		1,5 MW (moving grate boiler)	27 %		79 ± 24				
			[0,4 → 107] %		102 ± 31				
			107 %		99 ± 30				
			[107 → 120] %		78 ± 23				
			120 %		83 ± 25				
					84 ± 25				
	82 ± 25								
							[82 - 83] ± 25		
Plaquettes forestières	20 %	250 kW understoker furnace	71 %		144	11 % O ₂	75	R ⁴ = 0 %	[37]
			96 %		167		87		
			132 %		213		112		
			77 %		150		79		
			92 %		181		95		
			86 %		163		85		
			121 %		148		77		
			86 %		119		62		
Plaquettes forestières	42,8 %	350 kW	71 %	FTIR	193	7,5 % O ₂	75		[6]
	44,7 %	350 kW	100 %		191	7 % O ₂	71		
	[30 - 58] %	500 kW	100 %		195	4,7 % O ₂	62		
Plaquettes forestières	23,3 %	Rotating grate combustion unit 10 MW		Gas analyzer (ABB, Cemas Gas Analysing Rack) IFTR		7,7 ± 0,5 % O ₂	146 ± 9	NO _x as NO ₂	[7]/ [12]

⁴ Recirculation rate (%) (mass of recirculated flue gas/total mass of combustion air)

Plaquettes forestières ('bole')	[41 - 43] %	Inclined grate stocker 2,05 MW	[35 - 70] %	Thermo Environmental Instruments Inc. (TEI) Model 42H NO _x chemiluminescent monitor (range from 0 to 500 cm ³ .m ⁻³ dry basis NO _x)			124,2			
Plaquettes forestières ('mill end')	[43 - 45] %		[53 - 70] %				126			[8]
Granulés (Brassica carinata)	5,0 %	250 kW grate fired thermal conversion system	67 %	Flue gas analyzer Testo 350XL – electrochemical sensors			10,9 ± 0,6 % O ₂	340 ± 19	NO _x as NO ₂	[23]
Granulés (Populus sp)	4,9 %		102 %				10,2 ± 0,5 % O ₂	129 ± 3		
Granulés (50 % Brassica - 50 % Populus)	4,9 %		77 %				11,8 ± 0,3 % O ₂	200 ± 20		
Bois	41,1 %	Fixed grate air heater 568 kW		Non-dispersive infrared analysers			14,0 % O ₂	68	NO _x as NO ₂	[9]
	42,4 %	Fixed grate air heater 445 kW					15,5 % O ₂	61		
	38,6 %	Fixed grate air heater 730 kW					13,8 % O ₂	22		
	18,7 %	Fixed grate air heater 1,03 MW					12,7 % O ₂	32		
	43 %	Fixed grate air heater 538 kW					6,1 % O ₂	50		
Bois/coque de noix de coco	24,4 %	Fixed grate steam boiler 4,287 MW					11,0 % O ₂	35		
Balle de riz	10,7 %	Suspended firing steam boiler 847 kW					1,9 % O ₂	22		
	10,4 %	Suspended firing steam boiler 1,039 MW					5,9 % O ₂	105		
Contre-plaqué	45,7 %	Fixed grate steam boiler 6,6 MW					13,6 % O ₂	68		
Bagasse de canne à sucre	53,9 %	Chain grate stocker tube boiler 20 MW					12,1 % O ₂	25		

Plaquettes forestières	10,6 %	Boiler 140 kW	100 %	HCLD TOPAZE 32M-D - chemiluminescence	[18 - 70]	[0 - 18,2] % O ₂	[7 - 48]		[10]
Granulés de bois		12 MW biomass boiler	100 %		406 ± 4	0 °C 1 013 hPa 12,8 ± 0,8 % O ₂	[239 - 292] ± [2,4 - 2,9]	NO _x as NO ₂	[24]
Plaquettes forestières (saule 3 ans)	<20 %	120 kW heat output multifuel biomass boiler	100 %	Cross flow modulation chemiluminescence		10,21 % O ₂	166,9		[11]
Plaquettes forestières (épicéa 40 ans)						10,44 % O ₂	174,3		
						9,4 % O ₂	156,4		
						11,7 % O ₂	91,2		
Sciure et écorce de bois	22 % 17 %	Rotating grate 5 MW	[76 - 82] % [74 - 80] %			5,2 % O ₂	135 ± 9		[12]
Plaquettes forestières	24 %	Rotating grate 15 MW	[83 - 87] %			5,1 % O ₂	132 ± 9		
Sciure et écorce de bois	24 %	Rotating grate 10 MW	[69 - 82] %			5 % O ₂	156 ± 4		
Plaquettes forestières	24 %	Rotating grate 10 MW	[69 - 82] %			4,6 % O ₂	≈ 33		
Plaquettes forestières	24 %	Gasification combustion 7 MW	[61 - 67] %			4 % O ₂	91 ± 8		
Sciure et écorce de bois		Reciprocating-grate boiler 12MW	63 %	FTIR	77-107 ppmv	6 % O ₂	72		[13]
Plaquettes forestières			63 %		114-132 ppmv		93		
Granulés de bois contreplaqué et paille	4,76 %	210 kW fixed grate furnace		Testo 350 flue gaz analyser - electrochemical sensors	[116,57 - 284,57]	9 % O ₂	[51 - 124]	Les mesures varient selon les différents apports d'air primaires et secondaires	[25]
		1,4 MW fixed grate furnace			[148,14 - 338,12]		[65 - 148]		
Granulés de bois (tronc)	8,3 %		63 %	FTIR		7,5 % O ₂	52 ± 9	Les émissions sont exprimées	[26]
	7,7 %		72 %			7,6 % O ₂	52 ± 8		

Granulés de bois (écorce)	10 %	500 kW reproccating grates boiler	64 %			8,1 % O ₂	100 ± 19	en NO ₂ équivalentes	
Granulés de bois	9,2 %		82 %			7,7 % O ₂	81 ± 9		
Mélange de granulés de bois (tronc et écorce)	8,3 %		66 %			7,4 % O ₂	82 ± 15		
Bois naturel, panneaux de particules, palettes, etc.	[5 - 55] %	[0,2 - 8] MW			324	Conditions standards	185	min : 41 g/GJ max : 622 g/GJ (46 mesures)	[14]
Plaquettes forestières	38,7 %	8 MW	63 %	NF EN 14792 (Chimiluminescence)	212	6 % O ₂	118		[15]
Produits bois en fin de vie	32,7 %	1,8 MW	107 %		355		131		
	35,3 %	2,5 MW	64 %		481		140		
Plaquettes forestières	22,8 %	6 MW	82 %		205		75		
Déchets de bois	38,3 %	7,2 MW lit fluidisé	55 %		423		164		
Plaquettes forestières	43,1 %	2,5 MW	76 %		169		65		
	41,4 %	10 MW	101 %		227		83		
	17,8 %	300 kW	68 %		169		77		
	39,9 %	21 MW	110 %		232		87		

Tableau 4 : Facteurs d'émission des NO_x pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission du NO_x du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

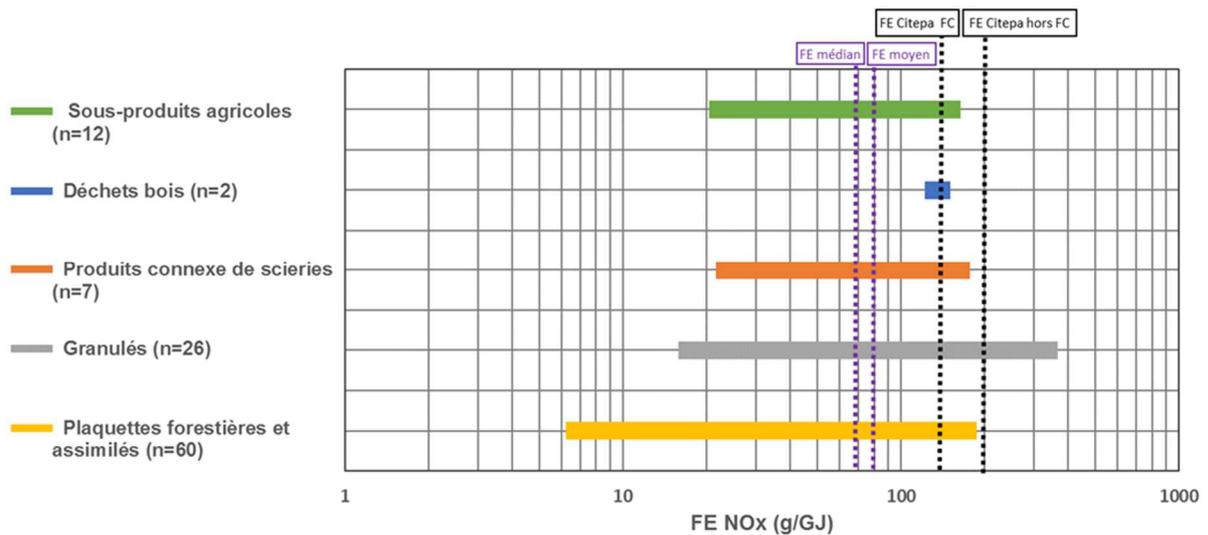


Figure 7 : Gammes des facteurs d'émission des NO_x par catégorie de combustible

La catégorie « Plaquettes forestières et assimilés » est la mieux représentée dans la littérature scientifique, elle couvre plus de 50 % des valeurs relevées. À l'inverse, les catégories « Déchets bois » et « Produits connexes de scierie » sont très peu représentées et le manque de données ne permet pas de formuler des généralités pour ces catégories de combustibles biomasse. On observe néanmoins que les émissions mesurées pour ces types de combustibles sont comprises dans les intervalles observables des « Granulés » ou du « Plaquettes forestières et assimilés ».

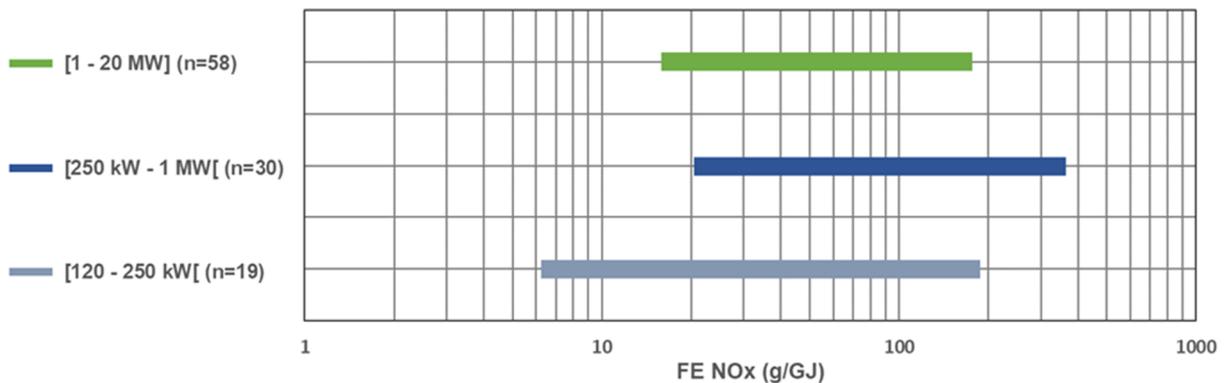


Figure 8 : Gammes des facteurs d'émission des NO_x par gamme de puissance d'appareils

La gamme de puissance [1 - 20] MW est la plus fréquemment observée dans la littérature scientifique, elle comptabilise plus de 50 % des mesures de facteur d'émission relevées. On n'observe pas de tendance spécifique entre la puissance nominale de l'installation et les facteurs d'émission associés. Cela peut s'expliquer par les mécanismes physico-chimiques de formation des oxydes d'azote. Les émissions de NO_x liées à la combustion du bois sont en effet principalement induites par deux phénomènes appelés NO_x thermique et NO_x combustible.

Les NO_x thermiques résultent de l'oxydation du diazote atmosphérique (près de 80 % de la composition volumique de l'air ambiant) à haute température, nécessitant un apport énergétique suffisant pour casser la triple liaison du diazote N₂. Les NO_x combustibles quant à eux sont émis par l'oxydation des azotes combinés du combustible. Ainsi, une partie des émissions dépend directement de la nature du combustible utilisé, tandis que les émissions NO_x thermiques sont principalement pilotées par les conditions de combustion. Pour cette dernière, le paramètre le plus influent est l'apport en comburant. La formation de NO_x thermiques (avec oxydation du NO) varie selon l'équation :

$$[NO] = k_1 e^{\left(-\frac{k_2}{T}\right)} [N_2][O_2]^{0,5t}$$

Avec :

- T la température (Kelvin)
- T le temps de séjour à haute température
- [] les concentrations en N_2 , O_2 , NO
- k_1 , k_2 des constantes

Ainsi la formation des NO_x thermiques augmente avec la température, le temps de séjour ou l'excès d'air tandis que la formation de NO_x combustible augmente avec la teneur en azote du combustible, la richesse en combustible du milieu réactionnel ainsi qu'avec la richesse de la flamme en O_2 libre. Par ailleurs, la formation de NO combustible est quasi indépendante de la température.

Ainsi il semble que les émissions de NO_x croissent avec le pourcentage d'excédent d' O_2 jusqu'à un certain point. Au-delà de ce point de bascule on observe une diminution des émissions. Lorsque l'apport en air dans le foyer de combustion devient trop important, le flux de N_2 refroidit l'enceinte. Les conditions ne sont alors plus optimales, la température de la flamme diminue grandement, l'énergie déployée par celle-ci n'est plus suffisante pour casser la triple liaison du N_2 et le phénomène s'estompe. Aux vues des résultats inventoriés dans ce document, ce point de bascule semble être variable selon la taille de l'appareil de combustion étudié, selon son facteur de charge et selon le combustible choisi. Ces points sont notamment présentés par Nussbaumer et al. (2003) [38] et la figure ci-dessous illustre l'impact de l'excès d'air sur la température de flamme en fonction de l'humidité du bois.

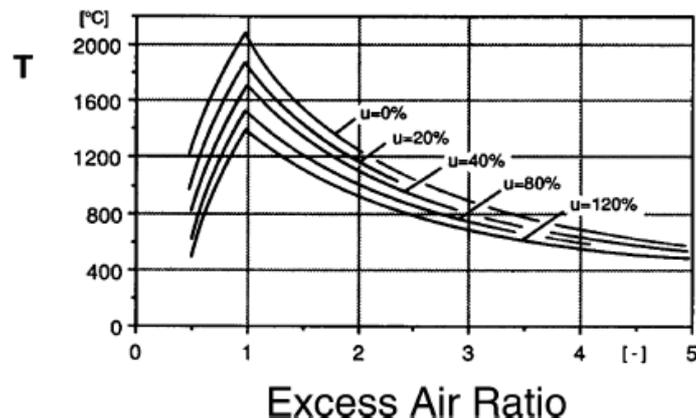


Figure 9 : Évolution de la température adiabatique de flamme à différents degrés d'humidité ($u=100\%$ correspond à une humidité de 50%) lors de la combustion de bois [38]

Les mesures primaires de réduction des émissions de NO_x passent par l'optimisation des apports d'air dans la chambre de combustion de biomasse, de la température et du temps de séjour. Les techniques primaires de réduction des émissions de NO_x sont largement étudiées dans la littérature notamment certaines études plus récentes et compatibles avec le périmètre de cet état de l'art [25] [10].

Des mesures secondaires de réduction peuvent également être implémentées et reposent sur des techniques de réduction catalytique (SCR) ou non catalytique (SNCR) usuellement par adjonction d'urée ou d'ammoniac observé notamment pour l'étude [4]. Pour des raisons de faisabilité technique ou économique, ces techniques restent peu utilisées pour les gammes de puissance étudiées.

1.6. Facteurs d'émission du dioxyde de soufre SO_2

Le SO_2 atmosphérique provient essentiellement des processus de combustion, principalement de la teneur en soufre plus ou moins importante des combustibles. Au cours de la combustion, le soufre contenu dans les combustibles est oxydé par l'oxygène de l'air. C'est un gaz dense, incolore, toxique, inflammable, avec une odeur pénétrante et fortement irritante pour les yeux et les voies respiratoires. Chez l'humain, l'exposition à une concentration élevée de ce composé peut induire des maladies des voies respiratoires, et une aggravation des maladies pulmonaires et cardio-vasculaires. Le dioxyde de soufre est le précurseur des sulfates, principaux composants des particules en suspension dans l'atmosphère, responsables des problèmes respiratoires évoqués précédemment. En plus d'avoir des

effets dommageables pour la santé, une fois rejeté dans l'atmosphère, le SO₂ peut se conjuguer avec l'eau atmosphérique et former des brouillards acides. Les émissions de SO₂ ont fortement contribué aux phénomènes d'acidification des pluies et par conséquent des lacs et rivières, entraînant aussi des impacts sur les écosystèmes (dépérissement des forêts par exemple). Au niveau des Nations Unies, la lutte contre ces phénomènes a été à la source de la mise en place de la Convention CLRTAP ou Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance de 1979. Depuis et à la suite de la mise en place de nombreux protocoles de réduction, les émissions dans la zone géographique couverte par la Convention ont été fortement réduites et le phénomène d'acidification quasi résolu (marqué par des baisses des précipitations et des dépôts de SO₄ ou par la hausse du pH aquatique) [39].

Les facteurs d'émission inventoriés dans la littérature sont principalement issus de tests réalisés sur des chaudières à grilles mobiles. De façon plus occasionnelle, certaines études fournissent des résultats provenant d'autres types d'appareils de combustion (stocker, etc.).

Les méthodes de mesures mises en place dans les études concernées sont la fluorescence ultraviolette et l'analyse infrarouge à transformée de Fourier.

L'ensemble des données relatives aux émissions de SO₂ sont inventoriées dans le tableau ci-dessous. Les résultats montrent une gamme de facteurs d'émission tout aussi étendue que les oxydes d'azote ou le monoxyde de carbone précédemment étudiés, avec des valeurs comprises entre **0,004 g/GJ** et **63 g/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission relevé dans la littérature dans le cadre de cette étude est de **0,004 g/GJ** et est issu d'une étude détaillant les émissions de divers appareils de combustion compris entre 5 et 50 MW alimentés à l'écorce de bois [29].
- À l'inverse le facteur le plus important rencontré est de **63 g/GJ** et est issu d'un appareil de combustion de 8 MW fonctionnant à 63 % de son taux de charge nominal, à 6 % d'O₂ et alimenté en plaquettes forestières à 38,7 % d'humidité [15].

On peut également noter que le facteur d'émission moyen résultant de cette étude s'élève à **5,82 g/GJ** et le facteur d'émission médian est de **2 g/GJ**.

Il est difficile de mettre en avant une tendance particulière concernant les émissions de dioxyde de soufre. En effet celles-ci sont principalement liées à la quantité de soufre présent dans le combustible et ne sont pas affectées par l'humidité du combustible ou par le type d'installation.

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les SO ₂ pour des installations de combustion de puissance inférieures à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 10 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 6 g/GJ pour celles qui en font partie.
--

Combustible (Teneur en soufre)	Humidité	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission SO ₂ (g/GJ) ⁵	Commentaire	Référence	
Granulés de bois (74,1 ppm)	4,6 %	150 kW	76 %	Fluorescence (43i Thermo Scientific)			0,21 ± 0,02		[3]	
Plaquettes forestières (175 ppm)	26 %		60 %				1,42 ± 0,02			
Granulés de bois (63,6 ppm)	5,1 %		500 kW				[75 - 124] %			0,44 ± 0,02
Ecorce + huile (NA)		[5 - 50] MW					0,003 – 0,08 (valeur moyenne 0,023)		[29]	
Ecorce (NA)		[5 - 50] MW					0,003 – 0,005 (valeur moyenne 0,004)			
Plaquettes forestières (<200 ppm)	23,3 %	Rotating grate combustion unit 10 MW		Gas analyzer (ABB, Cemas Gas Analysing Rack)	Below accuracy range (20 ppm)	7,7 ± 0,5 % O ₂			[7] / [12]	
Miscanthus dopé à l'hydroxide de calcium - 2% massique (NA)		400 kW (rotation combustion boiler)	100 %			T = 25°C P = 1 013 hPa	2,4 ± 0,7	Stable 1 (slightly disturbed)	[5]	
							25 ± 8	Burnout		
Plaquettes forestières (NA)		1,5 MW (moving grate boiler)	27 %				2,0 ± 0,6	Start		
							[0,4 → 107] %	2,7 ± 0,8		Stable 2
							107 %	1,4 ± 0,4		
							[107 → 120] %	1,7 ± 0,5		
			120 %				1,9 ± 0,6			
							[1,9 - 2,0] ± 0,6			

⁵ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

Plaquettes forestières ('bole' - 85,7 ppm)	[41 - 43] %	Inclined grate stocker 2,05 MW	[35 - 70] %	Continuous emissions analyzer according to US EPA Method 6C and set at a range of 0–250 cm ³ .m ⁻³ dry basis SO ₂			15		
Plaquettes forestières ('mill end' - 64,3 ppm)	[43 - 45] %		[53 - 70] %				5,6		
Granulés de bois (90 ppm)		12 MW biomass boiler	100 %		34 ± 4	0°C 1 013 hPa 12,8 ± 0,8 % O ₂	22 ± 3		[24]
Sciure et écorce de bois (190 ppm)	[22 - 17] %	Rotating grate 5 MW	[76 - 82] %				5,2 % O ₂	0,12 ± 0,23	
Plaquettes forestières (NA)	24 %		[74 - 80] %				5,1 % O ₂	0,019 ± 0,022	
Plaquettes forestières (128 ppm)	24 %	Rotating grate 15 MW	[83 - 87] %				5 % O ₂	0,017 ± 0,029	[12]
Plaquettes forestières (128 ppm)	24 %	Gasification combustion 7 MW	[69 - 82] %				4 % O ₂	7,6 ± 2,0	
Granulés de bois - tronc (<200 ppm)	8,3 %	500 kW reprocating grates boiler	63 %	FTIR			7,5 % O ₂	1,2 ± 1	
	7,7 %		72 %				7,6 % O ₂	3,5 ± 0,3	
Granulés de bois - écorce (200 ppm)	10 %		64 %				8,1 % O ₂	4,8 ± 2	
Granulés de bois (<200 ppm)	9,2 %		82 %				7,7 % O ₂	9,5 ± 0,8	
Mélange de granulés de bois - tronc et écorce (<200 ppm)	8,3 %		66 %				7,4 % O ₂	11 ± 2	
Bois naturel, panneaux de particules, palettes, etc.	[5 - 55] %	0,2 MW - 8MW			40	Conditions standards	21	min : 0,16 g/GJ max : 88 g/GJ (32 mesures)	[14]
Plaquettes forestières (1 842 ppm)	38,7 %	8 MW	63 %	Analyse par un laboratoire extérieur, passage du flux gazeux au-travers une solution	113		63,3		
Produits bois en fin de vie	25 ppm	1,8 MW	107 %		28	6 % O ₂	10,3	SO ₂ (hors SO ₃)	[15]
	351 ppm	2,5 MW	64 %		10,1		2,9		

Plaquettes forestières (177 ppm)	22,8 %	6 MW	82 %	d'absorption à 80% d'Isopropanol, dosage par chromatographie ionique	4,6		1,7		
Déchets de bois (246 ppm)	38,3 %	7,2 MW lit fluidisé	55 %		6,1		2,4		
Plaquettes forestières	112 ppm	2,5 MW	76 %		6,6		2,5		
	654 ppm	10 MW	101 %		16,9		6,2		
	177 ppm	300 kW	68 %		4,3		2		
	3 324 ppm	21 MW	110 %	13,7	5,1				
Bois non-traité (NA)	Haute	15 MW (water cooled vibrating grate-firing bed)			0,60 ± 0,06	T = 273 K P = 1 atm 11% O ₂	0,31 ± 0,03	Low dilution	[4]
					0,59 ± 0,02		0,31 ± 0,01	DR = [10 - 20] Medium dilution	
					0,6 ± 0,04		0,31 ± 0,02	DR = [20 - 40] Hot sampling	

Tableau 5 : Facteurs d'émission du SO₂ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission du SO₂ du tableau ci-dessus par grand type de combustible :

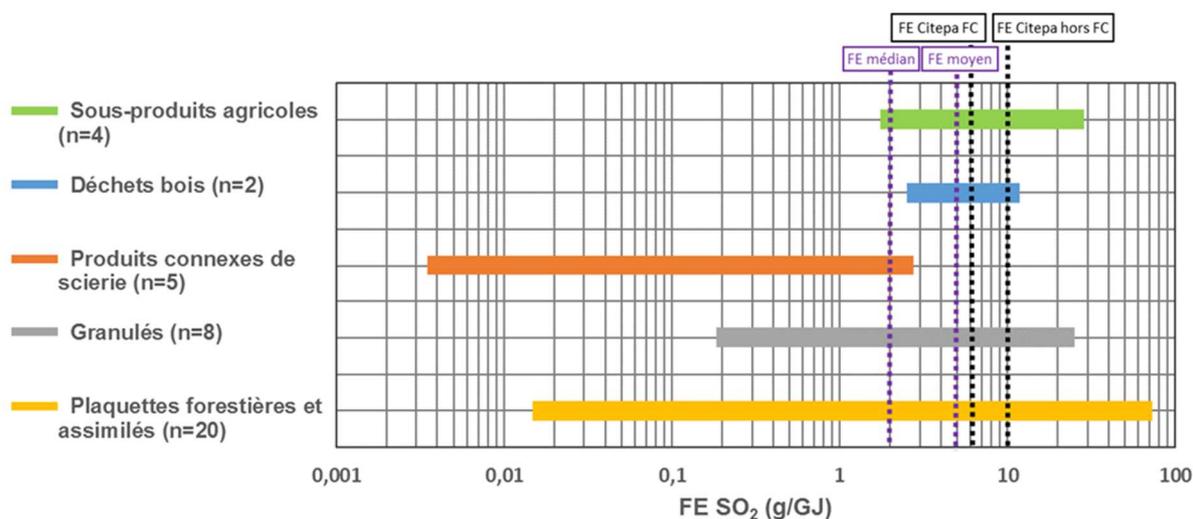


Figure 10 : Gammes des facteurs d'émission de SO₂ par catégorie de combustible

La catégorie « Plaquettes forestières et assimilés » est la mieux représentée dans la littérature. C'est également celle qui présente la plus large gamme de facteurs d'émission. On peut noter que sur l'ensemble des valeurs relevées dans ce travail pour le « Plaquettes forestières et assimilés », 75 % d'entre elles se trouvent sur la plage [1 - 25] g/GJ où l'on retrouve également les facteurs d'émissions utilisés dans les inventaires nationaux d'émissions.

De plus on constate également que les facteurs d'émission liés à la combustion des « Déchets bois » et des « Sous-produits agricoles » sont compris dans les gammes observées pour les « Plaquettes forestières et assimilés » et les « Granulés ». Ainsi, tous types de combustibles confondus, près de 75 % des facteurs d'émission inventoriés dans ce travail sont compris entre 1 g/GJ et 25 g/GJ.

Cette « homogénéité » s'explique en partie par l'origine du soufre contenu dans la biomasse. En effet celui-ci est issu de certains acides aminés – constituants des protéines – qui sont naturellement soufrés (cystéine, méthionine) et de quelques vitamines (biotine, thiamine et glutathionne). Ainsi la plupart des combustibles biomasse présentent des teneurs en soufre comparables (entre 0,1 et 0,5 %) bien que certains végétaux aient une tendance naturelle à plus absorber le soufre présent dans leur environnement. Les combustibles peuvent, en amont, subir des contaminations augmentant leur teneur en soufre, notamment par les eaux d'irrigation, des engrais minéraux ou via le réservoir atmosphérique (précipitations par les eaux de pluie ou directement par absorption du SO₂ atmosphérique).

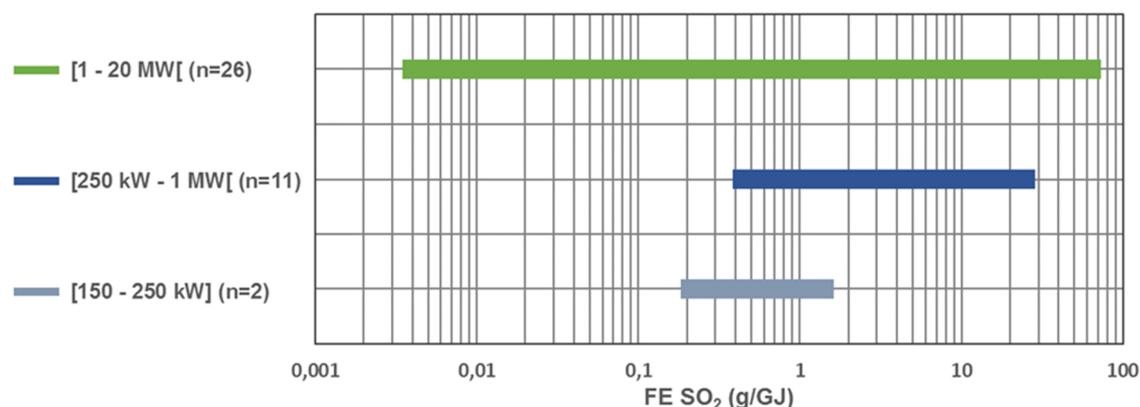


Figure 11 : Gammes des facteurs d'émission de SO₂ par gamme de puissance d'appareils

La gamme de puissance [1 - 20 MW] est la mieux représentée dans les études identifiées. Les facteurs d'émission les plus bas sont issus d'études couvrant aussi bien la gamme la plus haute [1 - 20 MW] que la gamme la plus basse [150 - 250 kW], considérée à titre indicatif.

1.6.1.1. Facteurs d'émission de l'ammoniac (NH₃)

L'ammoniac est un des composés azotés émis dans l'atmosphère lors des transformations microbiennes qui accompagnent le cycle de l'azote dans le sol. Il provient principalement de l'utilisation d'engrais dans l'agriculture, et de la gestion des effluents d'élevage. Cependant, une faible part des émissions d'ammoniac est issue de procédés énergétiques, et plus particulièrement de la combustion de la biomasse. Sa solubilité élevée fait de lui un acteur important dans l'acidification et l'eutrophisation (surabondance d'éléments nutritifs azotés) des écosystèmes. Une fois émis, il ne reste que quelques heures dans l'atmosphère, mais engendre une cascade d'effets environnementaux qui, à des concentrations élevées, affectent la faune, la flore, et la qualité de l'air localement. Il est démontré qu'il endommage le système respiratoire des animaux d'élevages intensifs qui y sont fortement et fréquemment exposés. Il peut également entraîner chez l'être humain un dysfonctionnement du système nerveux.

Les rejets d'ammoniac par la combustion sont peu importants ; peu d'études fournissent donc des facteurs d'émission de ce composé. Ceux inventoriés dans ce rapport sont issus de chaudières à grilles fixes et mouvantes. La méthode de mesure mise en place dans les études concernées est l'analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).

Les quelques études détaillant les émissions de NH₃ décrivent des appareils de combustion compris dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,01 g/GJ** et **6 g/GJ** et sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,01 g/GJ**) est obtenu sur divers appareils de combustion et pour différents combustibles dans des conditions de combustion variables. Dans cette étude, une partie des émissions d'ammoniac n'a pas pu être quantifiée en raison d'une gamme de mesures de l'appareil trop faible. Ainsi une part des émissions est définie comme < 1 g/GJ. Nous avons fait le choix de définir ces mesures comme comprises entre 0,01 g/GJ et 1 g/GJ.
- Le plus important facteur d'émission (**6 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 7,7 % d'humidité dans une chaudière de 1,75 MW, à faible taux de charge (20 %) et à 7,5 % d'O₂ [1].

Compte tenu du nombre réduit d'études exploitables, il est difficile de mettre en avant une tendance particulière concernant les émissions d'ammoniac.

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 37 g/GJ.

Combustible	Humidité	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode de mesure	Mesure (mg/m ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission NH ₃ (g/GJ) ⁶	Commentaire	Référence
Granulé de bois	7,7 %	1,75 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)		[7,5 - 9,9] % O ₂	[<1 - 6]		[1]
			50 %			[4,7 - 9,2] % O ₂	[<1 - 3]		
			100 %			[3,7 - 9,5] % O ₂	< 1		
Briquettes de bois	8,8 %	2,50 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %			9,6 % O ₂	< 1		
			50 %			7,4 % O ₂			
			100 %			3,9 % O ₂			
[4,8 - 7,5] % O ₂									
Briquette de bois – basse densité			6,3 % O ₂						
Bois non traité	Elevé	15 MW (water cooled vibrating grate-firing bed)			0,17 ± 0,16	T = 273K P = 1 atm 11% O ₂	0,09 ± 0,08	SNCR	[4]
					0,08 ± 0,07		0,04 ± 0,04		
					0,09 ± 0,08		0,05 ± 0,04		

Tableau 6 : Facteurs d'émission du NH₃ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

⁶ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission du NH₃ du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

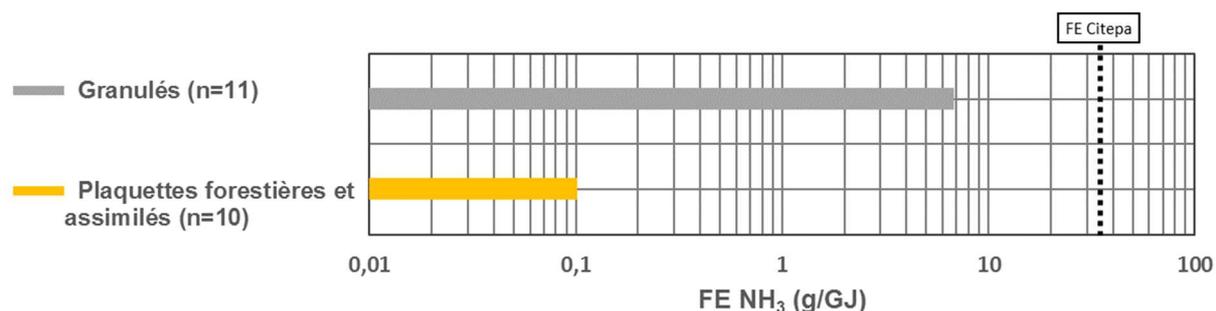
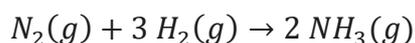


Figure 12 : Gammes des facteurs d'émission de NH₃ par catégorie de combustible

Seules les catégories « Plaquettes forestières et assimilés » et « Granulés » ont été relevées dans la littérature. Cette dernière est celle qui présente la gamme de valeur la plus étendue. De la même manière que pour les oxydes d'azote, les émissions de NH₃ sont issues de plusieurs phénomènes physico-chimiques, les émissions NH₃ thermiques et les émissions liées à l'azote du combustible. Les émissions de NH₃ thermiques sont issues de la réaction de synthèse de l'ammoniac à partir de diazote et de dihydrogène atmosphérique :



La part restante des émissions d'ammoniac est principalement pilotée par la quantité d'azote présente naturellement dans le combustible. En effet, l'azote est consommé par la biomasse sous différentes formes, principalement sous sa forme nitrique (NO₃⁻) et marginalement sous sa forme ammoniacale (NH₄⁺) et dans des proportions variables selon l'espèce végétale considérée.

Ainsi au regard des résultats présentés dans le Tableau 6 et plus spécifiquement ceux de l'étude de [Johansson et al. \(2001\)](#) [1], on observe que, pour un même combustible (donc une quantité d'azote similaire) et à facteur de charge constant, les émissions de NH₃ semblent sensiblement diminuées par la baisse de l'oxygénation du foyer de combustion. De plus les résultats de cette même étude semblent mettre en avant une diminution progressive des émissions de NH₃ lorsque le taux de charge augmente.

Il convient de souligner que le manque de données exploitables pour ce polluant rend délicate toute interprétation et qu'il reste marginal.

Il est à noter que l'usage de techniques de réduction des émissions de NO_x par injection de NH₃ ou d'urée dans la chambre de combustion (SNCR : réduction sélective non catalytique) ou au niveau des gaz de combustion en présence d'un catalyseur (SCR : réduction catalytique sélective) peut conduire à des émissions de NH₃ (la fuite), si la maîtrise des températures n'est pas obtenue ou si les réactifs sont mal dosés. Toutefois, ces techniques sont peu répandues sur les gammes de puissances étudiées.

1.7. Facteurs d'émission des Composés Organiques Volatils (COV)

Les composés organiques volatils sont des espèces gazeuses qui regroupent un grand nombre de composés contenant du carbone et de l'hydrogène (hydrocarbures), de l'oxygène dans les cas des composés oxygénés, du chlore, du fluor ou encore de l'azote. Leurs effets sur la santé dépendent donc des substances considérées. Certains COV peuvent provoquer des irritations sensorielles sans impacts sanitaires. Des manifestations plus sévères telles que les troubles cardiaques et digestifs, ou les effets cancérogènes et mutagènes, sont liés à des expositions chroniques ou intenses dans certaines ambiances de travail (composés aromatiques comme le benzène par exemple). En outre, les COV interviennent dans le processus de production d'ozone dans la basse atmosphère en présence d'oxydes d'azotes (voir 1.5 Facteurs d'émission des oxydes d'azotes NO_x). Les COV sont issus des phénomènes de combustion, de l'usage de solvants organiques dans de nombreux produits industriels ou domestiques (peintures, encres, colles, etc.). Ils sont aussi émis par évaporation de matières organiques.

Le méthane (CH₄) est un composé organique mais il est traité seul dans le paragraphe suivant. Les émissions de COV produites dans les inventaires ne traitent que des COV non méthaniques.

La combustion du bois émet des COV et ces émissions peuvent être particulièrement élevées en cas de combustion incomplète, notamment lorsque la concentration en oxygène est trop faible ou qu'un excès d'air trop élevé abaisse la température de flamme et *in fine* la qualité de la combustion.

Comme le rapport de l'ADEME (« Evaluation des impacts sur la qualité de l'air des actions de modernisation du parc d'appareils de chauffage au bois à Lanslebourg », 2014) [40] le souligne ainsi que la littérature (notamment l'étude de Tissari et al. (2007) [41]) les mesures faites par FTIR (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier) donnent des résultats plus exacts qu'avec un FID (détection par ionisation de flamme), ce qui peut conduire à des facteurs d'émission de COV totaux 30 % supérieurs à ceux obtenus avec un FID. En effet, chaque COV a son coefficient de réponse propre lors d'une détection par FID ; les concentrations de COV totaux peuvent donc être sous-estimées.

Par ailleurs des COV spécifiques comme le benzène ou le toluène sont parfois couverts par les études identifiées dans la littérature, du fait de leur dangerosité, mais n'ont pas été pris en compte dans ce travail bibliographique.

Dans l'étude de Rector et al. (2017) [8], les facteurs d'émission sont exprimés en équivalent propane. Afin de pouvoir comparer les différents résultats entre eux (Figure 13 et Figure 14), ceux-ci ont été convertis en équivalent méthane à partir des masses molaires selon la formule suivante :

$$FE(eqCH_4) = FE(eqC_3H_8) * \frac{M_{CH_4}}{M_{C_3H_8}}$$

- FE : Facteur d'émission exprimé en équivalent méthane (CH₄) ou en équivalent propane (C₃H₈)
- M_{CH₄} : masse molaire du méthane
- M_{C₃H₈} : masse molaire du propane

L'étude de l'ADEME (« Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse - Campagne de mesure 2016 », 2018) [15] ne propose pas de facteurs d'émission pour les COVT (COV totaux). Ceux présentés dans le tableau ci-dessous correspondent donc à des COVNM (COV non méthaniques).

Peu de références étudiées détaillent les émissions en COVT, elles sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,1 g/GJ** et **492 g/GJ** et sont présentés dans le tableau ci-dessous :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,1 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières à 39,9 % d'humidité dans une chaudière de 21 MW, à 110 % de taux de charge et 6 % d'O₂ [15].
- Le plus important (**492 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 7,7 % d'humidité dans une chaudière de 1,75 MW, à faible taux de charge (20 %) et à 7,5 % d'O₂ [1].

Par ailleurs le facteur d'émission moyen (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) résultant de l'ensemble des études identifiées est de **23,3 g/GJ** et le facteur d'émission médian de **4 g/GJ**.

Le Citepa ne propose pas de facteurs d'émissions pour les COVT mais à titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les COVNM pour des installations de combustion de puissance inférieures à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 4,8 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 2,2 g/GJ pour celles qui en font partie. Cela correspond à des facteurs d'émission dans la partie haute des intervalles observés en conditions classiques de combustion

Combustible	Humidité	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission COVT (g/GJ) ⁷	Commentaire	Référence
Granulé de bois	7,7 %	1,75 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	Conventionnelle		[7,5 - 9,9] % O ₂	[2 - 492]	THC (TotalHydroCarbons) exprimé en équivalent méthane	[1]
			50 %			[4,7 - 9,2] % O ₂	[9 - 106]		
			100 %			[3,7 - 9,5] % O ₂	< 1		
Granulé de bois – basse densité			9,3 % O ₂	< 1					
Briquettes de bois	8,8 %	2,50 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	Conventionnelle		9,6 % O ₂	< 1		
			50 %			7,4 % O ₂	2		
			100 %			[3,9 - 7,5] % O ₂	[<1 - 3]		
Briquette de bois – basse densité					6,3 % O ₂	2			
Plaquettes forestières	42,8 %	350 kW	71 %	Détecteur à ionisation de flamme	0,4	7,5 % O ₂	0,15	THC	[6]
	44,7 %		100 %			0,5	7 % O ₂		
Plaquettes forestières ('bole')	[41 - 43] %	Inclined grate stocker 2050 kW	[35 - 70] %	TECO 51 flame ionization analyser			7,7	Convertis en équivalent méthane	[8]
Plaquettes forestières ('mill end')	[43 - 45] %		[53 - 70] %				2,3		
Bois naturel, panneaux de particules, palettes, etc.	[5 - 55] %	[0,2 - 8] MW			6	Conditions standards	4	[0,06 - 18] g eqC/GJ (17 mesures)	[14]
Plaquettes forestières	38,7 %	8 MW	63 %	Détermination de la concentration massique en COVNM dans les effluents gazeux, à partir des mesures des COVT et du méthane	2,4	6 % O ₂	1,3	FE exprimés en COVNM	[15]
Produits bois (fin de vie)	32,7 %	1,8 MW	107 %		1		0,4		
	35,3 %	2,5 MW	64 %		2,4		0,7		
Plaquettes forestières	22,8 %	6 MW	82 %		1,7		0,6		
Déchets de bois	38,3 %	7,2 MW lit fluidisé	55 %		1,1		0,4		
Plaquettes forestières	43,1 %	2,5 MW	76 %		0,8		0,3		
	41,4 %	10 MW	101 %		1		0,4		
	17,8 %	300 kW	68 %		3		1,4		
	39,9 %	21 MW	110 %	0,2	0,1				

Tableau 7 : Facteurs d'émission des COVT pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

⁷ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** sont indiquées **en vert**.

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission des COVT du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

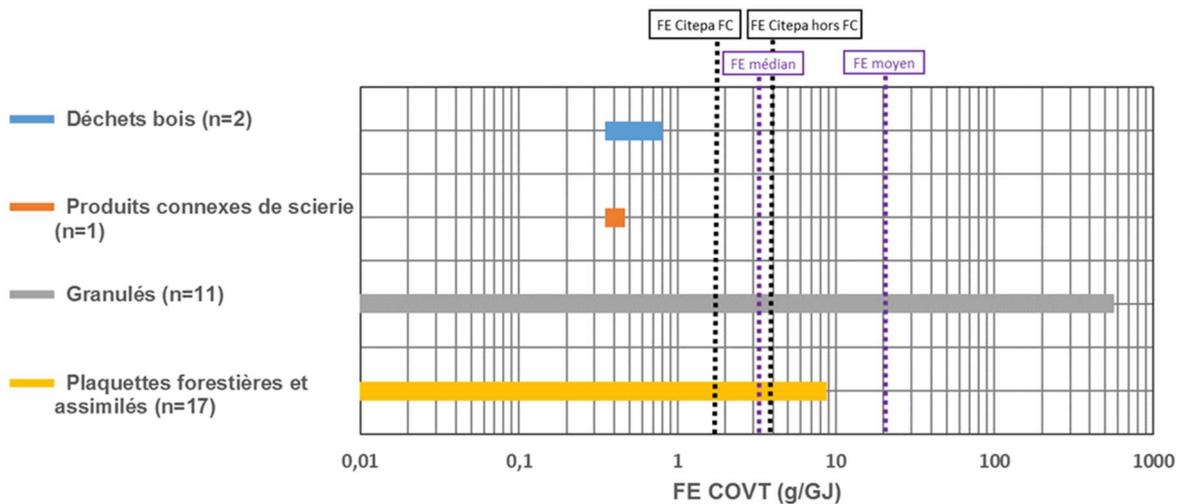


Figure 13 : Gammes des facteurs d'émission de COVT par catégorie de combustible

Les catégories « Déchets bois » et « Produits connexes de scierie » sont très peu représentées. Le peu de données ne permet pas d'énoncer des généralités pour ces catégories. On observe néanmoins que les émissions observées pour ces types de combustibles sont comprises dans les intervalles observables des « Granulés » ou du « Plaquettes forestières et assimilés ».

Par ailleurs, aucune étude correspondant à la catégorie « Sous-produits agricoles » n'a été identifiée.

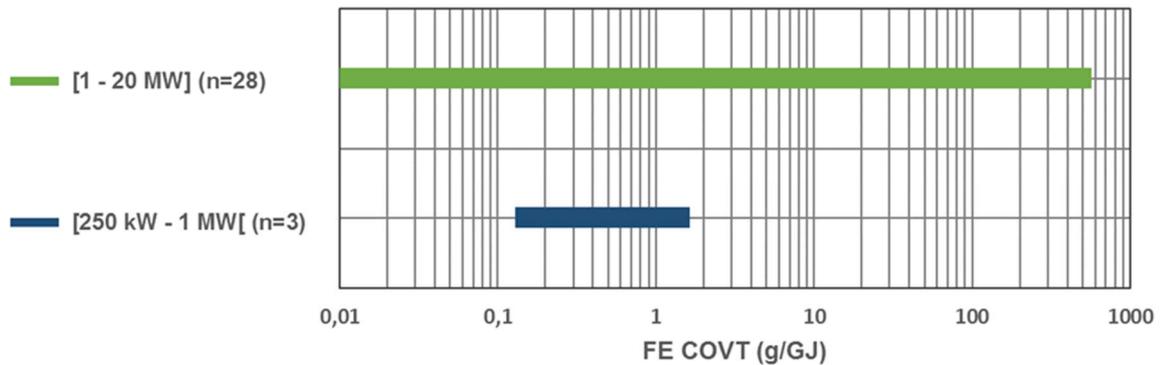


Figure 14 : Gammes des facteurs d'émission de COVT par gamme de puissance d'appareil

Dans la Figure 13 et la Figure 14, les valeurs de facteurs d'émission indiquées comme inférieure à 1 dans l'étude de Johansson et al (2001) [1] ont été représentées sur l'intervalle [0,01 - 1] g/GJ.

La catégorie [250 kW - 1 MW] est très peu représentée dans la littérature identifiée où les facteurs d'émission sont directement exprimés en g/GJ, avec une seule référence pertinente [15].

Les valeurs particulièrement hautes d'émissions ont été obtenues pour l'étude [1] avec des allures dégradées (20 ou 50 %), des faibles taux d'excès d'air et des granulés de bois. Hormis ces cas particuliers, la plupart des facteurs d'émission identifiés ne dépassent pas 10 g/GJ en COVT quel que soit le type de combustible biomasse utilisé.

L'étude de Johansson et al (2001) [1] met notamment en évidence l'augmentation des émissions de COVT avec la baisse du taux de charge ou le défaut d'air, toutes conditions étant égales par ailleurs.

1.8. Facteurs d'émission du méthane CH₄

Le méthane est un des gaz à effet de serre et possède un pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans estimé à 28 fois celui du dioxyde de carbone selon le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat). C'est un gaz incolore, inodore et non toxique, produit essentiellement de manière biologique. Il peut être émis par la fermentation entérique des ruminants, par les décharges ou par les réseaux de transport et de distribution de gaz naturel (lors de fuites, accidents, ou opérations de maintenance par exemple).

La combustion du bois, notamment résidentielle, est également source d'émissions de méthane. Cette substance est un composé organique et est considérée comme prédominante dans les émissions de la combustion de biomasse [41].

Peu de références étudiées mesurent et rapportent les émissions en CH₄, et les quelques-unes le faisant sont principalement comprises dans la gamme de puissance d'équipement [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émissions se situent entre **0,1 g/GJ** et **387 g/GJ** :

- La plus faible valeur observée (**0,1 g/GJ**) (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) est obtenue pour la combustion de granulés de bois à 8,3 % d'humidité, dans une chaudière de 500 kW, à 63 % de taux de charge et 7,5 % d'O₂ [15].
- Le facteur d'émission le plus important (**387 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 7,7 % d'humidité dans une chaudière de 1,75 MW, à faible taux de charge (20 %) et à 7,5 % d'O₂ [1].

L'étude [1] reporte également les émissions d'éthène (C₂H₄), et constate que ce composé est minoritaire dans des conditions de combustion standards mais que ces émissions peuvent augmenter significativement pour un faible taux de charge et/ou pour un faible excès d'air comme résumé dans le tableau ci-dessous. Il convient de préciser que les COVT dans cette étude sont déterminés par des « moyens de mesures conventionnels » et qu'ils peuvent être sous-estimés comme souligné au paragraphe 1.7 tandis que le CH₄ et le C₂H₄ sont mesurés par FTIR.

Facteur de charge	Taux d'O ₂	Proportion de CH ₄ /COVT	Proportion de C ₂ H ₄ /COVT
20 %	7,5 %	78,66 %	7 %
	8,5 %	69 %	2 %
50 %	4,7 %	65,1 %	3 %
	7,4 %	Non détecté	3 %
	9,2 %	Non détecté	19 %
100 %	[3,7 - 9,5] %	COVT non détectés	

Tableau 8 : Proportions respectives du CH₄ et du C₂H₄ dans les COVT mesurés issues de [1], chaudière de 1,75 MW alimentée aux granulés de bois

Par ailleurs le facteur d'émission moyen CH₄ (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) résultant de l'ensemble des études identifiées (présentées dans le Tableau 9 ci-dessous) est de **40,9 g/GJ** et le facteur d'émission médian de **0,5 g/GJ**.

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour le CH₄ pour des installations de combustion de puissance inférieures à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de **3,2 g/GJ** pour les secteurs tertiaires, du chauffage urbain et de l'agriculture, et de **30 g/GJ** pour le secteur de l'industrie manufacturière où aucune distinction n'est réalisée entre les gammes [0 - 20] et [20 - 50] MW.

Combustible	Humidité	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission CH ₄ (g/GJ)	Commentaire	Référence
Granulé de bois	7,7 %	1,75 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)		[7,5 - 9,9] % O ₂	[< 1 - 387]		[1]
			50 %			[4,7 - 9,2] % O ₂	[<1 - 69]		
			100 %			[3,7 - 9,5] % O ₂	< 1		
Granulé de bois – basse densité						9,3 % O ₂	< 1		
Briquettes de bois	8,8 %	2,50 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %			9,6 % O ₂	< 1		
			50 %			7,4 % O ₂	< 1		
			100 %			[3,9 - 7,5] % O ₂	[< 1 - 4]		
Briquette de bois – basse densité						6,3 % O ₂	< 1		
Granulés de bois (tronc)	8,3 %	500 kW reciprocating grates boiler	63 %	FTIR		7,5 % O ₂	0,1 ± 0,9		[26]
	7,7 %		72 %			7,6 % O ₂	0,2 ± 0,6		
Granulés de bois (écorce)	10 %		64 %			8,1 % O ₂	0,9 ± 5		
Granulés de bois	9,2 %		82 %			7,7 % O ₂	0,4 ± 1		
Mélange de granulés de bois (tronc et écorce)	8,3 %		66 %			7,4 % O ₂	2 ± 7		
Plaquettes forestières	38,7 %	8 MW	63 %	Détermination de la concentration massique en composés organiques volatils non méthaniques dans les effluents gazeux, à partir des mesures des composés organiques volatils totaux et du méthane	2,0	6 % O ₂	1,1		[15]
Produits bois (fin de vie)	32,7 %	1,8 MW	107 %	0,1	0,2				
	35,3 %	2,5 MW	64 %	0,5	0,2				
Plaquettes forestières	22,8 %	6 MW	82 %	0,2	0,4				
Déchets de bois	38,3 %	7,2 MW lit fluidisé	55 %	1,8	0,0				
Plaquettes forestières	43,1 %	2,5 MW	76 %	0,3	0,0				
	41,4 %	10 MW	101 %	2,3	0,2				
	17,8 %	300 kW	68 %	0,1	0,5				
	39,9 %	21 MW	110 %	0,2	0,0				

Tableau 9 : Facteurs d'émission du CH₄ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La Figure 15 ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission du CH₄ du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

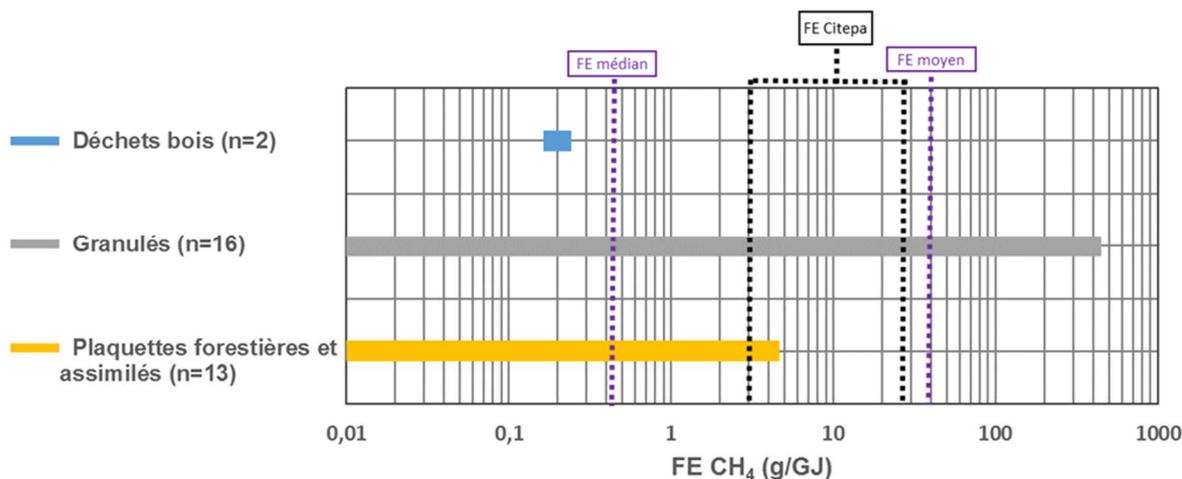


Figure 15 : Gammes des facteurs d'émission de CH₄ par catégorie de combustible

La catégorie « Déchets bois » est très peu représentée. Par ailleurs, aucune étude correspondant à la catégorie « Sous-produits agricoles » n'a été identifiée. La seule étude couvrant la catégorie « Produits connexes de scierie » présente une valeur nulle [15] et n'a donc pas été représentée sur la figure ci-dessus. Les granulés présentent des valeurs de facteur d'émission pouvant être bien supérieures aux maxima observés pour les autres combustibles, cependant le nombre limité d'études et de conditions de combustion différentes (facteur de charge, puissance d'équipement, excès d'oxygène, etc.) ne permettent pas de conclure sur l'influence du type de combustible sur les facteurs d'émission du CH₄.

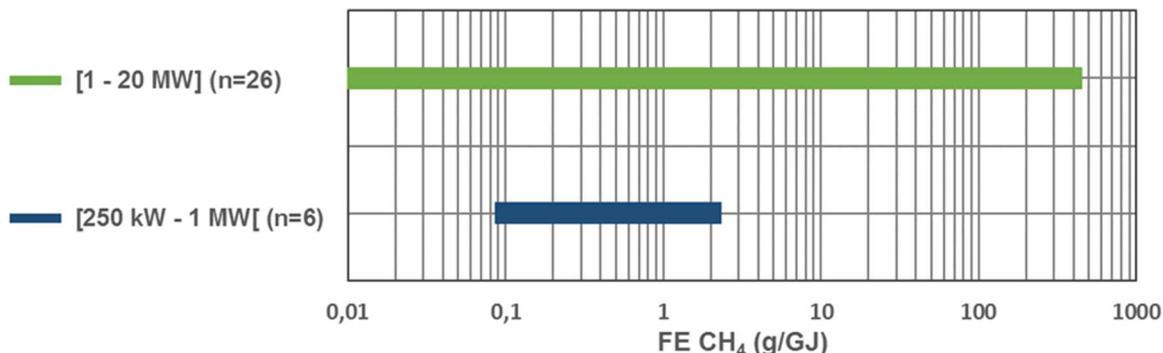


Figure 16 : Gammes des facteurs d'émission de CH₄ par gamme de puissance d'appareil

Dans la Figure 15 et la Figure 16, les valeurs de facteurs d'émission indiquées comme inférieures à 1 ou égales à 0 dans l'étude de [Johansson et al. \(2001\)](#) [1] ont été représentées sur l'intervalle [0,01 - 1] g/GJ. Les valeurs particulièrement hautes d'émissions ont été obtenues pour l'étude de [Johansson et al \(2001\)](#) [1] avec des allures dégradées (20 ou 50 %), des faibles taux d'excès d'air et des granulés de bois. Hormis ces cas particuliers, la plupart des facteurs d'émission identifiés ne dépassent pas quelques g/GJ en CH₄ émis.

1.9. Facteurs d'émission des particules

Outre les gaz, la combustion de biomasse est à l'origine d'émission dans l'atmosphère de matières en suspension en phases liquide et solide (aérosols), représentant un mélange complexe de substances chimiques organiques et inorganiques, que l'on regroupe sous le terme général de "particules en suspension". Ces particules en suspension sont souvent désignées par l'abréviation TSP (pour « Total

Suspended Particles ») qui sont aussi appelées PM, provenant de l'anglais « Particulate Matter », lorsque plusieurs tailles de particules sont distinguées, avec un suffixe pour désigner la taille en microns (μm). Elles sont classées comme cancérigènes pour l'Homme depuis 2013 par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). La toxicité de ces particules provient à la fois de leur composition et de leur taille. Plus les particules sont fines, plus elles sont capables de pénétrer profondément dans l'arborescence pulmonaire et de circuler par voie sanguine jusqu'à d'autres organes. On classe les particules en plusieurs grandes catégories granulométriques : TSP, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ et PM_{0,1}.

La combustion du bois entraîne d'importantes émissions de particules. Des systèmes de traitement de fumée permettent de réduire efficacement leur quantité et sont quasiment systématiquement utilisés dans la gamme de puissance thermique étudiée [250 kW - 20 MW].

Les méthodes d'échantillonnage et de mesure ont une grande importance dans la quantification des émissions de particules. Les particules émises par la combustion du bois peuvent notamment comporter une proportion importante de composés dits « condensables ». Ces derniers deviennent solides après condensation et contribuent aussi à la pollution.

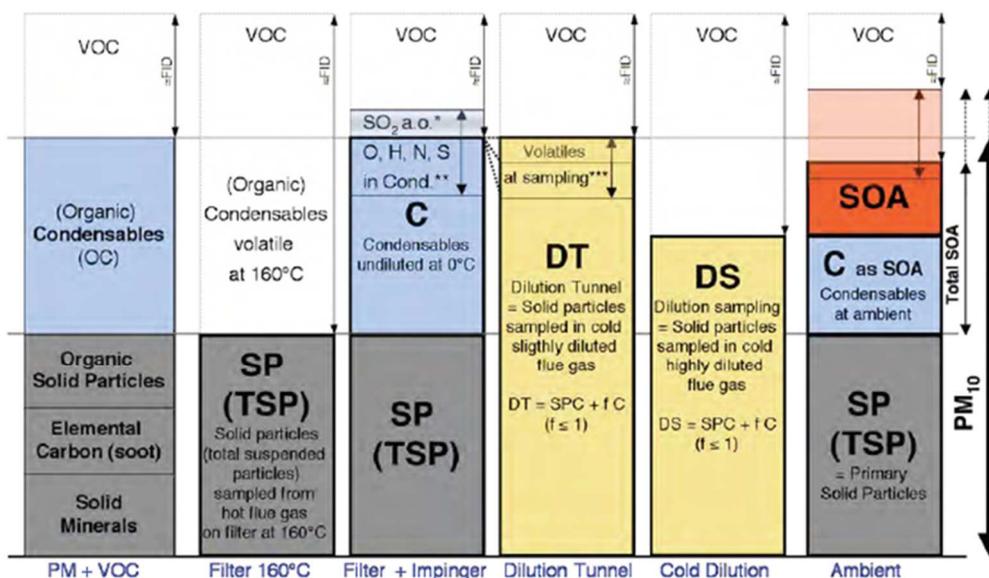
Les méthodes reposant uniquement sur un échantillonnage des aérosols à l'aide d'un filtre chauffé ne prennent en compte que la fraction solide. D'autres méthodes, comme celles reposant sur l'utilisation d'un tunnel à dilution, prennent en compte une importante partie de la fraction condensable. La proportion des condensables prise en compte dépend de la méthode utilisée et notamment du ratio de dilution [42]. Dans le cadre de la combustion du bois pour le chauffage résidentiel, le rapport particules totales sur particules solides a été estimé autour de [2,5 - 10] selon les méthodes d'échantillonnage et de mesure utilisées [42] [15]. Des ratios plus bas (1,1) ont été relevés pour les cas avec de très bonnes conditions de combustion.

Il a par ailleurs été mis en évidence par l'étude de Sippula et al. (2008) [43] qu'une augmentation de la teneur en chlore (Cl) dans la composition des combustibles peut augmenter les émissions de particules, en favorisant les réactions entre les composés alcalins et HCl dans la phase gazeuse, plutôt qu'avec les silicates qui maintiennent ces composés dans les cendres résiduelles.

La Figure 17 présente quatre méthodes d'échantillonnage qui mesurent ou non les fractions condensables des aérosols, ainsi que leur répartition au sein des fumées et dans l'air ambiant. Les acronymes ou termes suivants sont utilisés :

Stack : espèces présentes dans le conduit de fumées

- DR (dilution ratio) : ratio de dilution
- SP : prélèvement de la fraction solide sur filtre chauffé seul
- SPC : prélèvement de la fraction solide et des condensables sur filtre chauffé associé à un module de barbotage (méthode B)
- DT : prélèvement dans un tunnel à dilution, ratio de l'ordre de 10
- DS : prélèvement après dilution en tête de ligne, ratio supérieur ou égal à 100
- Ambient : concentration mesurée dans l'air ambiant
- VOC (Volatile Organic Compound) : composés organiques volatils
- FID (Flame Ionization Detector) : détecteur à ionisation de flamme
- SOA (Secondary Organic aerosols) : aérosols organiques secondaires



SP: Filter (Method a) resulting in solid particles SP (total suspended particles TSP).
SPC: Filter + Impinger (Method b) resulting in solid particles and condensables SPC.
DT: Dilution Tunnel (Method c) with typical dilution ratio (DR) in the order of 10 resulting in a PM measurement including SPC and most or all C. DT is identical or slightly smaller than SPC + C due to potentially incomplete condensation, depending on dilution ratio and sampling temperature (since dilution reduces not only the temperature but also the partial pressure of contaminants).
DS: Dilution Sampling with high dilution ratio (DR > 100).
PM₁₀: Total Particulate Matter < 10 microns In the ambient Including SP and SOA
SOA: Secondary organic aerosols, consisting of condensables C at ambient and SOA formed by secondary reactions such as photochemical oxidation.

*SO₂ and other soluble gaseous compounds in the flue gas may be dissolved in the impingers.
 **In case of determination of TOC in impingers, the mass of O, H, N, S and other elements contained in the organic condensables needs to be accounted for separately.
 ***Organic compounds that are liquid or solid at partial pressure in the flue gas and ambient temperature but volatile at sampling due to reduced partial pressure by dilution and temperature above ambient.

Figure 17: Comparaison des différentes méthodes d'échantillonnages des TSP avec l'air ambiant [42]

Cette figure apporte des éléments de comparaison entre les méthodes de prélèvement mises en œuvre pour la caractérisation des émissions d'aérosols issues d'appareils de chauffage domestique au bois [44] :

- sur filtre chauffé seul à 160 °C ou 120 °C (SP) ;
- sur filtre chauffé associé à un module de barbotage (SPC) ;
- par tunnel à dilution (DT) ;
- par dilution en tête de ligne (DS).

Elle montre que la méthode sur filtre chauffé seul (SP) sous-estime la concentration émise et donc l'impact sur la santé puisqu'elle permet uniquement le prélèvement de la fraction solide. Ainsi, elle ne prend pas en compte la fraction condensable qui contribue de manière importante aux concentrations en particules fines mesurées dans l'air ambiant.

Cette contribution de la fraction condensable à l'aérosol total émis est d'autant plus importante que la combustion est mal maîtrisée.

Elle indique d'autre part, que les concentrations mesurées par la mise en œuvre des méthodes de filtre chauffé associé à un module de barbotage (SPC) d'une part et de tunnel à dilution (DT) d'autre part sont relativement similaires.

Ce constat illustre l'intérêt du complément d'information apporté par un mesurage des COV totaux par détection à ionisation de flamme (FID) au résultat.

Ce schéma illustre enfin le fait qu'une partie de la pollution par les particules ambiantes liées à la combustion de la biomasse est à l'origine émise sous la forme de composés organiques semi-volatils et volatils qui sont transformés en aérosols (ou particules) organiques primaires (AOP) et secondaires (AOS) dans l'atmosphère.

1.9.1. Total Suspended Particulate (TSP)

De nombreuses études couvrent les poussières totales et leurs résultats sont rassemblés dans le Tableau 10 ci-dessous ci-après.

Les facteurs d'émission, couvrant seulement la fraction solide ou incluant la fraction condensable selon les cas, varient sur plusieurs ordres de grandeur, entre **0,02 g/GJ** et **1 520 g/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,02 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de bois non traité à un taux d'humidité élevé dans une chaudière de 15 MW équipée d'un système de traitement de fumée multiple (électrofiltre, Alkaline DSI⁸ et filtre à manche) et 11 % d'O₂ [4]. Cette valeur particulièrement basse est par ailleurs sujette à caution car elle est déterminée dans l'étude à partir d'ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) inadapté pour calculer des concentrations massiques.
- Le plus important (**1 520 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de sous-produits agricoles (paille de colza et kaolin), à faible taux d'humidité, dans une chaudière de 3,5 MW, **sans système de traitement de fumée**, à un taux de charge de 75 % et à 6 % d'O₂ [31].

Ces deux valeurs sont assez atypiques et on observe que les valeurs plus classiques d'émissions de TSP varient davantage sur l'intervalle [**1 - 400**] g/GJ avec un facteur d'émission moyen résultant de l'ensemble des études de **110 g/GJ** et un facteur d'émission médian de **40 g/GJ**.

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les TSP pour des installations de combustion de puissance inférieures à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 100 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 16,8 g/GJ pour celles qui en font partie.

⁸ Dry Sorbent Injection

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission TSP (g/GJ) ⁹	Commentaire	Référence
Granulé de bois	7,7 %	Cyclone	1,75 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %	SP (prélèvement isocinétique sur filtre chauffé et pesée)		[7,5 - 9,9] % O ₂	[35 - 49]		[1]
Granulé de bois – basse densité				50 %			[4,7 - 9,2] % O ₂	[32 - 43]		
				100 %			[3,7 - 9,5] % O ₂	[22 - 35]		
Briquettes de bois	8,8 %		2,50 MW (fixed grates with moving scrapes)	20 %			9,3 % O ₂	38		
				50 %			9,6 % O ₂	30		
				100 %			7,4 % O ₂	21		
Briquette de bois – basse densité			[3,9 - 7,5] % O ₂	[26 - 72]						
			6,3 % O ₂	36						
Plaquettes forestières	[35 - 40] %	Aucun	14 MW (moving grate pre-furnace)	100 %		6 % O ₂	309	107		[45]
		Multicyclone					90	31		
		Multicyclone + condenseur de fumée					68	24		
		Aucun	20 MW (bubbling fluidized-bed furnace)				297	103		
		ESP					42	15		
		ESP + condenseur de fumée					32,4	11		
		Aucun	22 MW (rotating water-cooled grates)				293	102		
		Multicyclone					184	64		
		Multicyclone + ESP					62	22		
		Multicyclone + ESP + condenseur de fumée					36	13		

⁹ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission TSP (g/G) ⁹	Commentaire	Référence
Déchets forestiers	45 %	Multicyclone	1 MW (with moving grates)	Moyen	SP (prélèvement isocinétique sur filtre chauffé et pesée)	153	13 % CO ₂ 0°C 101,3 kPa			[28]
Sciure	10 %		1,5 MW (with moving grates)	Bas (20 %)				101	[22] et [28]	
Copeaux, chutes et sciure de bois	7,7 %					SP (thimble in-stack)		48	[22]	
Granulés de bois	7,3 %							59		
Bois non-traité	Elevée	ESP + alkaline dry sorbent injection + filtre à manches	15 MW (water cooled vibrating grate-firing bed)		Hot sampling / spectrometer ELPI	0,03	T = 273K P = 1 atm 11 % O ₂	0,02		[4]
					Dilution faible (DR = 10-20) / spectromètre ELPI	0,03		0,02		
					Dilution moyenne (DR = 20-40) / spectromètre ELPI	0,03		0,02		
Paille de blé	Basse		3,5 MW (grate boiler)	75 %	Méthode gravimétrique	955	6 % O ₂	333	Mesures lues sur graphique	[31]
Paille de blé + kaolin						1 940		677		
Paille de colza						4 000		1 396		
Paille de colza + kaolin						4 355		1 520		
Plaquettes forestières	20 %	Multicyclone	250 kW understoker furnace	81 %	Andersen cascade impactor (8 stages) and filter - undiluted	162	11 % O ₂	85	R = 0 %	[37]
				70 %		171		90		
				64 %		70		37		
				78 %		57		30	R = 31 %	
				79 %		49		26	R = 30 %	
				76 %		45		24	R = 27 %	
				79 %		28		15	R = 38 %	
				55 %		112		59	R = 0 %	
Plaquettes forestières		Multicyclone		100 %		78		R = recirculation		

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission TSP (g/G) ⁹	Commentaire	Référence	
Mélange de plaquettes forestières et d'écorces		Aucun	450 kW moving grate furnace			72		38	rate (mass of recirculated flue gas / total mass of combustion air)		
Déchets de bois urbain		Multicyclone				206		110			
Granulés de foin						519		273			
Plaquettes forestières ('bole')	41 %	Multicyclone	Inclined grate stocker 2050 kW	[35 - 43] %	Filtrable = US EPA Test Référence Méthode 5 Condensable = US EPA Autre Test Méthode 28			93,7	Filtrable	[8]	
	42 %							99,7	Condensable		
								43 %	155,1		Filtrable
Plaquettes forestières ('mill end')	45 %							159,4	Condensable		
								108,3	Filtrable		
	43 %							114,3	Condensable		
								82,5	Filtrable		
	44 %							97,1	Condensable		
								151,6	Filtrable		
Plaquettes forestières (Saule - 3 ans)	<25 %		120 kW heat output multifuel biomass boiler	100 %	4-stage cascade impactor connected to an in-flue sampler tube fitted with a 7 mm diameter nozzle - undiluted		10,21 % O ₂	112,3		[11]	
								10,44 % O ₂			113
								9,4 % O ₂			84,1
								11,7 % O ₂			34,3
Plaquettes forestières (Epicéa - 40 ans)											
Biomasse (hêtre, bouleau, chêne, épicea)	[12 - 20] %	Cyclone	[0,5 - 10] MW understocker boiler		ELPI, BLPI		[11 - 13] % O ₂ conditions standards	150	Autriche (avec phase de démarrage)	[42]	
		ESP						15			
		Filtre à manches						1,5			

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission TSP (g/GJ) ⁹	Commentaire	Référence						
		Cyclone	[0,5 - 10] MW grate boiler					150	Suisse (avec phase de démarrage)							
		ESP						11								
		Filtre à manches						2,8								
		Cyclone						Autriche (avec phase de démarrage)	150							
		ESP							15							
		Filtre à manches							1,5							
		Cyclone						Suède (avec phase de démarrage)	40							
		ESP							5							
		Filtre à manches						20								
		Cyclone						Suisse (avec phase de démarrage)	150							
		ESP							10,2							
		Filtre à manches							2,8							
Sciure et écorce de bois	24 %	Multicyclone	Rotating grate 5 MW	[76 - 82] %	BLPI, diluted		5,2 % O ₂	232	Condensables inclus	[12]						
	17 %	Multicyclone + WS		[74 - 80] %				35								
		Multicyclone	Rotating grate 10 MW	[69 - 82] %				4,6 % O ₂			483					
		Multicyclone + ESP						4,6 % O ₂			35					
Plaquettes forestières	24 %	Multicyclone + ESP	Rotating grate 15 MW	[108 - 109] %				5 % O ₂			13					
		Cyclone	Gasification combustion 7 MW	[61 - 67] %				4 % O ₂			46					
Sciure et écorce de bois	17 %	Multicyclone	Rotating grate 5 MW	[76 - 82] %				Prélèvement isocinétique sur filtre chauffé EN 13284-1				5,2 % O ₂	183			
		Multicyclone + WS		[74 - 80] %									54			
Plaquettes forestières	24 %	Multicyclone	Rotating grate 15 MW	[83 - 87] %									5 % O ₂			211
		Multicyclone + ESP		[108 - 109] %												16

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission TSP (g/GJ) ⁹	Commentaire	Référence	
		Cyclone	Gasification combustion 7 MW	[61 - 67] %			4 % O ₂	52			
Granulés de bois (tronc)	8,3 %	Cyclone	500 kW reproccating grates boiler	63 %	SP (prélèvement isocinétique sur filtre quartz et pesée)		7,5 % O ₂	22 ± 2		[26]	
	7,7 %			72 %			7,6 % O ₂	28 ± 1			
Granulés de bois (écorce)	10,0 %			64 %			8,1 % O ₂	36 ± 2			
Granulés de bois	9,2 %			82 %			7,7 % O ₂	20			
Mélange de granulés de bois (tronc et écorce)	8,3 %			66 %			7,4 % O ₂	31 ± 8			
Mélange de granulés de bois (20%) et saule (80%)	44,5 %	Cyclone	[3 - 12] MW circulating fluidized bed boiler		11-stage multijet Berner-type low pressure impacter (BLPI) - undiluted	[582 - 685] [375 - 438]	[3,5 - 3,9] % O ₂	[194 - 233]	Mesure à 650 °C	[21]	
								[125 - 149]	Mesure à 160 °C		
Bois naturel, panneaux de particules, palettes, etc.	[5 - 55] %		[0,3 - 8] MW			190	Conditions standards	100	min : 5 g/GJ max : 493 g/GJ (42 mesures)	[14]	
Plaquettes d'épicéa	53,3 %		440 kW moving grate boiler		Filter holder containing quartz wool		13 % O ₂	49,6	Les concentrations sont lues sur la Figure 1	[19]	
	11,9 %							52,9			
Ecorce	49,2 %							[375 - 625]			[280 - 467]
	58,2 %							[380 - 490]			[301 - 389]
Plaquettes de hêtre	37,1 %							≈ 250			165
	9,7 %							≈ 110			72
Panneaux de fibre traités	6,2 %							≈ 100			66
Panneaux de fibre non traités	7,5 %							[350 - 550]			[232 - 365]
Déchets de bois	33,9 %							[225 - 400]			[158 - 280]

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission TSP (g/GJ) ⁹	Commentaire	Référence
Plaquettes forestières	38,7 %	Filtre à manches	8 MW	63 %	Prélèvement isocinétique sur filtre plan chauffé puis détermination gravimétrique des poussières sur filtre et solution de rinçage de sonde	0,7	6 % O ₂	0,4		[15]
Produits bois (fin de vie)	32,7 %	Électrofiltre	1,8 MW	107 %		2,2		0,8		
	35,3 %	Électrofiltre	2,5 MW	64 %		35,4		10,3		
Plaquettes forestières	22,8 %	Filtre à manches	6 MW	82 %		4,3		1,6		
Déchets de bois	38,3 %	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %		5,3		2,1		
Plaquettes forestières	43,1 %	Filtre à manches	2,5 MW	76 %		1,4		0,5		
	41,4 %	Filtre à manches	10 MW	101 %		1,1		0,4		
	17,8 %	Multi-cyclone	300 kW	68 %		468,0		163		
		Électrofiltre				10,3		4,7		
39,9 %	Filtre à manches	21 MW	110 %	1,7		0,6				
Plaquette forestières	30 %		200 kW wood burner with mechanical feed		140 ± 18	13 % O ₂	94 ± 13		[20]	
Résidus de scierie	10 %		200 kW wood burner (gasifier) with mechanical feed		96 ± 11		64 ± 7			
Plaquette forestières	54 %		325 kW moving grate		67 ± 8		48 ± 6			
	65 %		800 kW moving grate							

Tableau 10 : Facteurs d'émission des TSP obtenus avec différentes méthodes de mesures, pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission des poussières totales du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

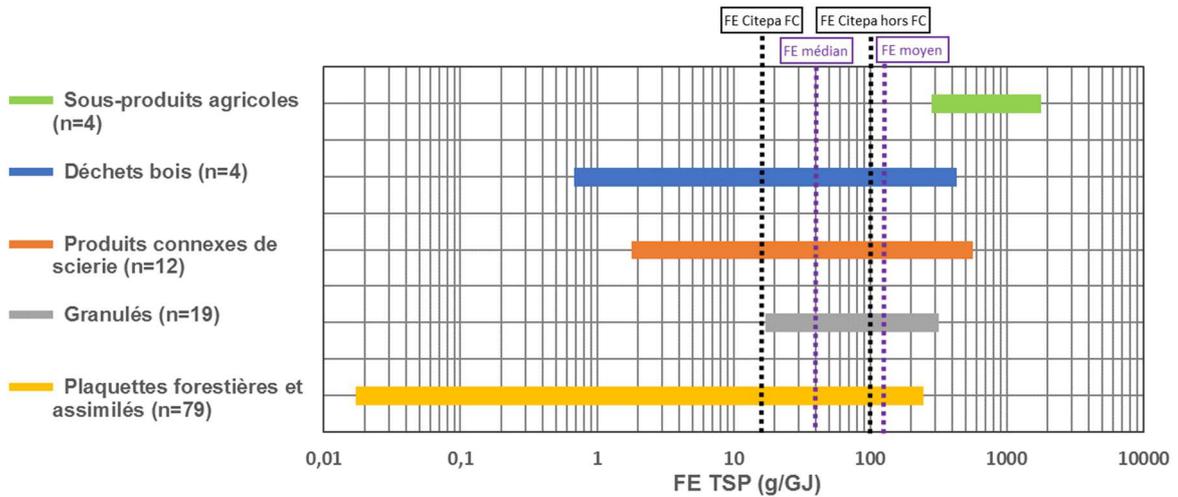


Figure 18 : Gammes des facteurs d'émission de TSP par catégorie de combustible

On observe de grandes disparités dans les gammes de facteurs d'émission, qu'elles soient présentées par catégorie de combustibles (Figure 18) ou par gamme de puissance (Figure 19). Cela est dû à la grande diversité des cas étudiés dans la littérature. Les catégories « Déchets bois » et « Sous-produits agricoles » sont néanmoins peu présentes dans la littérature et cette dernière catégorie reste particulièrement élevée notamment parce l'étude dont sont issus les facteurs d'émission ne fait pas mention de système de traitement de fumée [31].

Les facteurs d'émission observés pour les combustibles de type « Plaquettes forestières et assimilés » se situent entre 0,02 et 211 g/GJ avec une moyenne de **58,5 g/GJ** et une médiane de **40 g/GJ**, tandis que ceux observés pour les combustibles « Granulés » varient entre 20 et 273 g/GJ avec **71,4 g/GJ** de moyenne et **35 g/GJ** comme valeur médiane.

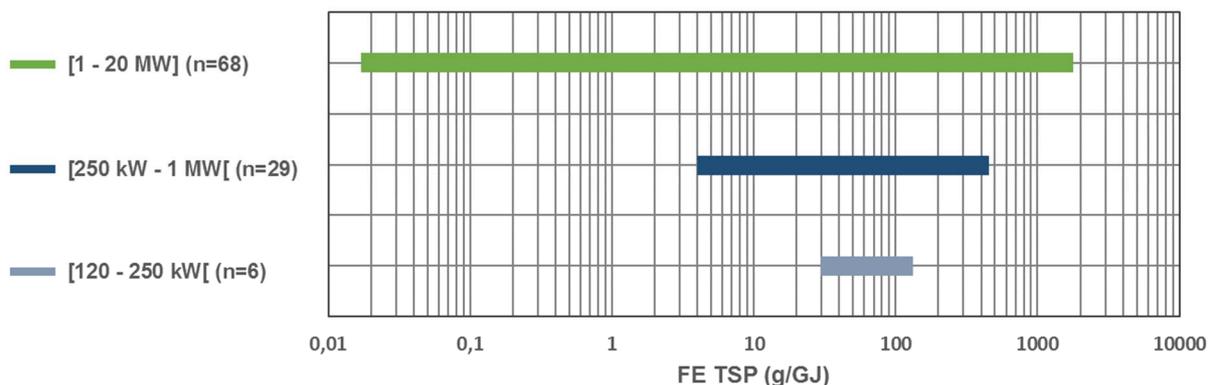


Figure 19 : Gammes des facteurs d'émission de TSP par gamme de puissance d'appareil

Les facteurs d'émission observés pour les appareils de puissance nominale comprise entre 1 et 20 MW se situent entre 0,02 et 1 520 g/GJ, avec une moyenne de **122 g/GJ** et une médiane de **41,5 g/GJ**, tandis que ceux observés pour les appareils de puissance nominale comprise entre 250 kW et 1 MW exclu varient entre 4,7 et 389 g/GJ, avec **123 g/GJ** de moyenne et **58,6 g/GJ** comme valeur médiane. On observe donc que malgré des gammes de facteurs d'émission assez différentes, selon la puissance nominale des appareils, les moyennes et médianes déduites de la littérature étudiée sont proches. Les chaudières biomasse de puissance intermédiaire inférieure à 1 MW, rencontrées dans le cadre de cette étude, sont moins souvent équipées de système de traitement de fumée et lorsque c'est le cas, ce sont généralement

des cyclones ou multicyclones, qui sont moins efficaces que des filtres à manches ou des électrofiltres (ESP).

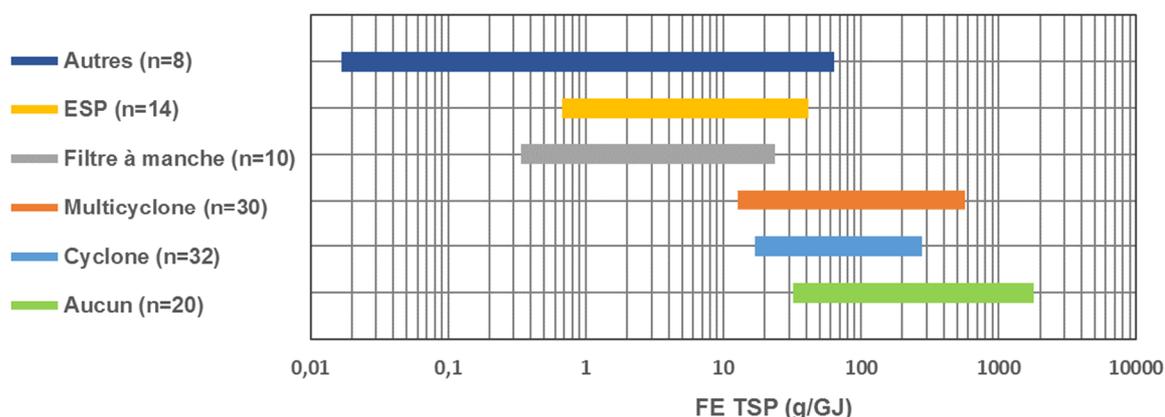


Figure 20 : Gamme des facteurs d'émission de TSP par système de traitement de fumée

La Figure 20 présente la dépendance directe entre le niveau des émissions de particules et le système de traitement de fumée en place. Lorsque l'installation de combustion n'est pas équipée de système de traitement de fumée, les émissions de TSP observées sont systématiquement supérieures à 30 g/GJ. Cette borne inférieure est abaissée à 20 g/GJ dans le cas des cyclones et 15 g/GJ pour les multicyclones.

Il existe toujours, en amont des électrofiltres ou des filtres à manches, des cyclones ou multicyclones qui assurent le bon fonctionnement de ces systèmes de traitement de fumée.

À l'inverse, avec des chaudières équipées de filtres à manche ou d'électrofiltres (ESP), les émissions observées ne dépassent respectivement pas 20 et 35 g/GJ. La catégorie « Autres » contient des épurateurs par voie humide (« wet scrubber » en anglais), des laveurs condenseurs, des systèmes d'injection de réactif ou des associations de différents systèmes de traitement de fumée.

Dans la littérature, cette hiérarchisation de l'efficacité de différents systèmes de traitement de fumée existants pour les poussières totales est également observée [45] [46]. La Figure 21 ci-dessous illustre les différences d'efficacité entre les systèmes de traitement de fumée, qui dépendent également de la granulométrie des particules filtrées.

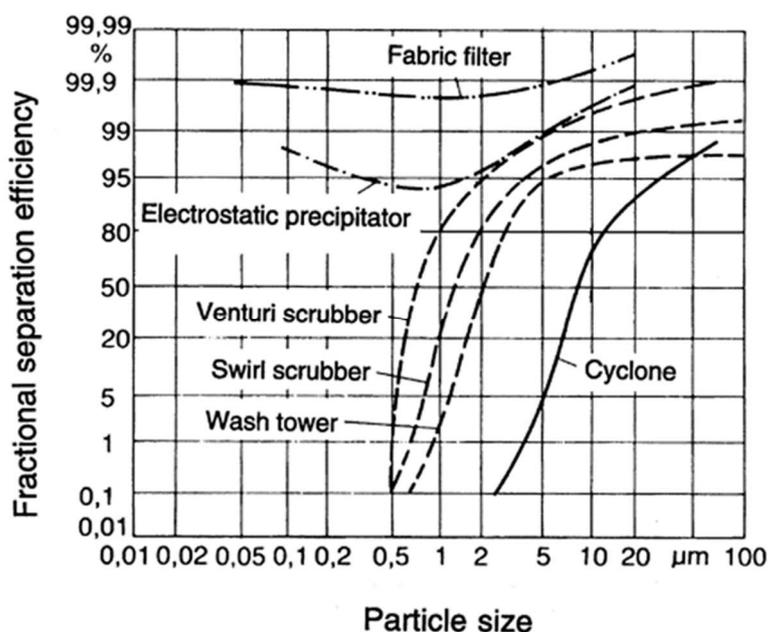


Figure 21 : Efficacité des systèmes de traitement de fumée conventionnels [46]

Au-delà de cette efficacité théorique, le vieillissement et l'entretien de ces systèmes peuvent également conditionner leur efficacité réelle et cela n'apparaît pas dans les résultats présentés dans cette recherche bibliographique.

Distinction particules solides et condensables

La plupart des études identifiées dans la littérature ne mettent pas en place de système de dilution ou de condensation dans un solvant des fumées permettant de déterminer également la phase condensable des aérosols émis par la combustion du bois. Certaines études ne donnent pas assez de précisions sur le système d'échantillonnage et de mesure mis en place pour permettre d'avoir la certitude que la part condensable est bien prise en compte [14] [42] [45].

L'étude de Sippula et al. (2009) [12] présente pour plusieurs cas des émissions de TSP qui ont été déterminées de deux façons différentes : prélèvement sur filtre direct et analyse par BLPI (Bernier Low Pressure Impactor) après dilution. Dans trois configurations expérimentales, des valeurs d'émissions de TSP moins élevées sont observées avec la méthode d'échantillonnage et de mesure, censée comptabiliser les fractions solides et condensables, qu'avec la méthode SP (fraction solide seulement).

Ces deux valeurs sont difficilement comparables car les « TSP » déterminés par BLPI l'ont été en ajoutant la partie filtrée par un pré cyclone (10 µm) pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil de mesure. Cela contribue à augmenter les incertitudes sur la valeur obtenue.

De plus, les mesures n'ont pas pu être réalisées de façon simultanée pour des raisons pratiques, et d'importantes variations dans la qualité de la combustion au cours du temps ont pu être constatées dans cette étude. Cela peut expliquer pourquoi les mesures de TSP réalisées avec dilution (DS) ont pu être inférieures à celles réalisées sur filtre chauffant (SP). Cette étude ne permet donc pas de tirer de conclusions particulières quant à la distinction des fractions solides et condensables des poussières totales émises par la combustion du bois.

Une étude plus récente de Rector et al. (2017) [8], dans le cadre de la combustion de plaquettes forestières (environ 40 % d'humidité) dans une chaudière de 2,05 MW équipée uniquement d'un multicyclone, présente des résultats en distinguant la part solide de la part condensable. Ces résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Combustible	Facteur de charge	Facteur d'émission total (g/G)	Partie condensable
Plaquettes forestières (tronc)	[35 - 43] %	99,7	6,0 %
	[51 - 70] %	159,4	2,7 %
	[35 - 48] %	114,3	5,2 %
Plaquettes forestières (chutes de scierie)	[54 - 70] %	97,1	15,0 %
	[62 - 70] %	155,9	2,8 %
	[53 - 69] %	84,2	10,2 %

Tableau 11 : Parties condensables identifiées dans l'étude de Rector et al. (2017) [8]

On observe donc que, dans le cas de figure étudié, la partie condensable de l'aérosol représente entre 2 et 15 % des émissions totales de TSP. Cela est bien inférieur aux estimations (entre 70 et 90%) déterminées pour des cas de combustions de biomasse en foyers domestiques, comme souligné en début de paragraphe [42] [15].

L'étude de Yu et al (2013) [4] analyse des résultats d'émissions de TSP utilisant différentes méthodes d'échantillonnage et de mesure (échantillonnage à chaud, faible et moyenne dilution), mais ceux-ci ne présentent aucune différence (0,03 mg/Nm³ indépendamment de la méthode utilisée). Il convient de préciser que cette étude détermine ces concentrations massiques à partir de mesures par ELPI et réunit les résultats les plus bas en termes d'émissions de TSP de l'ensemble de la littérature identifiée dans le tableau et ne paraissent donc pas représentatifs.

1.9.2. PM₁₀

Les études qui couvrent spécifiquement les PM₁₀ (particules de diamètre inférieur ou égal à 10 µm) sont moins nombreuses dans la littérature. Leurs résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Les facteurs d'émission varient sur plusieurs ordres de grandeur, entre **0,4 g/GJ** et **108 g/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission observé (**0,4 g/GJ**) est obtenu dans différentes études utilisant la méthode DS [5] et la méthode SP [15].
- Le plus important facteur d'émission (**108 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de résidus forestiers (pin et épicéa), à 40 % d'humidité, dans une chaudière de 1 MW, seulement équipée d'un multicyclone, à un taux de charge de 80 % et à 9 % d'O₂ (méthode DS/DT) [30].

Par ailleurs, le facteur d'émission moyen (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) résultant de l'ensemble des études identifiées est de **35 g/GJ** et le facteur d'émission médian de **19 g/GJ**.

La méthodologie des facteurs d'émission du Citepa repose sur des hypothèses de granulométrie. Le Citepa considère que, dans le cadre de la combustion du bois, les émissions de PM₁₀ représentent environ 80 % des émissions de TSP pour le chauffage urbain, 95 % pour les secteurs tertiaire et agricole et 78 % pour l'industrie manufacturière, selon les hypothèses de traitement de fumée considérées.

La méthodologie des facteurs d'émission du Citepa repose sur des hypothèses de granulométrie. Le Citepa considère que, dans le cadre de la combustion du bois, les émissions de PM₁₀ représentent environ 80 % des émissions de TSP pour le chauffage urbain, 95 % pour les secteurs tertiaire et agricole et 78 % pour l'industrie manufacturière, selon les hypothèses de traitement de fumée considérées.

À titre de comparaison, les facteurs d'émission ainsi déterminés par le Citepa pour les PM₁₀ pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse sont de :

- 79,8 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 13,4 g/GJ pour celles qui en font partie, pour le secteur du chauffage urbain ;
- 95 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 16,0 g/GJ pour celles qui en font partie, pour les secteurs tertiaire et agricole ;
- 77,8 g/GJ pour le secteur de l'industrie manufacturière où la distinction liée au dispositif du Fonds Chaleur n'a pas encore été introduite dans l'inventaire national.

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission PM ₁₀ (g/GJ) ¹⁰	Commentaire	Référence
Plaquettes forestières (Saule - 3 ans)	< 25 %		120 kW heat output multifuel biomass boiler	120 kW	4-stage cascade impactor connected to an in-flue sampler tube fitted with a 7 mm diameter nozzle		10,21 % O ₂	104,2		[11]
10,44 % O ₂							105			
Plaquettes forestières (Epicéa - 40 ans)	9,4 % O ₂	77,8								
	11,7 % O ₂	30,3								
Miscanthus dopé à l'hydroxyde de calcium (2% massique)		Multicyclone	400 kW	100 %	DR (1 : 10) et FMPS model 3091 (mesure les particules volatiles) et APS model 3321 de TSI Inc / OPC model 1.109 de Grimm Aerosol Technik GmbH & Co.KG et spectromètre de masse à temps de vol à haute résolution (HR-ToF-AMS de Aerodyne Inc)		T = 25°C P = 1 013 hPa	20 ± 6	Stable 1 (slightly disturbed)	[5]
									96 ± 29	
						26 ± 8	Start			
						19 ± 6	Stable 2			
Plaquettes forestières		ESP	1,5 MW (moving grate boiler)	27 % 120 %			0,4 ± 0,1			
							1,9 ± 0,6			
Résidus forestiers (pin et épicéa)	40 %	Multicyclone	1 MW moving grate boiler	45 %	Echantillonnage isocinétique et DR (1:10) puis 13-stage low pressure multi-jet cascade impactor (DLPI, Dekati Ltd.)	122	9 % O ₂ , 13 % CO ₂ , dry gas, 0°C et 101,3 kPa	60	[30]	
				80 %		218		108		
				60 %		150		74		
		Cyclone et ESP	6 MW	85 %	Echantillonnage isocinétique et DR (1:20) puis 13-stage low pressure multi-jet cascade impactor (DLPI, Dekati Ltd.)	157	[5,5 - 6,2] % O ₂ , 13 % CO ₂ , dry gas, 0°C et 101,3 kPa	63		
Plaquettes forestières	38,7 %	Filtre à manches	8 MW	63 %	Prélèvement isocinétique sur filtre plan chauffé puis détermination gravimétrique des poussières sur filtre et solution de rinçage de sonde	0,7	6 % O ₂	0,4	[15]	
Produits bois (fin de vie)	32,7 %	Électrofiltre	1,8 MW	107 %		2,2		0,8		
	35,3 %	Électrofiltre	2,5 MW	64 %		32,7		9,5		
Plaquettes forestières	22,8 %	Filtre à manches	6 MW	82 %		4,3		1,6		
Déchets de bois	38,3 %	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %		5,3		2,1		
Plaquettes forestières	43,1 %	Filtre à manches	2,5 MW	76 %		1,4		0,5		
	41,4 %	Filtre à manches	10 MW	101 %		1,1		0,4		
	17,8 %	Électrofiltre	300 kW	68 %		9,4		4,3		

¹⁰ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

	39,9 %	Filtre à manches	21 MW	110 %		1,7		0,6		
--	--------	------------------	-------	-------	--	-----	--	------------	--	--

Tableau 12 : Facteurs d'émission des PM_{10} pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission des PM₁₀ du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

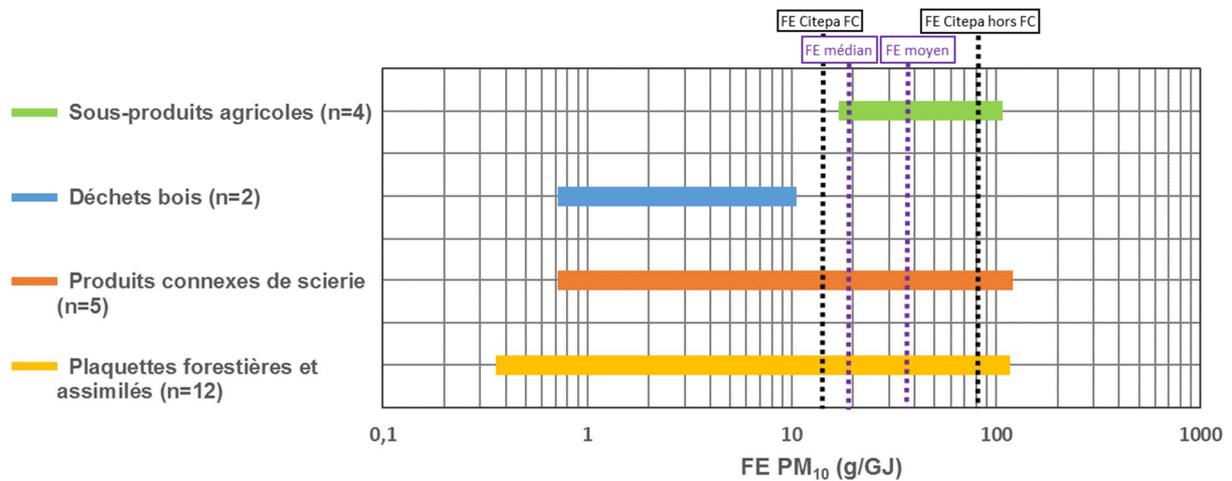


Figure 22 : Gammes des facteurs d'émission de PM10 par catégorie de combustible

On observe que cette catégorie spécifique de particules est beaucoup moins étudiée dans la littérature que les TSP. Par ailleurs, aucune mesure pour le combustible de type « Granulés » n'a été constatée. Le manque de données relatives aux combustibles biomasse de type « Sous-produits agricoles » et « Déchets bois » ne permet pas de tirer des observations significatives relatives à ces combustibles. En revanche, comme illustré par la Figure 23, l'étendue des facteurs d'émission des catégories de combustibles autres que « Plaquettes forestières et assimilés » sont presque toutes comprises dans cette dernière qui s'échelonne de 0,4 à 104,2 g/GJ.

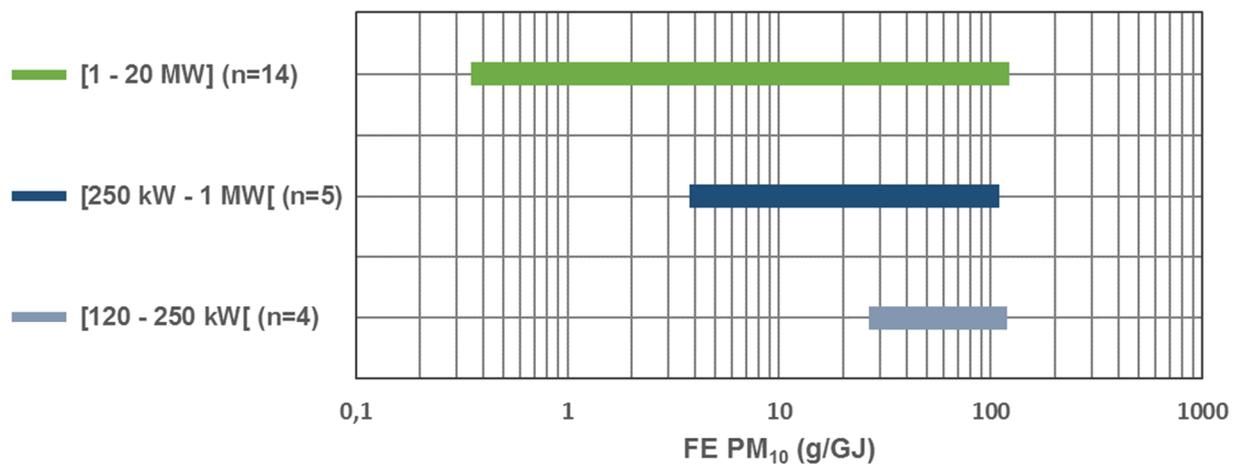


Figure 23 : Gammes des facteurs d'émission de PM10 par gamme de puissance d'appareil

On observe une tendance des chaudières de petites puissances à émettre davantage de PM₁₀ que celles de moyennes puissances qui se retrouve dans la répartition des facteurs d'émission par gamme de puissance mais le peu de données disponible ne permet d'affirmer que cette observation est significative. Cela pourrait aussi s'expliquer par les systèmes de traitement de fumée plus efficaces installés dans les chaudières de puissance plus importante.

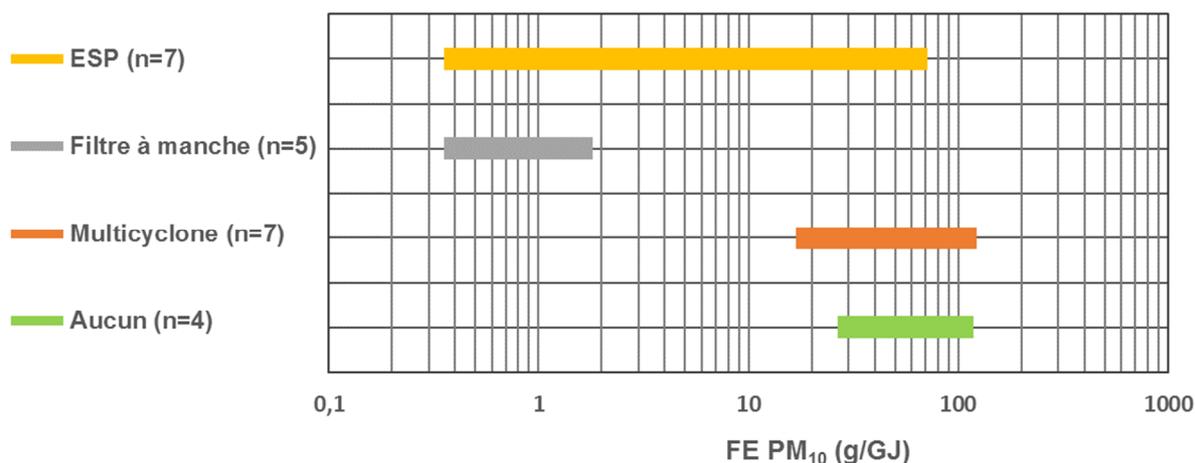


Figure 24 : Gammes des facteurs d'émission de PM10 par système de traitement de fumée

Bien que le manque de données limite leur pertinence, la même tendance que celle observée dans la Figure 20 pour les TSP peut être constatée pour les PM₁₀ (Figure 24) : les multicyclones seuls, notamment pour des particules de petit diamètre, sont moins efficaces que les électrofiltres (ESP) ou les filtres à manches.

Granulométrie des PM₁₀

Certaines des études présentées permettent d'identifier spécifiquement la part des PM₁₀ au sein des poussières totales (TSP) :

L'étude d'Olave et al. (2017) [11] mesure des proportions de PM₁₀ variant entre **88 et 93 %** des TSP (méthode SP).

Ces proportions se situent entre **91 et 100 %** dans les résultats du rapport de l'ADEME (« Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse - Campagne de mesure 2016 » ; 2018) [15] (méthode SP).

1.9.3. PM_{2,5}

Les particules fines de diamètre inférieur à 2,5 µm (micromètre), ont un impact sur la mortalité et la morbidité cardio-respiratoire. Diverses pathologies chroniques (cancers, pathologies cardiovasculaires et respiratoires) se développent après plusieurs années d'exposition aux particules, même à de faibles niveaux de concentration.

Deux études couvrant spécifiquement les émissions de PM_{2,5} (particules de diamètre inférieur ou égal à 2,5 µm) ont été identifiées dans la littérature. Leurs résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Les facteurs d'émission varient sur plusieurs ordres de grandeur, entre **0,4 g/GJ** et **41,1 g/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,4 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières, entre 38,7 et 43,1 % d'humidité, dans différents équipements de puissances échelonnées entre 2,5 et 21 MW, opérant à relativement haut taux de charge (entre 63 et 110 %), toutes équipées de filtre à manches [15].
- Le plus important (**41,1 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières, à 26 % d'humidité, dans une chaudière de 150 kW seulement équipée d'un cyclone, à un taux de charge de 60 % [3].

La moyenne et la médiane n'ont pas été calculées car elles sont peu significatives à cause du manque de mesures identifiées dans la littérature.

La méthodologie des facteurs d'émission du Citepa repose sur des hypothèses de granulométrie. Le Citepa considère que dans le cadre de la combustion du bois, les émissions de $PM_{2,5}$ représentent environ 66,5 % des émissions de TSP pour le chauffage urbain, 93 % pour les secteurs tertiaire et agricole et 61 % pour l'industrie manufacturière, selon les hypothèses de traitement de fumée considérées.

À titre de comparaison, les facteurs d'émission ainsi déterminés par le Citepa pour les $PM_{2,5}$ pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse sont de :

- 66,5 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 11,2 g/GJ pour celles qui en font partie, pour le secteur du chauffage urbain ;
- 93 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 15,6 g/GJ pour celles qui en font partie, pour les secteurs tertiaire et agricole ;
- 61 g/GJ pour le secteur de l'industrie manufacturière où la distinction liée au dispositif du Fonds Chaleur n'a pas encore été introduite dans l'inventaire national.

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission PM _{2,5} (g/GJ)	Commentaire	Référence	
Granulés de bois	4,6 %	2,5µm in-stack cyclone	150 kW	76 %	DR (1:20 à 1:40) avec FDMS (Filter Dynamics Measurements System)			26,0 ± 0,47		[3]	
Plaquettes forestières	26 %			60 %				41,1 ± 1,40			
Granulés de bois	5,1 %		500 kW	[75 - 124] %				26,3 ± 3,53			
Plaquettes forestières	38,7 %	Filtre à manches	8 MW	63 %	Prélèvement isocinétique sur filtre plan chauffé puis détermination gravimétrique des poussières sur filtre et solution de rinçage de sonde		6 % O ₂	0,4		[15]	
Produits bois (fin de vie)	32,7 %	Électrofiltre	1,8 MW	107 %				1,5			0,5
	35,3 %	Électrofiltre	2,5 MW	64 %				27,6			8
Plaquettes forestières	22,8 %	Filtre à manches	6 MW	82 %				2,7			1
Déchets de bois	38,3 %	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %				4,6			1,8
Plaquettes forestières	43,1 %	Filtre à manches	2,5 MW	76 %				1,0			0,4
	41,4 %	Filtre à manches	10 MW	101 %				1,0			0,4
	17,8 %	Électrofiltre	300 kW	68 %				7,8			3,6
	39,9 %	Filtre à manches	21 MW	110 %	1,1	0,4					

Tableau 13 : Facteurs d'émission des PM_{2,5} pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission des PM_{2,5} du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

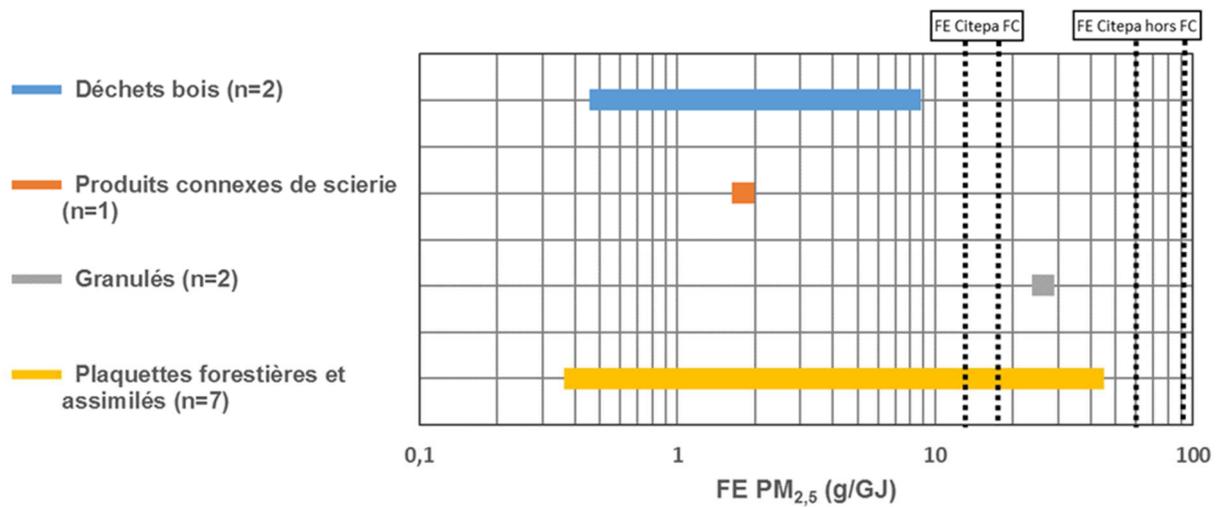


Figure 25 : Gammes des facteurs d'émission de PM_{2,5} par catégorie de combustible

On observe que cette catégorie spécifique de particules est très peu étudiée dans la littérature. Le manque de données relatives aux combustibles biomasse de type « Granulés », « Produits connexes de scierie » et « Déchets bois » ne permet pas d'analyser la dépendance des facteurs d'émission relatives à ces différentes catégories de combustible. En revanche, l'ensemble des gammes de facteurs d'émission des catégories de combustible autres que « Plaquettes forestières et assimilés » est intégralement compris dans l'étendue des facteurs d'émission de cette dernière qui s'échelonne de 0,4 à 41 g/GJ.

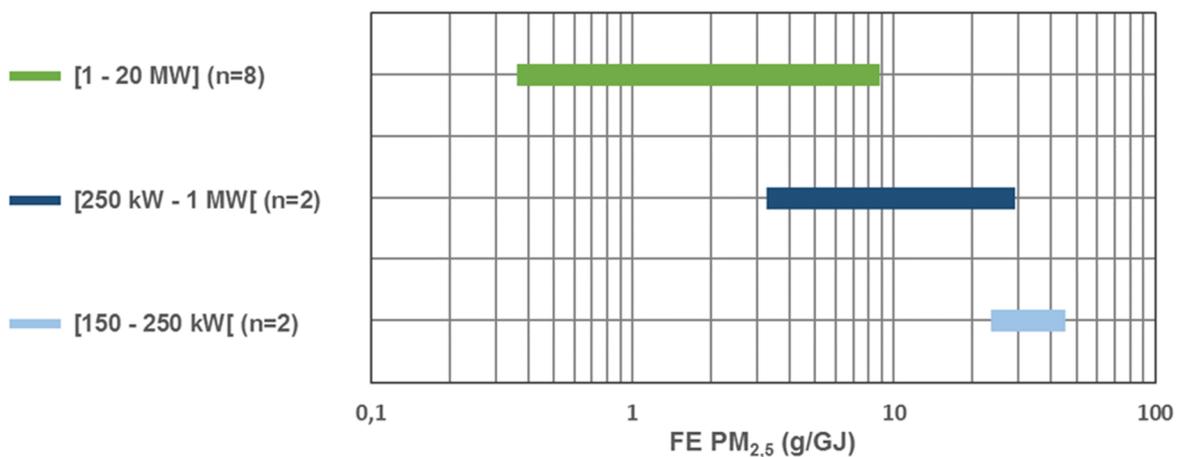


Figure 26 : Gammes des facteurs d'émission de PM_{2,5} par gamme de puissance d'appareil

Malgré le peu de données disponibles, de façon similaire aux PM₁₀, les variations de gammes de facteurs d'émission par gamme de puissance révèle que les chaudières de petite puissance ont tendance à émettre davantage de PM_{2,5} que les moyennes puissances (Figure 26). Cela peut aussi s'expliquer par les systèmes de traitement de fumée plus efficaces installés dans les chaufferies de puissance plus importante.

Granulométrie des PM_{2,5}

Seul le rapport de l'ADEME (« Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse - Campagne de mesure 2016 », 2018) [15] permet d'identifier spécifiquement la part des PM_{2,5} au sein des poussières totales TSP. Ces proportions se situent entre 63 et 91 % (méthode SP).

1.9.4. PM1

Les études qui couvrent spécifiquement les PM₁ (particules de diamètre inférieur ou égal à 1 µm) sont plus nombreuses que celles qui ont été identifiées dans la littérature portant sur les PM₁₀ ou les PM_{2,5}. Leurs résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Les facteurs d'émission varient sur plusieurs ordres de grandeur, entre **0,1 g/GJ** et **264 g/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,1 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières (40 % d'humidité environ) dans différentes chaufferies de puissances 8 et 10 MW, opérant à des facteurs de charge respectifs de 63 et 101 %, et toutes deux équipées de filtre à manches [15]. La méthode de mesure couvre uniquement les particules solides.
- Le plus important (**264 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières, à 23 % d'humidité dans une chaudière de 10 MW seulement équipée d'un cyclone [2]. La méthode de mesure inclut les particules condensables.

Par ailleurs, le facteur d'émission en PM₁ moyen résultant de l'ensemble des études identifiées est de **28 g/GJ** et le facteur d'émission médian de **17 g/GJ**.

Les méthodes d'échantillonnage et de mesure utilisées couvrent davantage la fraction condensable des particules que ce qui a été observé pour les poussières totales.

Les inventaires nationaux d'émissions de polluants atmosphériques ne couvrent pas les PM₁. Il n'y a donc pas de comparaison possible avec la granulométrie ou les facteurs d'émission provenant du Citepa.

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (mg/Nm ³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission PM ₁ (g/GJ) ¹¹	Commentaire	Référence
Déchets forestiers	45 %	Multicyclone	1 MW (with moving grates)	Moyen	DR (1:150) et DLPI (13-stage multi-jet Low Pressure cascade Impactor)	117	13 % CO ₂ , 0°C et 101,3 kPa			[28]
	Elevé			100						
Granulés de bois	7 %		1,5 MW (with moving grates)	Bas		44				
	Moyen			41						
Sciure	10 %		1,5 MW (with moving grates)	Bas		63				
				Moyen		49				
	Elevé	44								
Plaquettes forestières	23,1 %	Cyclone	10 MW (rotating grate)		PRD + ED (porous tube diluter and ejector diluter) and DGI (Dekati Gravimetric Impactor)		7,7 % O ₂	264 ± 40		[2]
		Cyclone et ESP						0,6 ± 0,1		
Miscanthus dopé à l'hydroxyde de calcium (2% massique)		Multicyclone	400 kW (rotation combustion boiler)	100 %	DR (1 : 10) et FMPS model 3091 et APS model 3321 de TSI Inc / OPC model 1.109 de Grimm Aerosol Technik GmbH & Co.KG et spectromètre de masse à temps de vol (haute résolution) (HR-ToF-AMS de Aerodyne Inc)		T = 25°C P = 1 013 hPa	19 ± 6	Stable 1 (slightly disturbed)	[5]
								33 ± 10	Burnout	
								18 ± 5	Start	
								18 ± 5	Stable 2	
Plaquettes forestières		ESP	1,5 MW (moving grate boiler)	27 %				0,4 ± 0,1		
				120 %				1,9 ± 0,6		
Sciure et écorce de bois	22 %	Multicyclone	Rotating grate 5 MW	[76 - 82] %	BLPI, diluted		5,2 % O ₂	55		[12]
	17 %	Multicyclone + WS		[74 - 80] %				31		

¹¹ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.



Plaquettes forestières	24 %	Multicyclone	Rotating grate 15 MW	[83 - 86] %			5 % O ₂	92			
		Multicyclone + ESP		[108 - 109] %				6			
Sciure et écorce de bois		Multicyclone	Rotating grate 10 MW	[69 - 82] %							
	Multicyclone + ESP	4									
Plaquettes forestières		Cyclone	Gasification combustion 7 MW	[61 - 67] %			4 % O ₂		13		
Granulés de bois (tronc)	8,3 %	Cyclone	500 kW reprocating grates boiler	63 %	Porous tube diluter (PRD) + Ejector Diluter (ED), PTFE filter et DLPI Dekati Ltd		7,5 % O ₂	17 ± 2			
	7,7 %			72 %				21 ± 1			
Granulés de bois (écorce)	10,0 %			64 %				26 ± 3			
Granulés de bois	9,2 %			82 %				12 ± 0,5			
Mélange de granulés de bois (tronc et écorce)	8,3 %			66 %				21 ± 3			
Mélange de granulés de bois (20%) et saule (80%)	44,5 %	Cyclone	[3 - 12] MW circulating fluidized bed boiler		11-stage multijet Berner-type low pressure impactor (BLPI), undiluted	[54 - 83]	[3,5 - 3,9] % O ₂	[16 - 25]	Mesure à 650 °C	[21]	
						[52 - 87]		[15 - 27]	Mesure à 160 °C		
Résidus forestiers (pin et épicéa)	40 %	Multicyclone	1 MW moving grate boiler	45 %	Echantillonnage isocinétique et DR (1:10) puis 13-stage low pressure multi-jet cascade impactor (DLPI, Dekati Ltd.)	117	9 % O ₂ , 13 % CO ₂ , dry gas, 0°C et 101,3 kPa	58			
				80 %				100			49
				60 %				145			72
		Cyclone et ESP	6 MW	85 %	Echantillonnage isocinétique et DR (1:20) puis 13-stage low pressure multi-jet cascade impactor (DLPI, Dekati Ltd.)	79	[5,5 - 6,2] % O ₂ , 13 % CO ₂ , dry gas, 0°C et 101,3 kPa	30			
Plaquettes forestières	38,7 %	Filtre à manches	8 MW	63 %	Prélèvement isocinétique sur filtre plan chauffé	0,2	6 % O ₂	0,1		[15]	
	32,7 %	Électrofiltre	1,8 MW	107 %		0,9		0,3			

Produits bois en fin de vie	35,3 %	Électrofiltre	2,5 MW	64 %	puis détermination gravimétrique des poussières sur filtre et solution de rinçage de sonde	18,6		6,9		
Plaquettes forestières	22,8 %	Filtre à manches	6 MW	82 %		2,1		0,7		
Déchets de bois	38,3 %	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %		3,8		1,5		
Plaquettes forestières	43,1 %	Filtre à manches	2,5 MW	76 %		0,6		0,2		
	41,4 %	Filtre à manches	10 MW	101 %		0,4		0,1		
	17,8 %	Électrofiltre	300 kW	68 %		3,9		1,4		
	39,9 %	Filtre à manches	21 MW	110 %		0,7		0,2		
Déchets forestiers humides	48,4 %	Aucun	6 MW (moving grate)	[75 - 83] %		DR = 1:20 DLPI (Dekati 13-stage multi-jet Low Pressure cascade Impactor)		76,3		
		Multicyclone + ESP			13,2					
		Multicyclone + ESP + Condenseur			6,3					
		Aucun			62,2					
		Multicyclone + ESP			8,3					
		Multicyclone + ESP + Condenseur			5,5					
					DR = 1:200 Spectromètre de masse à temps de vol (TSI, APS 3320) + spectromètre de mobilité électrique (TSI, SPMS 3934)				particules/Nm ³ puis converties en concentration massique en supposant des particules sphériques de densité 2 g/cm ³	

Tableau 14 : Facteurs d'émission des PM1 pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La figure ci-dessous présente les gammes de facteurs d'émission des PM₁ du tableau ci-dessus par grand type de combustible.

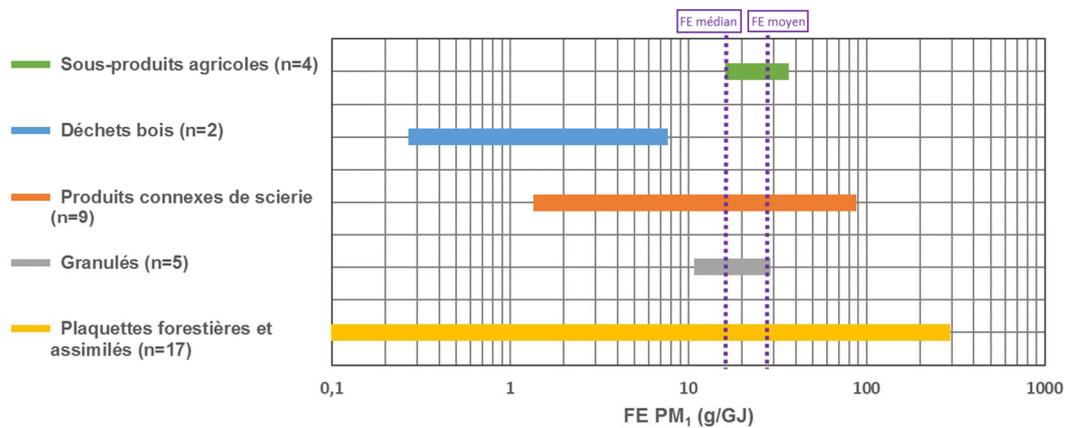


Figure 27 : Gammes des facteurs d'émission de PM₁ par catégorie de combustible

Comme pour l'ensemble des autres polluants, la catégorie de combustible « Plaquettes forestières et assimilés » est celle qui est la plus représentée dans la littérature identifiée comme pertinente. L'étendue des facteurs d'émission qui s'y rapporte couvre l'ensemble de résultats d'émissions de PM₁ listés dans le tableau ci-dessus.

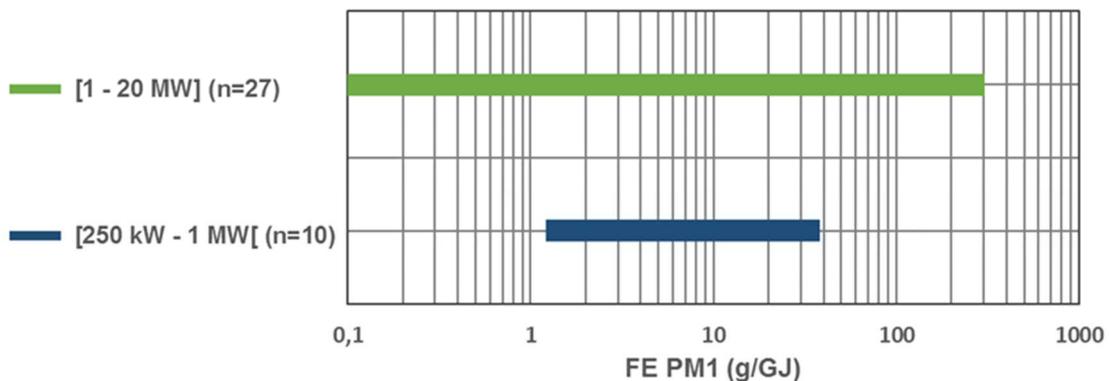


Figure 28 : Gammes des facteurs d'émission de PM₁ par gamme de puissance d'appareil

La gamme de facteurs d'émission pour les puissances comprises entre 250 kW et 1 MW exclu est bien moins étendue que celle observée pour la gamme supérieure [1 - 20] MW mais le nombre de points de mesure est également moins important (Figure 28). Les émissions de particules étant fortement dépendante d'un grand nombre de paramètres, l'augmentation du nombre de cas étudiés tend à étendre la gamme de facteurs d'émissions observés.

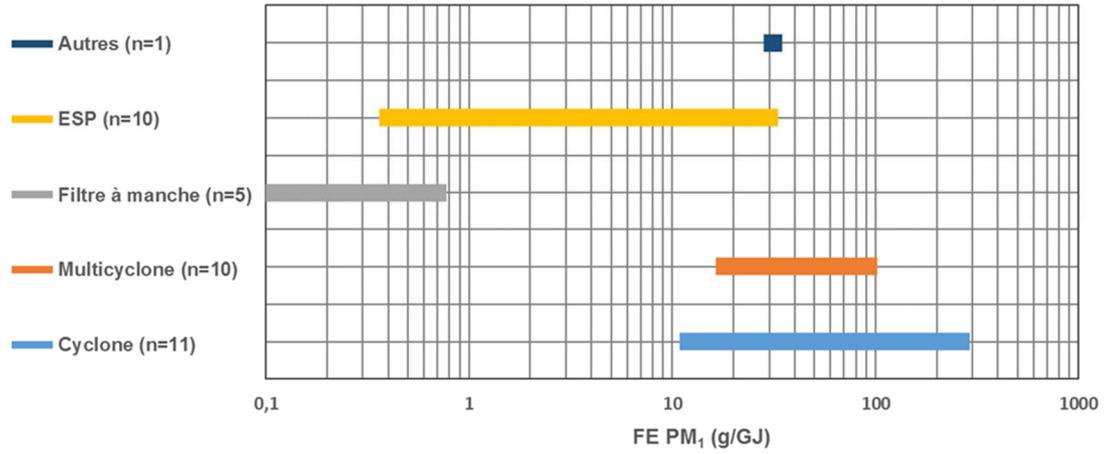


Figure 29 : Gammes des facteurs d'émission de PM₁ par système de traitement de fumée

Les différences de gammes de facteurs d'émission observés, triées par système de traitement de fumée, sont tout autant, voire plus, significatives que pour les autres niveaux granulométriques de particules (TSP et PM₁₀ notamment) (

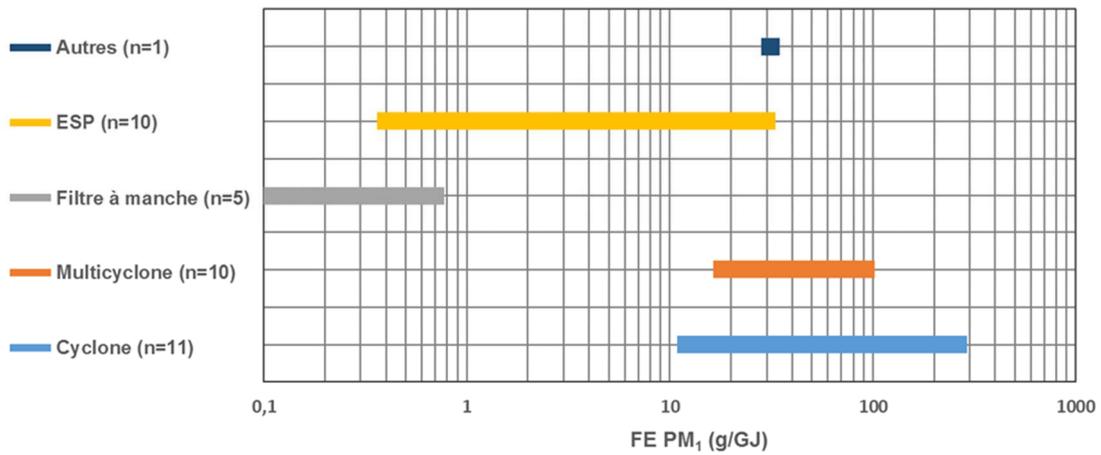
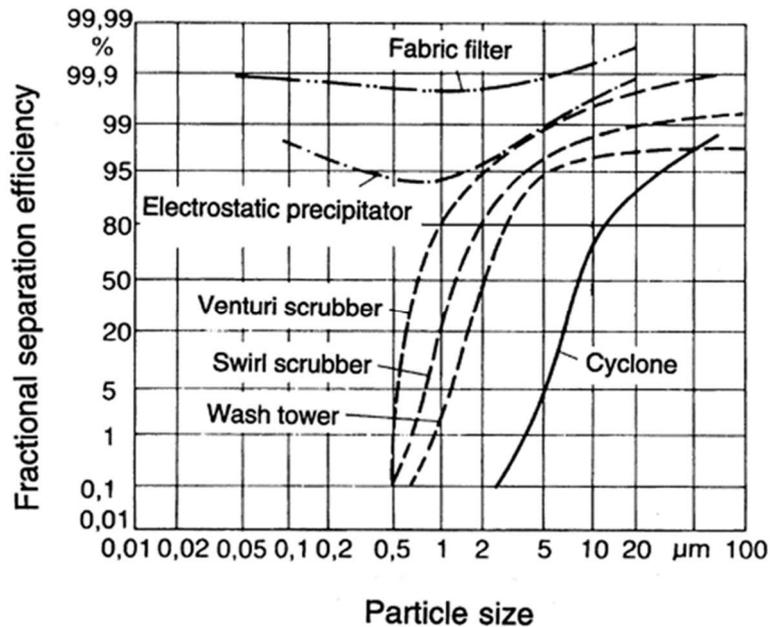


Figure 29). Cette taille de particules, plus dangereuses pour la santé, est par ailleurs beaucoup moins bien éliminée par le système de traitement de fumée de type « Cyclone » ou « Multicyclone », comme illustré



sur la

Figure 21. Pour les granulométries plus fines, les étendues de facteurs d'émission observées pour ces systèmes de traitement de fumée se distancient d'ailleurs de celles observées pour les électrofiltres et les filtres à manches, pour lesquels l'efficacité reste importante même pour des particules fines ou ultrafines. La mesure reportée dans la catégorie « Autres » correspond à une chaudière équipée d'un épurateur par voie humide.

Granulométrie des PM₁

Certaines des études présentées permettent d'identifier spécifiquement la part des PM₁ au sein des poussières totales (TSP) :

- L'étude de Wierbicka et al. (2005) [28] mesure des proportions de PM₁ (méthode DS) variant entre **48,5 et 76,5 % des TSP** (méthode SP) et entre **54 et 98 % des PM₅** (méthode DS).
- Ces proportions se situent entre **29 et 72 % des TSP** dans les résultats du rapport de l'ADEME (« Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse - Campagne de mesure 2016 », 2018) [15] (méthode SP).
- Sippula et al. (2017) [26] mesure des proportions de PM₁ entre **56,5 et 93 % des TSP** (méthodes DS/DT) selon les différents combustibles testés.
- Valmari et al. (1998) [21] obtiennent des valeurs bien plus basses, entre **9 et 21 % des TSP** mais avec des méthodes expérimentales mesurant uniquement les particules solides de diamètre supérieur à 0,1 µm. Cela a pu entraîner une sous-estimation de ces proportions au sein des TSP.
- À titre indicatif, l'étude de Pagels et al (2003) [30] établit des proportions de PM₁ entre **46 et 97 % des PM₁₀** (méthodes DS/DT).
- À titre indicatif, l'étude de Fachinger et al (2018) [5] obtient des mesures de PM₁ entre **34 et 100 % des PM₁₀** (méthodes DS).
- Sippula et al. (2009) [12] et Strand et al. (2002) [47] présentent également cette granulométrie avec des mesures réalisées en amont et en aval des systèmes de traitement de fumée. Les proportions résultantes de ces études sont résumées dans le tableau ci-dessous:

Combustible et système de combustion	Facteur de charge	Méthodologie	Système de traitement de fumée	PM ₁ / TSP (PM _{0,8} pour [47])	Référence
Chaudière de 5 MW alimentée en déchets de bois	[76 - 82] %	DT avec DR entre 1:3 et 1:9	Multicyclone	24 %	[12]
			Multicyclone et WS	88,5 %	
Chaudière de 10 MW alimentée en déchets de bois	[69 - 82] %		Multicyclone	16 %	
Multicyclone et ESP	11 %				
Chaudière de 6 MW alimentée en déchets forestiers	[75 - 83] %	DT avec DR = 1:20 (DS avec DR =1:200)	Aucun	56,6 % (72 %)	[47]
			Multicyclone	83,5 % (82 %)	
			Multicyclone et Condenseur	77 % (85 %)	

Tableau 15 : Proportions des PM₁ au sein des TSP dans les études de Sippula et al. (2009) [12] et Strand et al. (2002) [47]

Les systèmes de traitement de fumée ont tendance à faire augmenter la part des particules fines au sein des TSP tout en réduisant leur masse totale. Cela provient de l'efficacité différenciée de ces systèmes aux différents niveaux de granulométrie illustrée en

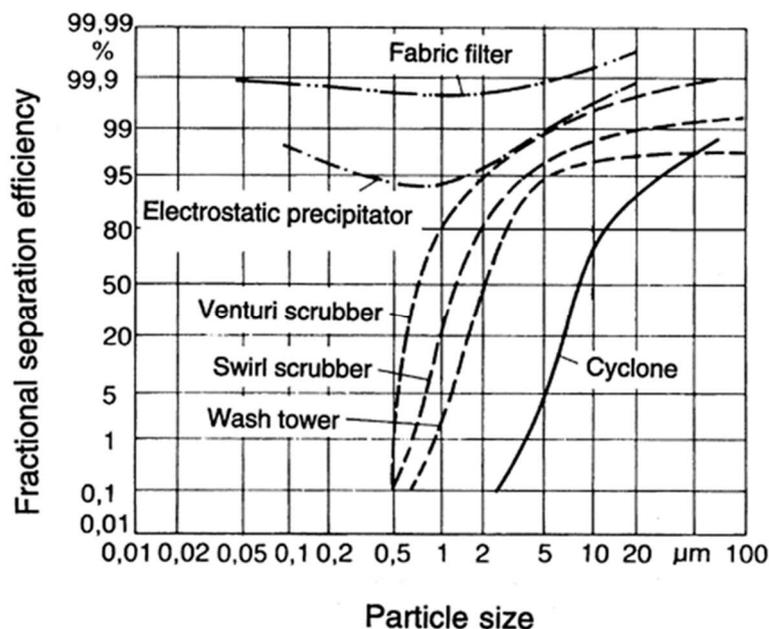


Figure 21. On remarque que l'électrofiltre provoque l'effet inverse car il peut se révéler plus efficace à de très petits diamètres de particules par rapport aux épurateurs par voie humide.

Par ailleurs, Sippula et al. (2009) [12] présente aussi des granulométries de PM₁ de 28 et 46 % comparativement aux TSP pour les autres appareils analysés dans le tableau ci-dessus.

Les proportions dans lesquelles varient les PM₁ au sein des TSP sont beaucoup plus étendues et cela souligne que la granulométrie plus fine des particules est d'autant plus dépendante des conditions de combustion et de traitement de fumé, et peut varier significativement d'un cas à l'autre.

1.9.5. PM_{0,1}

Une seule d'étude couvrant également les émissions de particules dont le diamètre est inférieur à 0,1 µm (soit 100 nm) a été identifiée [5]. Les facteurs d'émission associés ne sont pas présentés en détail dans ce rapport mais s'échelonnent entre 0,016 et 13 g/GJ selon les différents cas expérimentaux de l'étude.

1.9.6. Carbone suie ou Black Carbon (BC)

Le carbone suie (ou « Black Carbon » en anglais, aussi appelé « Elemental Carbon ») provient de la combustion incomplète de combustibles fossiles ou de biomasse. En plus de ses effets sanitaires notamment cardiovasculaires et cancérigènes, il est également classé parmi les forceurs climatiques ; autrement dit, en réchauffant l'atmosphère, le carbone suie participe au changement climatique.

Différentes méthodes existent pour mesurer cet élément, sans qu'une standardisation des pratiques ne soit encore effective dans la communauté scientifique [48]. Certaines reposent sur les propriétés optiques du carbone suie (méthodes optiques), d'autres sur les propriétés thermiques ou chimiques (méthodes thermo-optiques), mais ces méthodes ne sont pas équivalentes, car elles ne quantifient pas les mêmes substances carbonées. Cette distinction est illustrée ci-dessous ; la Figure 30 présente également les différents termes qui peuvent être rencontrés en relation avec le carbone suie.

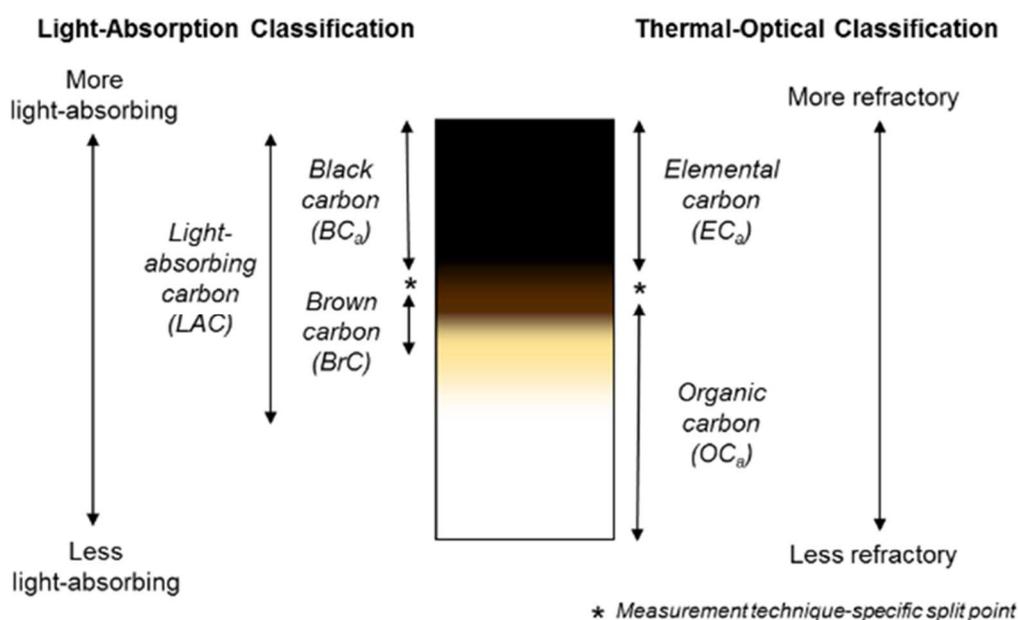


Figure 30 : Classification du carbone selon méthode optique (gauche) ou thermo-optique (droite) [49]

Les facteurs d'émission (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) varient sur plusieurs ordres de grandeur, entre **0,0005 et 8,5 g/GJ** et sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Le plus faible facteur d'émission (**0,0005 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières dans une chaudière de 1,5 MW, opérant à facteur de charge augmentant de 107 % à 120 %, et équipée d'un électrofiltre [5]. La méthode de mesure utilisée est une méthode optique.

Le plus important (**8,5 g/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois, à 7 % d'humidité dans une chaudière de 1,5 MW équipée seulement d'un multicyclone et à un taux de charge moyen [28]. La méthode de mesure utilisée est une méthode thermo-optique.

Par ailleurs, le facteur d'émission moyen en BC (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) résultant de l'ensemble des études identifiées est de **1,2 g/GJ** et le facteur d'émission médian de **0,159 g/GJ**.

La plupart des méthodes d'échantillonnage et de mesure rencontrées repose sur des filtres quartz suivis d'une analyse thermo-optique. Certaines études utilisent une méthode d'analyse seulement optique [5] ou seulement thermique (par détection coulométrique) [15].

À titre de comparaison, les facteurs d'émission déterminés par le Citepa pour le BC pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse sont de :

- 2,2 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 0,37 g/GJ pour celles qui en font partie, pour le secteur du chauffage urbain ;
- 26 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 4,4 g/GJ pour celles qui en font partie, pour le secteur tertiaire ;
- 3,07 g/GJ pour celles hors du dispositif Fonds Chaleur et 0,51 g/GJ pour celles qui en font partie, pour le secteur agricole ;
- 17,1 g/GJ pour le secteur de l'industrie manufacturière où la distinction liée au dispositif du Fonds Chaleur n'a pas encore été implémentée dans l'inventaire national.

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (µg/Nm³)	Référentiel de mesure	Facteur d'émission BC (mg/G) ¹²	Commentaire	Référence		
Miscanthus dopé à l'hydroxide de calcium (2% massique)		Multicyclone	400 kW (rotation combustion boiler)	100 %	MAAP model 5012 de Thermo Scientific (mesure de diffraction de la lumière et de la transmission optique des particules déposées sur le filtre)		25 °C, 1013 hPa	50 ± 20	Stable 1 (slightly disturbed)	[5]		
Plaquettes forestières								ESP	1,5 MW (moving grate boiler)		27 %	BC au sein des PM ₁
											[27 → 107] %	
											107 %	
		[107 → 120] %										
		120 %										
		120 %										
Granulés de bois		Aucun	150 kW Hamont CATfire wood pellet boiler	50 %				Exprimés en EC (Elemental Carbon)				
				69 %								
				98 %								
Plaquettes forestières	24 %	Multicyclone	Rotating grate combustion unit 15 MW	[83 - 87] %	DR (1:3 à 1:9) Filtres quartz (800°C - 3h) et Méthode thermo-optique		4,6 % O ₂	190	Exprimés en EC	[7] / [12]		
				[108 - 109] %				81				
Déchets forestiers		Cyclone	Gasification combustion 7 MW	[61 - 67] %			4 % O ₂	100		[12]		
Copeaux, chutes et sciure de bois	7,7 %	Multicyclone	1,5 MW (with moving grates)	Bas	Filtres quartz et méthode de mesure thermo-optique		8,0 % O ₂	1928	Exprimés en EC (Elemental Carbon)	[22]		
	22,8 %			Moyen				800				
				Elevé				200				
Granulés de bois	7,3 %			20%		[7 000 - 10 600]	9,5 % O ₂	[3 200 - 4 900]				

¹² Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

			1,5 MW (with moving grates)	[27 - 60] %		[4 600 - 14 900]		[2 100 – 6 800]		
Granulés de bois	7 %	Multicyclone	1,5 MW (with moving grates)	Bas	DR (1:150) et filtres quartz (800°C - 3h) et méthode de mesure thermo-optique	[10 900 - 16 300]	13 % CO ₂ , 0 °C et 101,3 kPa	[4 000 – 6 000]	EC au sein des PM ₁	[28]
				Moyen		[7 300 - 23 200]		[2700 – 8 500]		
Sciure (sawdust)	10 %	Multicyclone	1,5 MW (with moving grates)	Bas		540		205		
				Moyen		90		34		
				Elevé	300	114				
Granulés de bois (tronc)	8,3 %	Cyclone	500 kW reprocatng grates boiler	63 %	Porous tube diluter (PRD) + Ejector Diluter (ED) et Filtres quartz et analyse thermo-optique (Procédure NIOSH 5040)		7,5 % O ₂	1 900	Résultats graphiques, en EC au sein des PM ₁	[26]
Granulés de bois (écorce)	10 %			64 %				400		
Granulés de bois	9,2 %			82 %				740		
Mélange de granulés de bois (tronc et écorce)	8,3 %			66 %				3 600		
Granulés de bois	4,6 %	2,5 µm in-stack cyclone	150 kW	76 %	DR (1:20 à 1:40) et Filtres quartz (550 °C – 16 h) et analyse thermo-optique (NIOSH EC (diesel particulate) méthode 5040))			110 ± 10	Exprimés en EC au sein des PM _{2,5}	[3]
Plaquettes forestières	26 %			60 %				20 ± 40		
Granulés de bois	5,1 %		500 kW	[75 - 124] %				240 ± 190		
Plaquettes forestières	38,7 %	Filtre à manches	8 MW	63 %	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre en fibres de quartz. Analyse par coulométrie	30	6 % O ₂	5,4		[15]
Produits bois en fin de vie	32,7 %	Électrofiltre	1,8 MW	107 %		29		10,7		
	35,3 %	Électrofiltre	2,5 MW	64 %		721		269,0		
Déchets de bois	38,3 %	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %		115		45,0		
Plaquettes forestières	43,1 %	Filtre à manches	2,5 MW	76 %		37		6,7		
	41,4 %	Filtre à manches	10 MW	101 %		44		8,0		
	17,8 %	Électrofiltre	300 kW	68 %		275		49,9		
	39,9 %	Filtre à manches	21 MW	110 %		41		7,4		

Tableau 16 : Facteurs d'émission du Black Carbon (BC) ou Elemental Carbon (EC) pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

Les figures ci-dessous (Figure 31 et Figure 32) présentent les gammes de facteurs d'émission du BC du tableau ci-dessus par grand type de combustible et par puissance thermique.

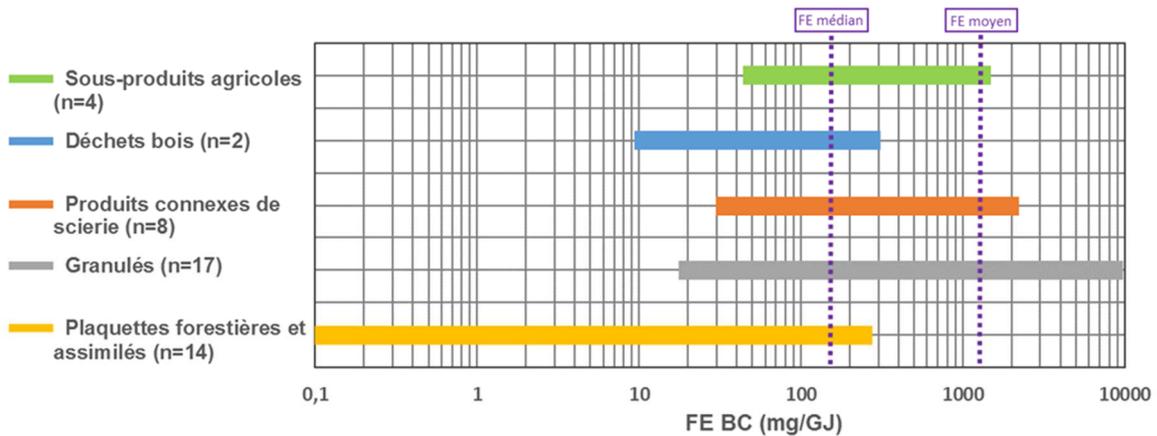


Figure 31 : Gammes des facteurs d'émission de BC/EC par catégorie de combustible

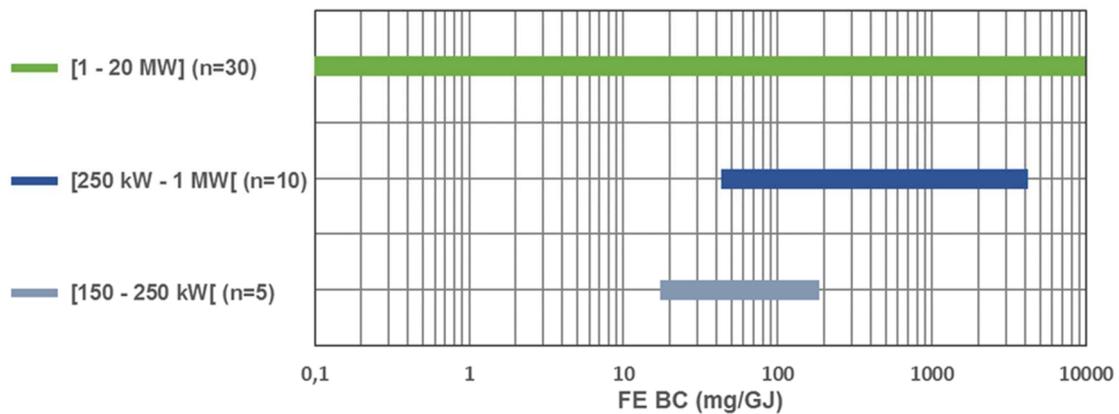


Figure 32 : Gammes des facteurs d'émission de BC/EC par gamme de puissance d'appareil

Les catégories de combustibles « Granulés » et « Plaquettes forestières et assimilés » sont les plus représentées dans la littérature couverte dans notre revue bibliographique. Seule cette dernière présente des facteurs d'émission inférieurs à 10 mg/GJ (Figure 31).

Les gammes de facteur d'émission de la Figure 32 sont d'autant plus étendues qu'un nombre important ou non de mesures a été observé. Il est en revanche possible de supposer que les installations de plus petite puissance, moins équipées en système de traitement de fumée, puissent présenter des valeurs de facteur d'émission de BC plus élevées en moyenne. Le petit nombre d'études identifiées dans la littérature ne permet pas de confirmer cette hypothèse (Figure 33).

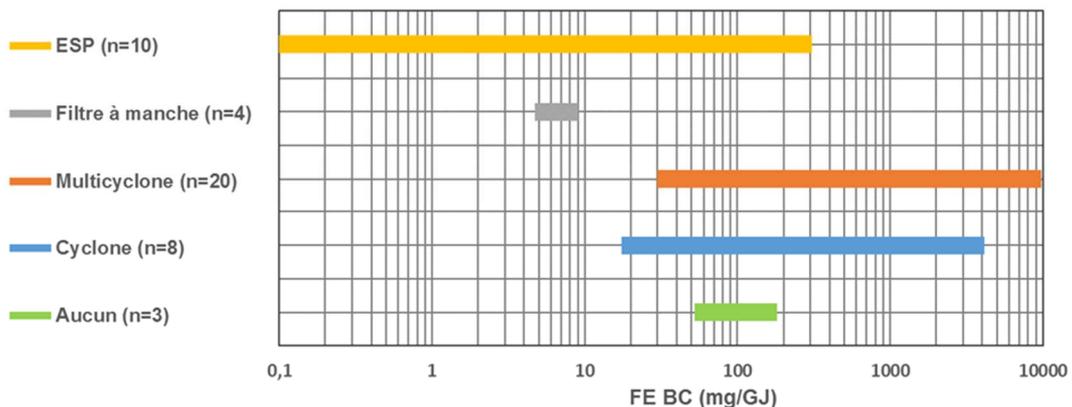


Figure 33 : Gammes des facteurs d'émission de BC/EC par système de traitement de fumée

À l'instar de ce qui a été observé pour les différentes tailles de particules, le système de traitement de fumée semble être le facteur le plus déterminant sur le niveau d'émission de carbone suie. Les installations sans système de traitement de fumée ou équipées seulement de cyclone ou multicyclone ont des niveaux d'émission plus élevés en carbone suie que celles équipées d'un électrofiltre ou d'un filtre à manches. La distinction n'est cependant pas aussi nette que ce qui a pu être observé pour les PM₁₀ ou les PM₁ puisque la gamme des facteurs d'émission des ESP recouvre partiellement celles attribuées aux cyclones et multicyclones. Par conséquent, l'influence d'autres paramètres tels que la qualité du combustible ou le facteur de charge pourrait être à approfondir avec davantage de données.

Granulométrie du BC

Certaines des études présentées permettent d'identifier spécifiquement la part du carbone suie ou carbone élémentaire au sein des particules à partir desquelles les mesures ont été réalisées :

- L'étude de [Fachinger et al. \(2018\)](#) [5] mesure des proportions de BC variant entre **0,16 et 0,38 % des PM₁** (idem au sein des PM₁₀) pour la chaudière de 1 MW (plaquettes forestières - ESP), et entre **1 et 4 % des PM₁** (1 et 2,5 % des PM₁₀) pour la chaudière de 400 kW (miscanthus - Multicyclone).
- [Omara et al. \(2010\)](#) [27] mesure des proportions plus basses en EC, entre **0,03 et 0,15 % des PM₁₀** selon les différents taux de charge.
- [Sippula et al. \(2009\)](#) [12] obtient entre **0,2 et 1,35 % d'EC** parmi les PM₁.
- [Lillieblad et al. \(2004\)](#) [22] mesure des proportions d'EC entre **9,6 et 18 % des TSP** pour des faibles taux de charge (et donc des combustions incomplètes) et **0,8 % des TSP** à taux de charge moyen.
- [Wierzbicka et al. \(2005\)](#) [28] estime la part d'EC entre **0** (non détecté) et **8 % des PM₁** pour la combustion de sciures, et entre **18 et 56 %** pour celle de granulés (différents facteurs de charge).
- [Sippula et al. \(2017\)](#) [26] identifie des parts d'EC entre **2 et 17 % des PM₁** pour différents types de combustible.
- [Chandrasekaran et al. \(2011\)](#) [3] mesure des proportions d'EC entre **0,05 et 0,9 % des PM_{2,5}**.
- Le rapport de l'ADEME [15] sur la campagne de mesures 2016 des chaufferies biomasse indique des ratios de carbone élémentaire émis entre **1,9 et 5% des PM_{2,5}** et entre **1,3 et 4,3 % des TSP**.

La granulométrie du BC/EC étudiée dans la littérature est donc très variable et la nature des particules sur lesquelles elle peut être déterminée (TSP, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁) l'est également.

1.10. Facteurs d'émission des métaux

Métaux lourds et éléments trace

La définition retenue pour le droit européen et celui des États-membres est : « un métal lourd désigne tous composés d'antimoine, d'arsenic, de cadmium, de chrome hexavalent, de cuivre, de plomb, de mercure, de nickel, de sélénium, de tellure, de thallium et d'étain, ainsi que tous matériaux sous forme métallique, pour autant qu'ils soient classés comme substances dangereuses ». C'est sur cette définition que nous baserons notre synthèse.

Tous les métaux lourds sont présents naturellement à l'état de traces dans l'environnement. Cependant, pour nombre d'entre eux, l'activité humaine a fortement augmenté leur présence. La combustion, entre autres, peut contribuer au rejet de métaux dans l'environnement, via les cendres et les rejets gazeux.

Au regard des données inventoriées, on constate de très grands écarts dans les gammes de facteurs d'émission, tout particulièrement pour le zinc dont les résultats s'étendent de quelques dixièmes de mg/GJ à plus d'un g/GJ. Contrairement à d'autres composés dont les émissions sont régies par des phénomènes physico-chimiques, les rejets de métaux lors de la combustion de la biomasse sont le reflet de la composition des combustibles, des sols dans lequel ils ont poussé, des conditions de stockage et des traitements qu'ils ont subis.

Ainsi, bien que le nombre de mesures soit limité, on observe des facteurs d'émission plus élevés pour la catégorie « Déchets bois », qui regroupe des combustibles plus susceptibles d'être traités en amont.

Certaines études [12] [3] constatent que la plupart des métaux lourds ont tendance à se retrouver davantage dans les particules les plus fines émises par la combustion de biomasse.

L'ensemble des données relatives aux émissions de métaux lourds sont inventoriées dans le tableau ci-dessous.

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Facteur d'émission (mg/GJ) ¹³										Commentaire	Référence
						As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	V	Pb	Zn			
Granulés de bois	4,6%	2,5 µm in-stack cyclone	150 kW	76 %	DR (1:20 à 1:40) avec FDMS (Filter Dynamics Measurements System)	< DL	0,278	0,226	2,860	10,400	< DL	0,018	3,640	39,000	D'autres métaux sont étudiés. Les FE sont déduits de la composition chimique de PM _{2,5} .	[3]	
Granulés de bois	5,1%		500 kW	[75 - 124] %		< DL	0,431	3,419	13,939	102,570	< DL	0,018	7,101	76,270			
Sciure et écorce de bois	24 %	Cyclone	Rotating grate combustion unit 10 MW	[69 – 82] %	Cyclone + BLPI (Impacteur Berner à basse pression) - PM ₁	1,65	0,64	72	11,2	75	8,2	0,0858	17	1 170	5 % O ₂	[7] / [12]	
Sciure et écorce de bois	24 %	Cyclone + ESP	Rotating grate combustion unit 10 MW	[69 – 82] %		0,0386	0,0314	2,02	0,795	3,14	0,137	< DL	0,726	64	5 % O ₂		
Sciure et écorce de bois	22 %	Cyclone	Rotating grate 5 MW	[76 – 82] %		3,5	2,5	37	24	46	13	< DL	29	980	5,2 % O ₂	[12]	
	17 %	Cyclone + WS		[74 – 80] %		1,8	1,2	14	12	25	6	< DL	19	550	5,1 % O ₂		
Plaquettes forestières	24 %	Monocyclone	Gasification combustion 7 MW	[61 – 67] %		1,1	0,73	< DL	< DL	0,18	< DL	< DL	21	660	4 % O ₂		
Plaquettes forestières ('bole')	[41 - 43] %	Multi-cyclone	Inclined grate stocker 2050 kW	[35 - 70] %	Ash samples digested in nitric acid using a CEM MARS 5 microwave. Analysis with a Thermo X-Series ICPMS with CCT.		0,003	0,005	0,016	0,124	0,003		0,014	0,537	[8]		
Plaquettes forestières ('mill end')	[43 - 45] %			[53 - 70] %		0,002	0,004	0,012	0,193	0,003	0,01	0,219					
Bois naturel, panneaux de particules, palettes, etc.	[5 - 55] %			[0,2 - 8] MW		2,6	1,4	18	38	121	39	1,4	90	320	Moyenne pour le Cd, As, Pb, Cr, Cu et le Ni (5 mesures), pour le Zn (4 mesures), pour le Mn (3 mesures) pour le V (2 mesures).	[14]	
Plaquettes forestières	38,7 %	Filtre à manches	8 MW	63 %	Prélèvement d'un échantillon	0,59	0,2	16,5	8,6	3,7	0,7	4,6	7,5	49	Concentrations à 6 % O ₂	[15]	

¹³ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

Produits bois (fin de vie)	32,7 %	Électrofiltre	1,8 MW	107 %	représentatif de l'effluent gazeux, collecte des particules sur filtre et passage du flux gazeux à travers une solution d'absorption Dosage par ICP/AES et ICP/MS	0,04	0,2	0,3	3,2	1,6	4,3	0,7	0,7	11		
	35,3 %	Électrofiltre	2,5 MW	64 %		6,58	0,7	9,6	19,5	85,4	3	61,6	48,1	255		
Plaquettes forestières	22,8 %	Filtre à manches	6 MW	82 %		0,30	0,3	7,2	11,3	18,0	7,6	20,6	21,6	71		
Déchets de bois	38,3 %	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %		0,23	0,2	1,5	27,0	7,6	25,5	9,4	18,7	510		
Plaquettes forestières	43,1 %	Filtre à manches	2,5 MW	76 %		0,12	0,9	2,5	2,8	19,2	2,3	6,9	7,5	6		
	41,4 %	Filtre à manches	10 MW	101 %		0,03	0,0	0,3	0,2	0,6	0,2	0,2	0,2	2		
	39,9 %	Filtre à manches	21 MW	110 %		0,05	0,0	0,2	0,1	2,6	0,1	0,3	0,3	3		
Granulés de bois	5,04 %	Aucun	150 kW Hamont CATfire wood pellet boiler	50,4 %	Collecte des échantillons sur filtres à membrane en polytétrafluoroéthylène 47 mm et analyse en spectroscopie de fluorescence des rayons X	0,0011	0,0197	0,0005	0,0184	0,0316	0,0158	0,0039	0,0016	0,3949	Référentiel de la mesure (0°C, 101,325 kPa, 13 % O ₂)	[27]
				69 %		0,0049	0,0527	0,0004	0,0724	0,0480	0,0058	0,0086	0,0038	0,5528		
				98 %		0,0011	0,0619	0,0059	0,0388	0,0434	0,0056	0,0283	0,0009	0,5857		

Tableau 17 : Facteurs d'émission des ML pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

1.10.1. Plomb

Les analyses paléoclimatiques ont montré que le plomb était quasiment absent de l'atmosphère préindustrielle sauf dans l'antiquité grégoromaine (mise en place de fonderies de plomb). Depuis la révolution industrielle, la pollution routière et industrielle, les guerres ainsi que la chasse et la pêche (munitions et agrès à base de plomb) sont à l'origine d'apports de plomb parfois considérables. C'est un élément toxique, mutagène, et reprotoxique. Les maladies et symptômes qu'il provoque chez l'homme ou l'animal sont regroupées sous le nom de « saturnisme ».

Les références étudiées détaillant les émissions de plomb sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,0009 et 48,1 mg/GJ** (à l'exception du facteur d'émission proposé dans l'étude [14] car prenant en compte plusieurs catégories de combustibles à la fois – 90 mg/GJ) :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,0009 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 5,04 % d'humidité dans une chaudière de 150 kW sans système de traitement de fumée à 98 % de son taux de charge nominale et à 13 % d'O₂ [27].
- Le plus important (**48,1 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de produits bois en fin de vie à 35,3 % d'humidité dans une chaudière de 2,5 MW équipée d'un électrofiltre, à taux de charge de 64 % et à 6 % d'O₂ [15].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 90 mg/GJ.

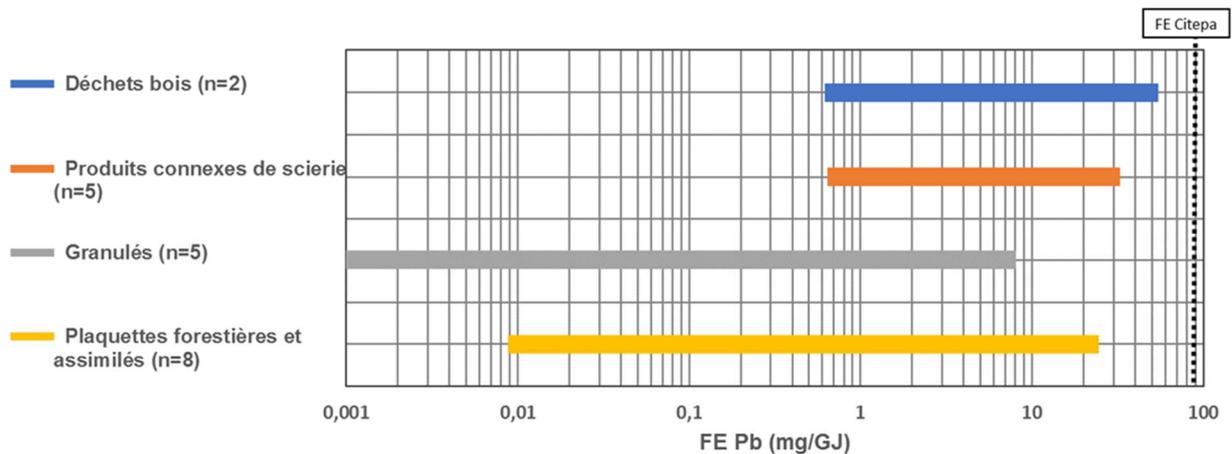


Figure 34 : Gammes des facteurs d'émission de plomb par catégorie de combustible

La catégorie « Déchets bois » est la moins présente dans la littérature scientifique et présente le facteur d'émission moyen le plus élevé, soit 24,4 mg/GJ. À l'inverse, les « Granulés » ont le facteur d'émission moyen le plus bas, soit 2,15 g/GJ (Figure 34).

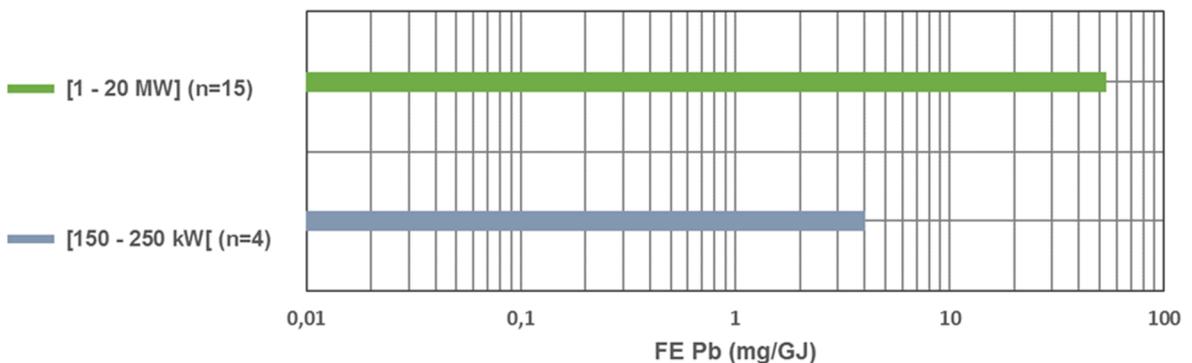


Figure 35 : Gammes des facteurs d'émission de plomb par gamme de puissance d'appareil

La Figure 35 ci-dessus représente les facteurs d'émission par gamme de puissance d'appareils, on note que la majorité des études porte sur la gamme [1 - 20] MW.

1.10.2. Cadmium

Le cadmium est très toxique pour les organismes vivants. Par inhalation, il passe dans le sang et s'accumule dans le foie tout en provoquant des troubles rénaux graves. Le cadmium a des propriétés chimiques très proches de celles du calcium. Ainsi, il interagit avec le calcium des os. Le cadmium en excès présent dans l'organisme cause une porosité osseuse, une déformation des os, des fractures multiples, et un ratatinement progressif du corps. En présence d'autres composés, il peut se transformer en oxydes de cadmium dont l'inhalation à faible concentration provoque une fièvre persistante, connue sous l'appellation de "fièvre des fonderies", et à haute concentration entraîne un œdème du poumon.

Les références étudiées détaillant les émissions de cadmium sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission (hors valeurs reportées comme nulles) se situent entre **0,002 mg/GJ** et **2,5 mg/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,002 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières à 44 % d'humidité environ dans une chaudière de 2,05 MW équipée d'un multicyclone, à un taux de charge compris entre 44 et 70 % [12].
- Le plus important (**2,5 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de sciure et d'écorce de bois à 22 % d'humidité dans une chaudière de 5 MW équipée d'un cyclone, à un taux de charge compris entre 76 et 82 % d'O₂ [12].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 1,4 mg/GJ.

Dans le rapport de l'ADEME (« Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse - Campagne de mesure 2016 », 2018) [15], certaines émissions de Cd sont reportées comme étant nulles. Nous avons fait le choix de définir ces mesures comme comprises entre 0,001 mg/GJ et 0,01 mg/GJ dans les deux graphiques ci-dessous (Figure 36 et Figure 37).

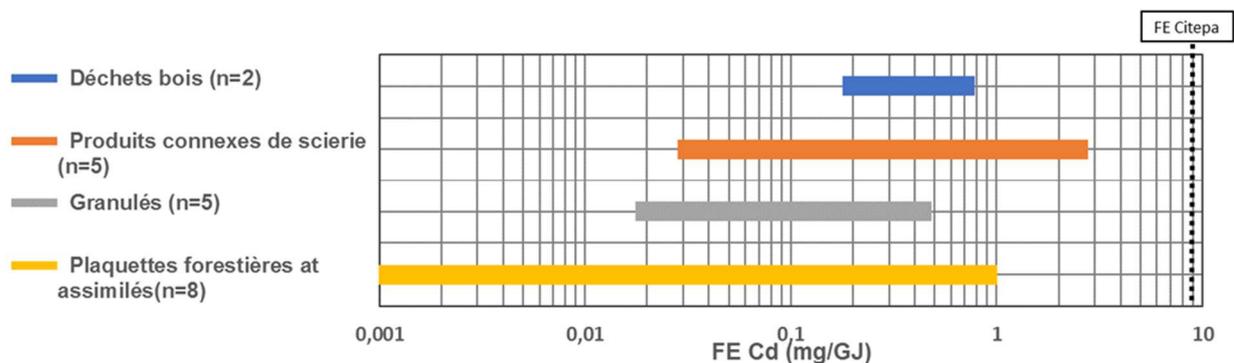


Figure 36 : Gammes des facteurs d'émission de cadmium par catégorie de combustible

À l'image du plomb, la catégorie « Déchets bois » est le combustible le moins présent dans la littérature pour le cadmium. On note également que plus le nombre de mesures est important, plus la gamme de valeur s'étend. Cela semble indiquer une disparité importante dans le contenu en cadmium des combustibles (Figure 36).

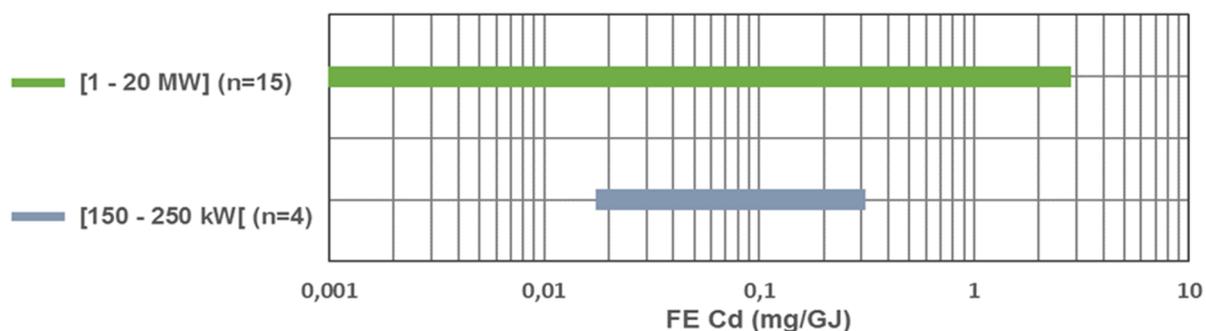


Figure 37 : Gammes des facteurs d'émission de cadmium par gamme de puissance d'appareil

La Figure 37 ci-dessus représente les facteurs d'émission par gamme de puissance d'appareils. On note que la majorité des études porte sur la gamme [1 - 20] MW.

1.10.3. Arsenic

Comme les autres éléments traces ou métaux lourds, l'arsenic est un élément pouvant contaminer les écosystèmes par dépôt ou lessivage atmosphérique (rabattement à la surface via les précipitations). La contamination à l'arsenic, même à petites doses entraîne divers cancers (poumons, peau, vessie, reins) et des maladies cardiovasculaires. C'est également un perturbateur endocrinien.

Les références étudiées détaillant les émissions d'arsenic sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,0011 et 6,6 mg/GJ** (à l'exception des facteurs d'émission inférieurs aux seuils de détection) :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,0011 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 5,04 % d'humidité dans une chaudière de 150 kW sans système de traitement de fumée pour des taux de charge variables et à 13 % d'O₂ [27].
- Le plus important (**6,6 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de produits bois en fin de vie à 35,3 % d'humidité dans une chaudière de 2,5 MW équipée d'un électrofiltre fonctionnant à 64 % de son taux de charge nominale et à 6 % d'O₂ [15].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 9,5 mg/GJ.

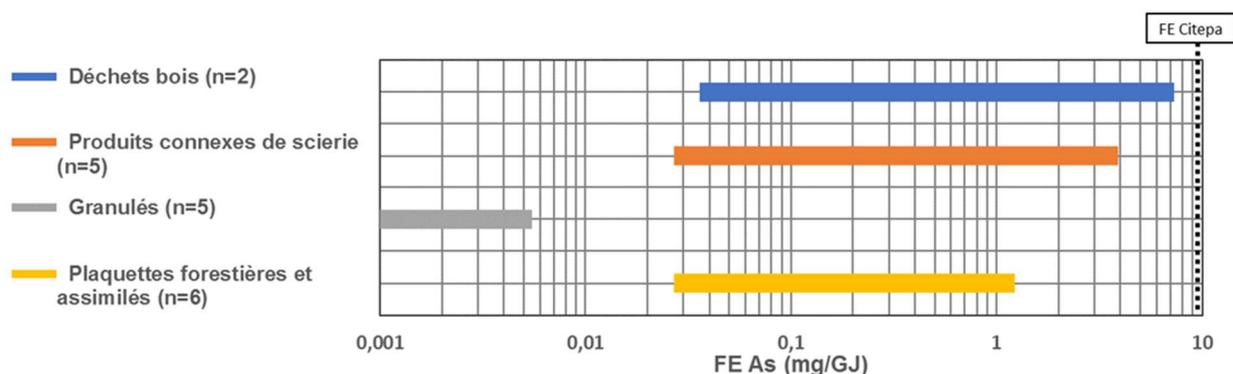


Figure 38 : Gammes des facteurs d'émission d'arsenic par type de combustible

La catégorie « Granulés » présente les facteurs d'émission les plus bas (Figure 38). En effet, le facteur d'émission moyen de cette catégorie de combustibles est de 0,0024 mg/GJ tandis que les facteurs d'émission moyens des autres catégories varient entre 0,37 mg/GJ et 3,31 mg/GJ. Cela provient de l'étude d'Omara et al. (2010) [27] qui présente des valeurs particulièrement basses.

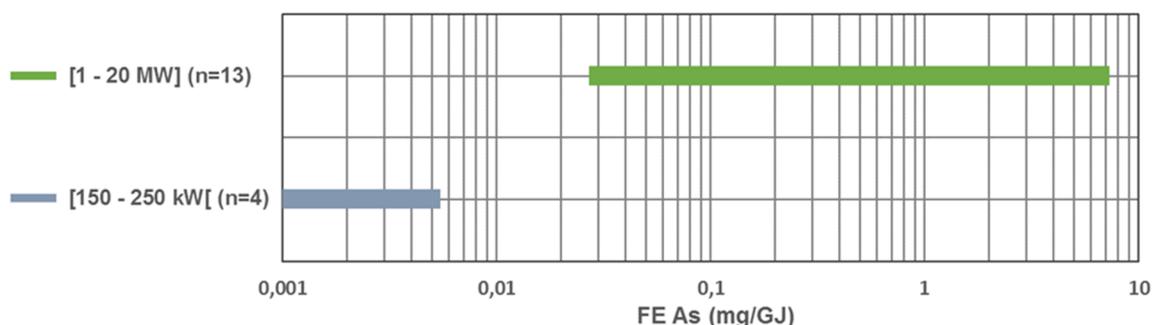


Figure 39 : Gammes des facteurs d'émission d'arsenic par gamme de puissance d'appareil

Sur les deux figures ci-dessus, les valeurs de facteurs d'émission indiquées comme inférieures au seuil de détection dans la littérature ont été représentées sur l'intervalle [0,001 – 0,002] mg/GJ. On note que la majorité des études portent sur la gamme [1 - 20] MW. On constate également que cette dernière gamme de puissance présente des rejets plus importants que les appareils de petite puissance représentés presque uniquement chez Omara et al. (2010) [27].

1.10.4. Nickel

Si le nickel sous sa forme classique (solide) en faible quantité n'est pas toxique, certains composés de nickel peuvent être extrêmement dommageables. C'est le cas par exemple du nickel tétra-carbonyle, cancérigène reconnu, que l'on retrouve dans les vapeurs et fumées. De plus, en cas de contamination massive par du nickel, les sols deviennent stériles. Enfin le nickel est un allergisant reconnu (le plus puissant de tous les métaux) et est classé par le Centre International de Recherche sur le Cancer dans les substances possiblement cancérigènes.

Les références étudiées détaillant les émissions de nickel sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,0056 et 25,5 mg/GJ** (à l'exception des facteurs d'émission inférieurs aux seuils de détection et de celui proposé dans l'étude du Citepa (Allemand, 2003) [14] qui prend en compte plusieurs catégories de combustibles et d'appareils) :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,0056 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 5,04 % d'humidité dans une chaudière de 150 kW sans système de traitement de fumée à 98 % de son taux de charge nominale et à 13 % d'O₂ [27].
- Le plus important (**25,5 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de déchets de bois à 38,3 % d'humidité dans une chaudière de 7,2 MW équipée d'un électrofiltre fonctionnant à 55 % de son taux de charge nominale et à 6 % d'O₂ [15].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 11 mg/GJ.

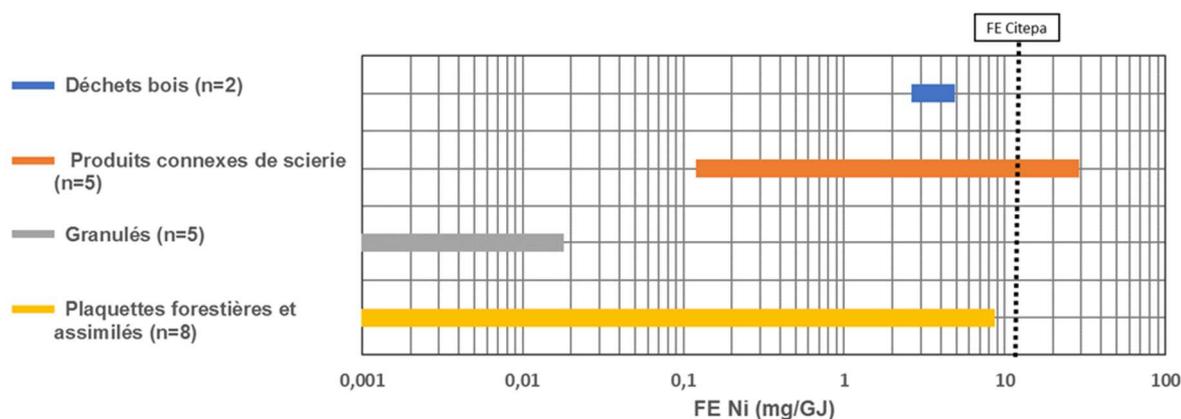


Figure 40 : Gammes des facteurs d'émission de nickel par catégorie de combustible

À l'image du cadmium, le « Déchets bois » est le type de combustible le moins présent dans la littérature pour les émissions de nickel (Figure 36). On note également que plus le nombre de mesures est important, plus la gamme de valeur s'étend. Ceci semble indiquer une disparité importante dans le contenu en nickel des combustibles.

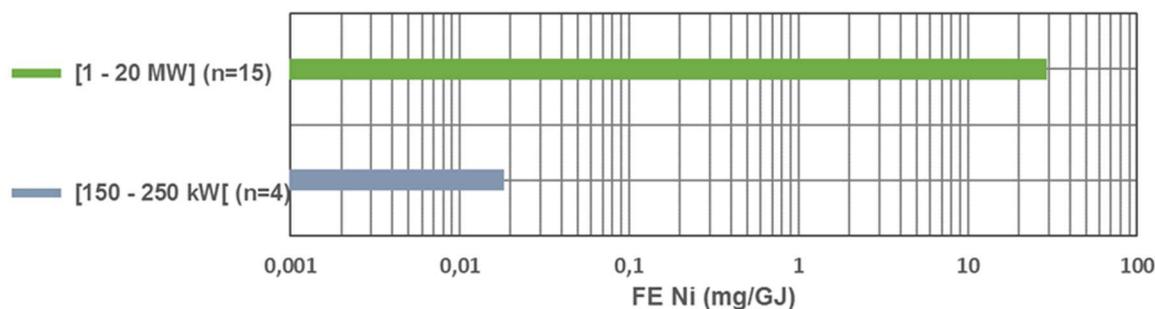


Figure 41 : Gammes des facteurs d'émission de nickel par gamme de puissance d'appareil

Sur les deux figures ci-dessus, les valeurs de facteurs d'émission indiquées comme inférieures au seuil de détection dans la littérature ont été représentées sur l'intervalle [0,001 - 0,01] mg/GJ. On note que la majorité des études portent sur la gamme [1 - 20] MW.

On constate également que la catégorie « Granulés » et la gamme de puissance [150 - 250 kW] possèdent des facteurs d'émission plus bas. Ils sont soit inférieurs aux limites de quantification [3], soit particulièrement bas [27]. Le manque de données empêche toute généralisation de ces observations.

1.10.5. Cuivre

Le cuivre, quand il est présent sous forme d'ions ou de certains composés biodisponibles peut être écotoxique même à faible dose notamment pour certains organismes aquatiques, et sur terre pour les mousses et lichens. Chez l'être humain, le cuivre et ses dérivés induisent une irritation des voies aériennes et des troubles gastro-intestinaux en cas d'inhalation et une insuffisance hépatique en cas d'ingestion.

Les références étudiées détaillant les émissions de cuivre sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20] MW. Les facteurs d'émission se situent entre **0,012** et **27 mg/GJ** (à l'exception des facteurs d'émission inférieurs aux seuils de détection et de celui proposé dans l'étude [14] qui prend en compte plusieurs catégories de combustibles et d'appareils) :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,012 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières à 44 % d'humidité environ dans une chaudière de 2,05 MW équipée d'un multicyclone à [53 - 70] % de son taux de charge nominale [8].
- Le plus important (**27 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de déchets de bois à 38,3 % d'humidité dans une chaudière de 7,2 MW seulement équipée d'un électrofiltre fonctionnant à 55 % de son taux de charge nominale et à 6 % d'O₂ [15].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 31 mg/GJ.

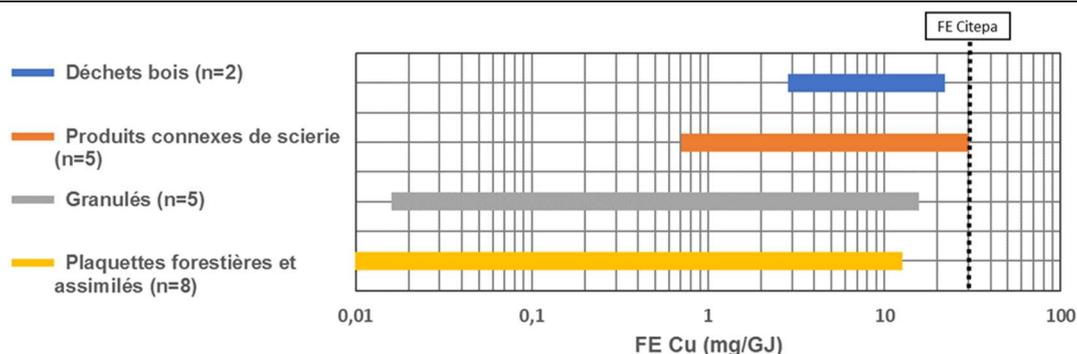


Figure 42 : Gammes des facteurs d'émission de cuivre par catégorie de combustible

À l'image du nickel, le « Déchets bois » est le type de combustibles le moins présent dans la littérature (Figure 42). On note également que plus le nombre de mesures est important, plus la gamme de valeur s'étend. Ceci semble indiquer une disparité importante dans le contenu en Cu des combustibles.

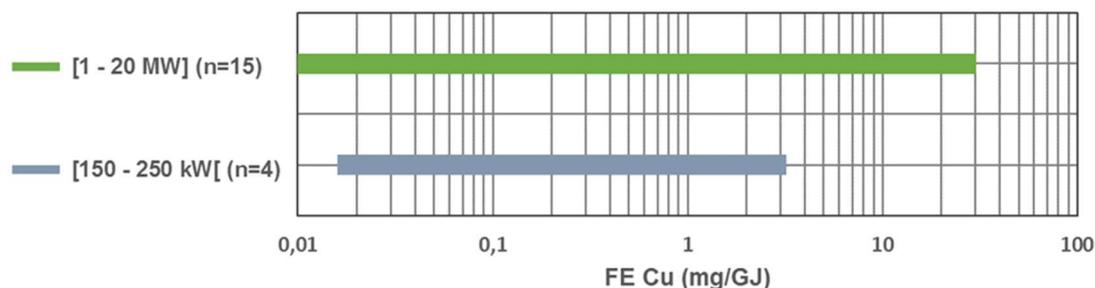


Figure 43 : Gammes des facteurs d'émission de cuivre par gamme de puissance d'appareil

Sur les deux figures ci-dessus, les valeurs de facteurs d'émission indiquées comme inférieures au seuil de détection dans la littérature ont été représentées sur l'intervalle [0,01 - 0,1] mg/GJ. On note que la majorité des études portent sur la gamme [1 - 20] MW.

1.10.6. Zinc

Le zinc, sous sa forme métallique, présente une faible toxicité par inhalation et par voie orale. Cependant, certains composés du zinc sont responsables d'effets délétères chez l'homme. Les effets d'une toxicité à long terme par inhalation sont peu connus. Cependant, le zinc comme tous les autres métaux lourds, peut être toxique pour la biosphère. Étant émis sous forme particulaire, il s'accumule dans l'eau, les sols, les aliments et l'air.

Les références étudiées détaillant les émissions de zinc sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,2 mg/GJ** et **1 170 mg/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,2 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières à 44 % d'humidité environ dans une chaudière de 2,05 MW équipée d'un multicyclone à [53 - 70] % de son taux de charge nominale [8].
- Le plus important (**1 170 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de sciure et d'écorce de bois à 24 % d'humidité dans une chaudière de 10 MW équipée d'un cyclone fonctionnant à [69 - 82] % de son taux de charge nominale et à 5 % d'O₂ [7] [12].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 290 mg/GJ.

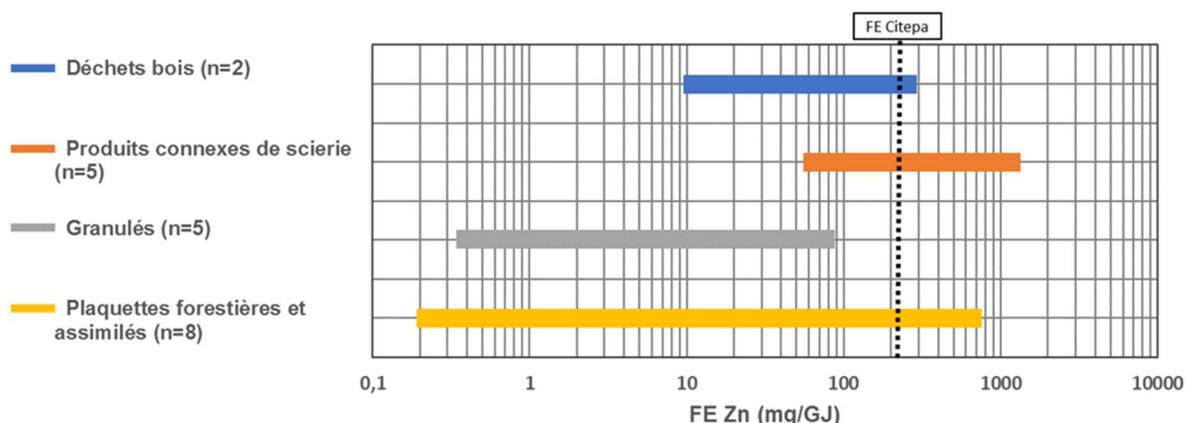


Figure 44 : Gammes des facteurs d'émission de zinc par catégorie de combustible

La Figure 44 présente les facteurs d'émission du zinc par catégorie de combustible ; on constate que ce sont les plus élevés des métaux lourds et éléments traces. De plus on observe que la catégorie « Produits connexes de scierie » est celle dont le facteur d'émission moyen est le plus élevé, à savoir près de 655 mg/GJ.

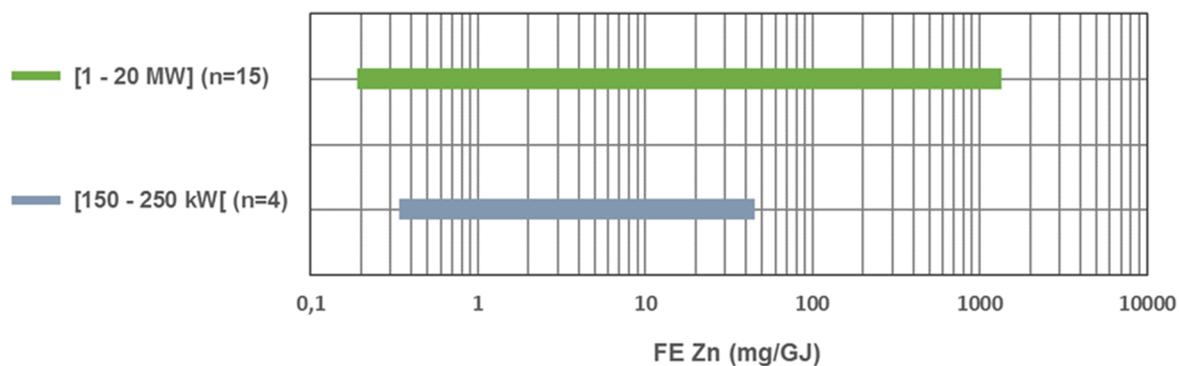


Figure 45 : Gammes des facteurs d'émission de zinc par gamme de puissance d'appareil

La Figure 45 représente les facteurs d'émission par gamme de puissance d'appareils, on note que la majorité des études porte sur la gamme [1 - 20] MW.

1.10.7. Chrome

À l'état naturel, le chrome s'observe en petites quantités dans tous les types de roches et de sols. Il peut être entraîné dans l'atmosphère par mise en suspension de poussières et dans les eaux de surface par ruissellement, altération et érosion des matières. Parmi les diverses formes que peut prendre ce composé, le chrome hexavalent est celui qui présente le plus de risque pour la santé. Il peut entraîner des irritations des muqueuses respiratoires par effets aigus et des atteintes au système respiratoire, voir des cancers pulmonaires, par effets chroniques.

Les références étudiées détaillant les émissions de chrome sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,0004** et **72 mg/GJ** (à l'exception des facteurs d'émission inférieurs aux seuils de détection) :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,0004 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 5,04 % d'humidité dans une chaudière de 150 kW sans système de traitement de fumée à 69 % de son taux de charge nominale à 13 % d'O₂ [27].
- Le plus important (**72 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de sciure et d'écorce de bois à 24 % d'humidité dans une chaudière de 10 MW équipée d'un cyclone fonctionnant à [69 - 82] % de son taux de charge nominale et à 5 % d'O₂ [7] [12].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW et fonctionnant à la biomasse est de 47 mg/GJ.

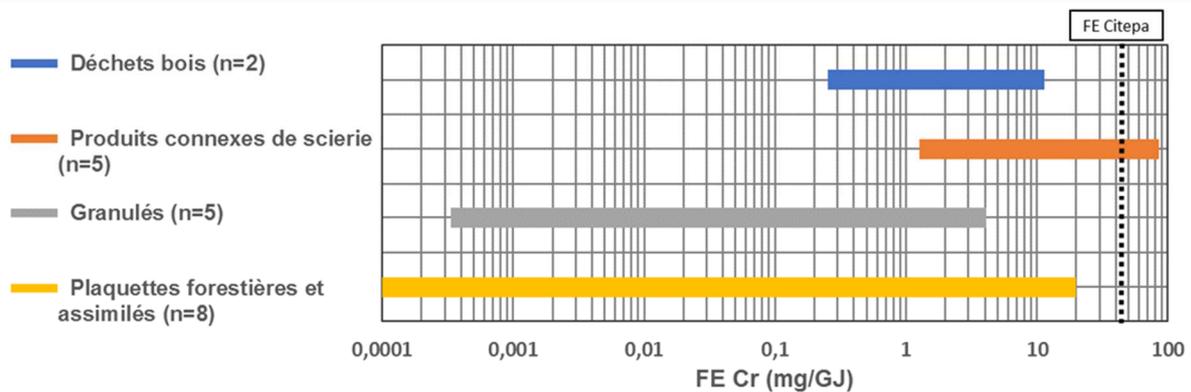


Figure 46 : Gamme des facteurs d'émission de chrome par catégorie de combustible

La *Figure 46* fait apparaître des gammes de moyenne plus élevée pour les catégories « Déchets bois » et « Produits connexes de scierie ». On peut noter que la catégorie « Plaquettes forestières et assimilés » est celle dont la gamme est la plus étendue.

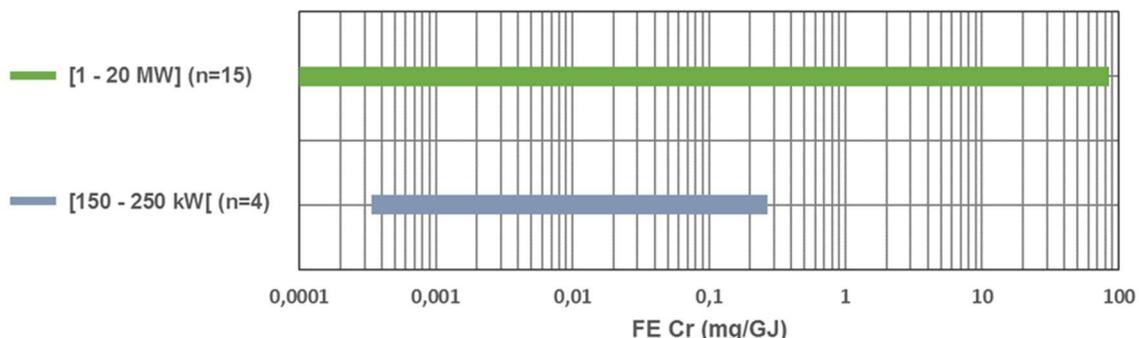


Figure 47 : Gamme des facteurs d'émission de chrome par gamme de puissance d'appareil

Sur les deux figures ci-dessus, les valeurs de facteurs d'émission indiquées comme inférieures au seuil de détection dans la littérature ont été représentées sur l'intervalle [0,0001 - 0,001] mg/GJ. On note que la majorité des études porte sur la gamme [1 - 20] MW.

1.10.8. Vanadium

Dans l'air ou dans l'eau, le vanadium provient essentiellement des émissions volcaniques, de l'érosion des sols et roches ou de sources anthropiques telles que les effluents des usines produisant l'oxyde de titane qui en contiennent beaucoup. La pollution de l'air par la combustion d'hydrocarbures pétroliers en est une autre source. D'après un rapport de l'IFREMER, au début du XXIème siècle, plus de la moitié de tout le vanadium de l'air était d'origine anthropique [50]. Sa toxicité à faible dose pour l'homme semble modérée, mais il peut avoir des effets néfastes à mortels à haute-dose et des effets secondaires reprotoxiques et génotoxiques préoccupants.

Les références étudiées détaillant les émissions de vanadium sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,0039 et 61,6 mg/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,0039 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 5,04 % d'humidité dans une chaudière de 150 kW sans système de traitement de fumée à 50 % de son taux de charge nominale à 13 % d'O₂ [27].
- Le plus important (**61,6 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de produits bois en fin de vie à 35 % d'humidité dans une chaudière de 2,5 MW équipée d'un électrofiltre fonctionnant à 64 % de son taux de charge nominale et à 6 % d'O₂ [15].

Dans le cadre de la réalisation de l'inventaire national des émissions de polluants, le vanadium ne fait pas encore partie des substances à couvrir.

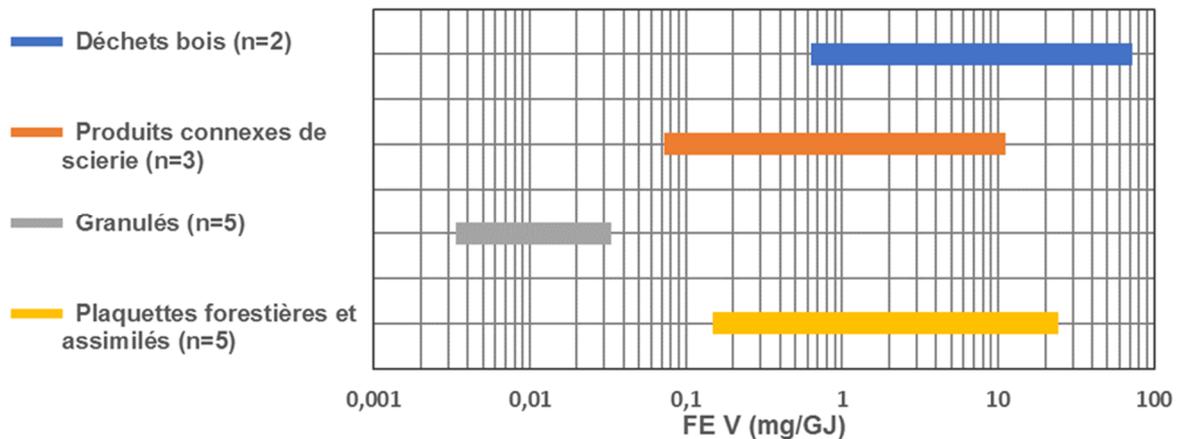


Figure 48 : Gammes des facteurs d'émission de V par catégorie de combustible

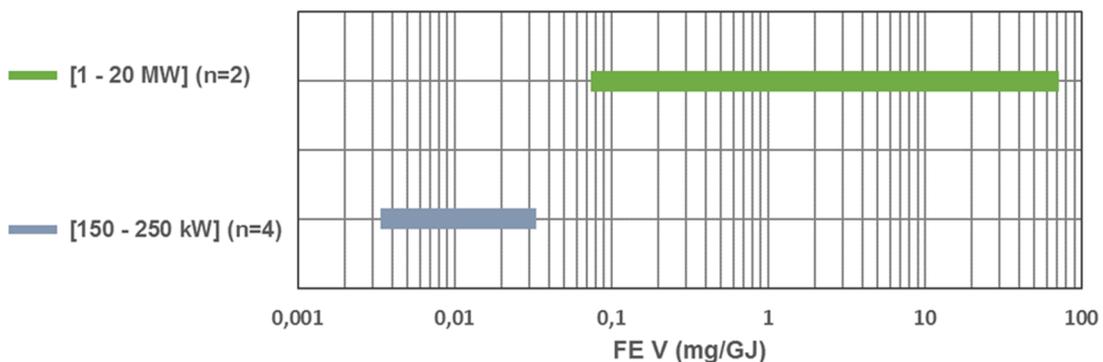


Figure 49 : Gammes des facteurs d'émission de V par gamme de puissance d'appareil

La catégorie de combustibles « Granulés » (Figure 48) et la gamme de puissance [150 - 250] kW (Figure 49) se détachent particulièrement des autres en lien avec les études [3] et [27] qui présentent des résultats moins élevés. Par ailleurs, le nombre réduit de données ne permet pas de généraliser de tendances.

1.10.9. Manganèse

Le manganèse est un élément chimique commun sur Terre (0,1 % de la croûte terrestre). On le trouve dans un grand nombre de roches et de sédiments, dans le sol et l'eau. L'érosion des sols, les embruns marins, les incendies et les émissions de poussières volcaniques constituent les principales sources de contamination du réservoir atmosphérique. Depuis la révolution industrielle, les sources anthropiques se sont multipliées : industrie minière, industrie métallurgique, lessivage des zones industrielles ou des nécromasses (tissus animaux ou végétaux), l'utilisation de combustibles fossiles et plus marginalement la combustion de la biomasse. Cet élément n'étant pas biodégradable ni dégradable aux échelles humaines de temps, on le retrouve en quantité significative dans les eaux usées et les boues d'épuration. À faible dose, le manganèse est un bioélément essentiel pour les enzymes du corps. Mais la toxicité des dérivés du manganèse est évidente à fortes doses. Dès 10 mg par jour, le manganèse est un neurotoxique létal. En effet, absorbé en excès, il cause de graves désordres du métabolisme et du système nerveux, nommés la folie du manganèse, succession de spasmes et d'états de langueur, qui, de manière similaire à la maladie de Parkinson mais avec des psychoses hallucinatoires, conduisent à la paralysie au stade ultime.

Les références étudiées détaillant les émissions de vanadium sont principalement comprises dans la gamme de puissance [1 - 20 MW]. Les facteurs d'émission se situent entre **0,032 mg/GJ** et **103 mg/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (**0,032 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 5,04 % d'humidité dans une chaudière de 150 kW sans système de traitement de fumée fonctionnant à 50,4 % de son taux de charge nominale et à 13 % d'O₂ [27].
- Le plus important (**103 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois à 5,1 % d'humidité dans une chaudière de 500 kW équipée d'un cyclone fonctionnant à [75 - 124] % de son taux de charge nominale [3].

Dans le cadre de la réalisation de l'inventaire national des émissions de polluants, le Citepa ne calcule pas les émissions de manganèse actuellement.

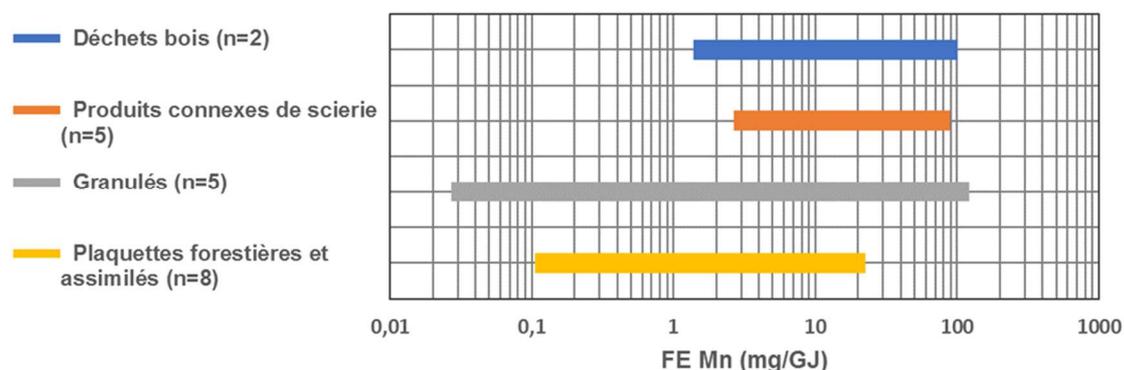


Figure 50 : Gamme des facteurs d'émission de Mn par catégorie de combustible

La catégorie de combustible « Plaquettes forestières et assimilés » est la mieux représentée dans la littérature scientifique et la catégorie « Granulés » est celle qui présente la gamme de résultats la plus étendue. En effet on retrouve dans la catégorie « Granulés » le plus bas des facteurs d'émission observés et le plus élevé (Figure 50).

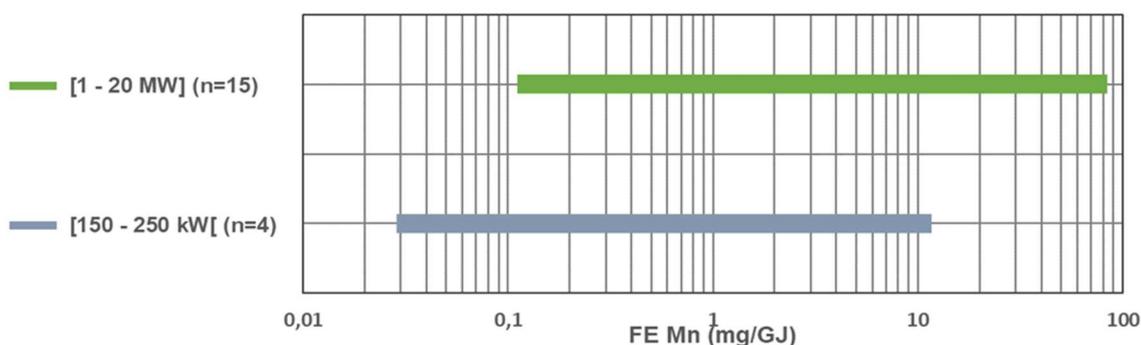


Figure 51 : Gammes des facteurs d'émission de Mn par gamme de puissance d'appareil

La Figure 51 présente les facteurs d'émission par gamme de puissance d'appareils, on note que la majorité des études portent sur la gamme [1 - 20] MW.

1.10.10. Synthèse Métaux Lourds

Peu de données couvrent les émissions des métaux lourds et leur interprétation est donc plus ardue. Certaines études [3] [12] présentent par ailleurs des analyses de ces éléments au sein d'une catégorie de particules fines (PM_{10} ou $PM_{2,5}$) et d'autres comme valeurs totales ce qui complique davantage les comparaisons entre ces données. Le zinc et le manganèse sont les métaux dont les émissions sont les plus importantes et ce dernier ne fait pas partie des métaux lourds couverts à ce jour par les inventaires nationaux d'émissions de polluants.

Les différents types d'essence brûlés et les systèmes de traitement de fumée doivent également avoir un impact important sur le niveau d'émission des métaux lourds mais le manque de données sur la gamme de puissance étudiée dans ce rapport ne permet pas d'observer ces impacts.

1.11. Facteurs d'émission des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques, communément appelés HAP, sont des composés organiques issus de la fusion de cycles benzéniques. Cette famille de polluants est surveillée depuis de nombreuses années du fait de leur présence dans tous les milieux environnementaux et de leur forte toxicité. Ils se rapprochent des polluants organiques persistants (POP) par leurs effets sur la santé, et s'en distinguent car, même s'ils sont assez résistants à la biodégradation, ils sont susceptibles d'être métabolisés, ce qui permet une diminution des concentrations le long de la chaîne trophique. Les HAP sont générés à la suite d'une combustion incomplète de matières fossiles (charbon, fioul, goudron, asphalte, gasoil) ou biomasses (bois, graisses animales, etc.). Une fois absorbés par les organismes, les HAP se prêtent à des réactions et peuvent provoquer ainsi des dysfonctionnements cellulaires.

La mesure des rejets ou concentrations de HAP est assez complexe et plusieurs dispositifs de mesure existent, prenant en compte différentes substances. Ainsi, selon le contexte, les facteurs d'émission des HAP relevés dans la littérature peuvent être exprimés :

- de façon individuelle par HAP ;
- par un ensemble de 4 composés selon le protocole d'Aarhus relatif aux POPs de 1998 et le règlement n°850/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 Avril 2004 (HAP CEE-NU : le benzo(b)fluoranthène, le benzo(k)fluoranthène, le benzo(a)pyrène et l'indéno(1,2,3cd)pyrène) ;
- par un groupe de 8 composés, selon l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux émissions de HAP des installations classées pour la protection de l'environnement (HAP ICPE : les 4 HAP précédemment cités, ainsi que le fluoranthène, le benzo(a)anthracène, le dibenzo(a,h)anthracène et le benzo(g,h,i)pérylène) ;
- selon les 16 HAP prioritaires définis par l'US EPA (8 précédents mentionnés et naphthalène, 2-méthylnaphtylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, pyrène et chrysène) ;
- sous forme d'un total comprenant toutes les substances définies comme des HAP qui ont pu être identifiées.

Certaines études mesurent entre 27 et 30 substances différentes [2] [3] [22]. Cet ensemble des HAP dont le nombre est directement lié aux méthodes de mesures sera par la suite appelé « HAP totaux ».

Le benzo(a)pyrène est réputé pour être l'un des HAP le plus toxique et cancérigène, et est souvent utilisé comme marqueur des HAP. Outre ses propriétés cancérogènes, il peut aussi entraîner une diminution de la réponse du système immunitaire, augmentant ainsi les risques d'infection.

Pour les 4 HAP couverts par le protocole d'Aarhus (CEE-NU), les facteurs d'émission varient de **0,004 mg/GJ** à **20,69 mg/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) est obtenu pour la combustion de résidus forestiers, à taux d'humidité inconnu, dans une chaudière de 1 MW à grille mouvante équipée d'un multicyclone, à 85 % de facteur de charge et 8 % d'O₂ [22].
- Le plus important (**20,69 mg/GJ**) est obtenu pour la combustion de granulés de bois, à taux d'humidité inconnu, dans une chaudière de 0,7 MW à grille mouvante équipée d'un multicyclone, à 54 % de facteur de charge et 8 % d'O₂ [22].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les 4 HAP pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW fonctionnant à la biomasse est de **3,9 mg/GJ** pour les secteurs du chauffage urbain, de l'industrie manufacturière et de l'agriculture, et de **2,3 mg/GJ** pour le secteur tertiaire.

Pour les 8 HAP couverts par la réglementation (ICPE), les facteurs d'émission varient de 0,01 mg/GJ à 85,11 mg/GJ :

- Le plus faible facteur d'émission (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) est obtenu pour deux conditions expérimentales différentes dans la même étude avec une chaudière d'une puissance de 2,5 MW [15] : l'un pour la combustion de produits de bois en fin de vie, à 35,3 % de taux d'humidité, dans une chaudière équipée d'un électrofiltre, opérant à 64 % de facteur de charge ; l'autre, pour la combustion de plaquettes forestières, à 43,1 % de taux d'humidité, dans une chaudière équipée d'un filtre à manches, opérant à 76 % de facteur de charge.
- Le plus important est obtenu pour la combustion de granulés de bois, dans une chaudière de 0,7 MW à grille mouvante équipée d'un multicyclone, à 54 % de facteur de charge et 8 % d'O₂ [22].

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les 8 HAP pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW fonctionnant à la biomasse est de **7,8 mg/GJ** pour les secteurs du chauffage urbain, de l'industrie manufacturière et de l'agriculture, et de **8,0 mg/GJ** pour le secteur tertiaire.

Pour les HAP totaux (dont la nature exacte varie selon les études), les facteurs d'émission varient de **0,7 mg/GJ** à **1 024 mg/GJ** :

- La plus faible valeur de facteur d'émission est obtenue pour la combustion de plaquettes forestières, à un taux de taux d'humidité inconnu, dans une chaudière de 10 MW à grille mouvante, équipée d'un cyclone et d'un ESP, opérant à un facteur de charge inconnu [2].
- Le facteur d'émission le plus important observé est obtenu, comme pour les HAP 4 et 8, pour la combustion de granulés de bois, à taux d'humidité inconnu, dans une chaudière de 0,7 MW à grille mouvante équipée d'un multicyclone, à 54 % de facteur de charge et 8 % d'O₂ [22].

Les HAP totaux ne sont pas considérés par le Citepa pour les inventaires d'émissions de polluants et donc aucune comparaison n'est possible.

L'ensemble des données relatives aux émissions de HAP sont inventoriées dans le tableau ci-dessous.

Combustible	Humidité	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Facteur d'émission (mg/GJ) ¹⁴			Commentaire	Référence
						4 HAP	8 HAP	HAP totaux		
Plaquettes forestières		Cyclone	10 MW (rotating grate)		PRD + ED, Chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse et colonne DB17-MS	< 0,11	< 5,68	13	Les HAP sont déterminés parmi les PM ₁₀ . Seuls les HAP totaux (30 substances) sont exprimés en g/GJ. Certains HAP sont en dessous du seuil de quantification	[2]
		Cyclone et ESP				< 0,03	< 0,30	0,7		
Granulés de bois	4,6 %	2,5 µm in-stack cyclone	150 kW	76 %	Filtres à fibre de quartz et PUF puis chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse	5,87	7,85	19,4	Les HAP totaux couvrent 27 substances	[3]
Plaquettes forestières	26 %			60 %		0,17	0,69	42		
Granulés de bois	5,1 %		500 kW	[75 - 124] %		4,06	17,12	92,8		
Miscanthus dopé à l'hydroxide de calcium (2% massique)		Multicyclone	400 kW (rotation combustion boiler)	100 %	PAS 2000 ; Ansyco GmbH (Déflecteur photoélectrique d'aérosol -> photoionisation des HAPs qui vont émettre des électrons)			14 ± 4	Pas d'information sur quels sont les HAP pris en compte	[5]
								13 ± 4		
								7 ± 2		
								9 ± 3		
Plaquettes forestières	38,7 %	Filtre à manches	8 MW	63 %	Prélèvement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux Collecte des particules sur filtre et collecte de la phase gazeuse sur adsorbant solide et dans un flacon à condensat) Extraction des filtres,				[15]	
Produits bois en fin de vie	32,7 %	Électrofiltre	1,8 MW	107 %						0,96
	35,3 %		2,5 MW	64 %						0,11
Plaquettes forestières	22,8 %	Filtre à manches	6 MW	82 %						0,01
Déchets de bois	38,3 %	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %						0,07
Plaquettes forestières	43,1 %	Filtre à manches	2,5 MW	76 %						0,11
					0,01					

¹⁴ Les valeurs issues de la méthode de conversion présentée en 1.2 sont indiquées en vert.

	41,4 %	Filtre à manches	10 MW	101 %	résines et condensats Extraction solide/liquide et dosage par GC/MS		0,09			
	17,8 %	Électrofiltre	300 kW	68 %			0,10			
	39,9 %	Filtre à manches	21 MW	110 %			0,51			
Copeaux, chutes et sciure de bois		multicyclone	1,5 MW (with moving grates)	53 %	Isokinetic sampling, glass fiber particle filter, XAD-2 sorbent trap on PUF. Gas chromatography - mass spectroscopy (GC - MS - SIR)	0,1	3,1	48,4	Les HAP totaux couvrent 29 substances	[22]
Résidus forestiers		multicyclone	1 MW (with moving grates)	85 %		0,004	0,02	1,18		
Granulés de bois		multicyclone	0,7 MW (with moving grates)	54 %		20,69	85,11	1 024		
Bois d'épicéa non traité		Cyclone	250 kW underfeed stoker		Raw extract and cleaning with neuutral aluminium oxyde GC/MS analysis (SIM mode with external calibration)			[2,4 - 43,4]	Différentes configurations testées - 16 HAP	[16]
Panneaux - durcissant à base de sulfate								[15,4 - 78]		
Panneaux - durcissant à base de sulfate et chlorure								12,0		
Bois d'épicéa partiellement traité (CCB)								64		
Bois naturel, panneaux de particules, palettes, etc.	[5 - 55] %			[0,2 - 8] MW			7,7	224,1	HAP 8 min : 0,0083 mg/GJ HAP 8 max : 53,7 mg/GJ HAP 16 min : 59,4 mg/GJ HAP 16 max : 757 mg/GJ (15 mesures)	[14]

Tableau 18 : Facteurs d'émission des HAP pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La Figure 52 présente la variation des facteurs d'émission par grand type de combustible biomasse avec le nombre de mesures pour chacun d'entre eux. Nous constatons que ce nombre de mesures pour chacune des différentes catégories de biomasse représentées est relativement limité, il est donc difficile de tirer des conclusions sur la variation des facteurs d'émission selon les différents types et qualités de combustibles.

La catégorie de biomasse la plus représentée est le « Plaquettes forestières et assimilés » où la plage de mesures ne représente pas au mieux la réalité des mesures car 75 % des valeurs sont inférieures à 0,2 mg/GJ (dont certaines inférieures aux seuils limites de quantification) et une valeur est bien supérieure (20,69 mg/GJ). La grande variation des différents paramètres tels que la puissance de chaudière, les systèmes de traitement de fumée utilisés, les taux d'humidités des combustibles ou encore les facteurs de charge, ne permet pas de conclure sur les influences des variations des facteurs d'émission.

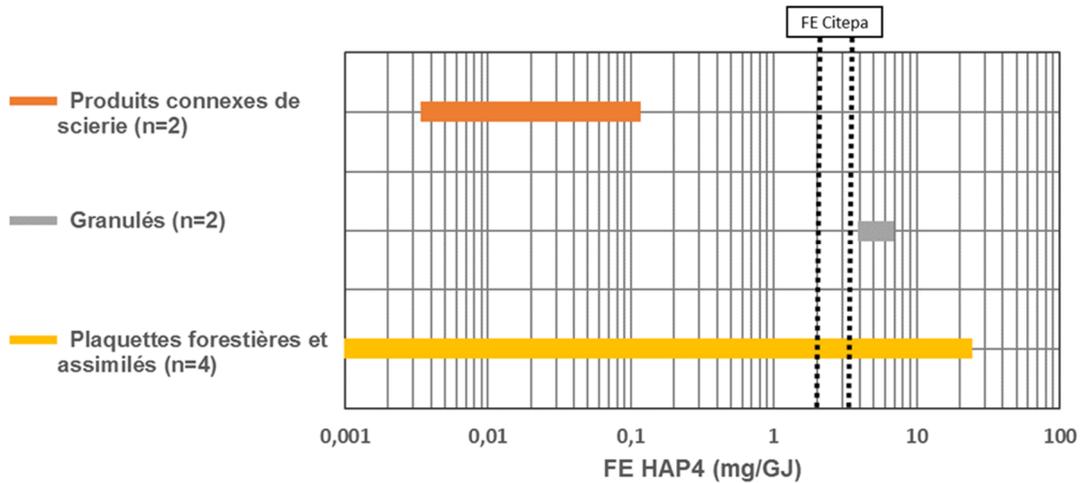


Figure 52 : Gammes des facteurs d'émission des 4 HAP par catégorie de combustible

La Figure 53 ci-dessous présente la variation des facteurs d'émission des HAP CEE-NU selon les catégories de puissance des installations de combustion. Malgré le nombre limité de mesures, une tendance se dessine entre les chaudières de moyenne puissance [1 - 20 MW], bien souvent plus performantes et moins émettrices, et celles de petite puissance [150 kW - 1 MW].

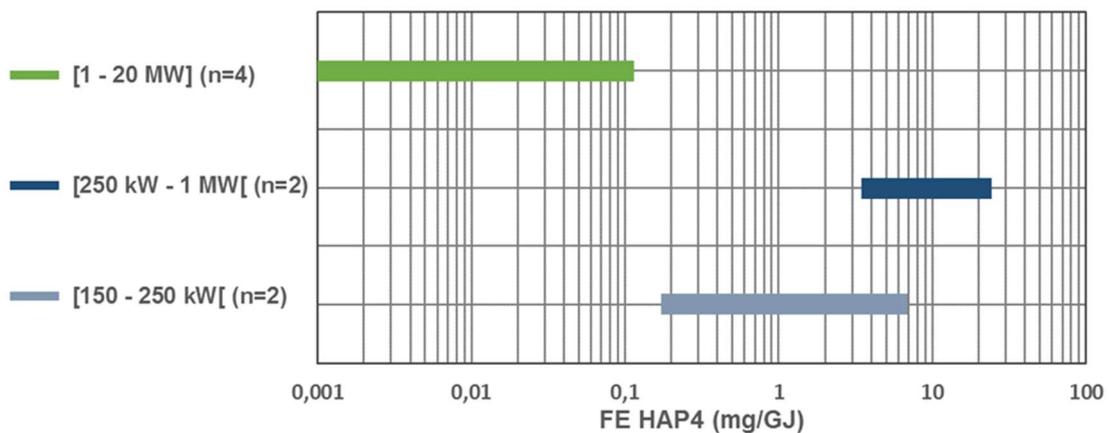


Figure 53 : Gammes des facteurs d'émission des 4 HAP par gamme de puissance d'appareil

La Figure 54 présente la variation des facteurs d'émission par grand type de combustible et, une nouvelle fois, la catégorie de biomasse la plus représentée est le « Plaquettes forestières et assimilés » où la plage de mesures est relativement étendue, représentant les valeurs les plus hautes et basses des facteurs d'émission observés toutes catégories confondues. Cependant, l'étendue des valeurs pour la catégorie « Plaquette forestières et assimilés » n'est pas vraiment représentative des valeurs mesurées. En effet, toutes les mesures hormis une donnent des facteurs d'émission inférieurs à 1 mg/GJ. Globalement, la figure laisse apparaître que les « Déchets bois » et « Produits connexes de scierie » sont légèrement

moins émetteurs que les granulés mais le peu d'échantillons de mesures et la différence des conditions d'opération ne permettent cependant pas de généraliser cette tendance.

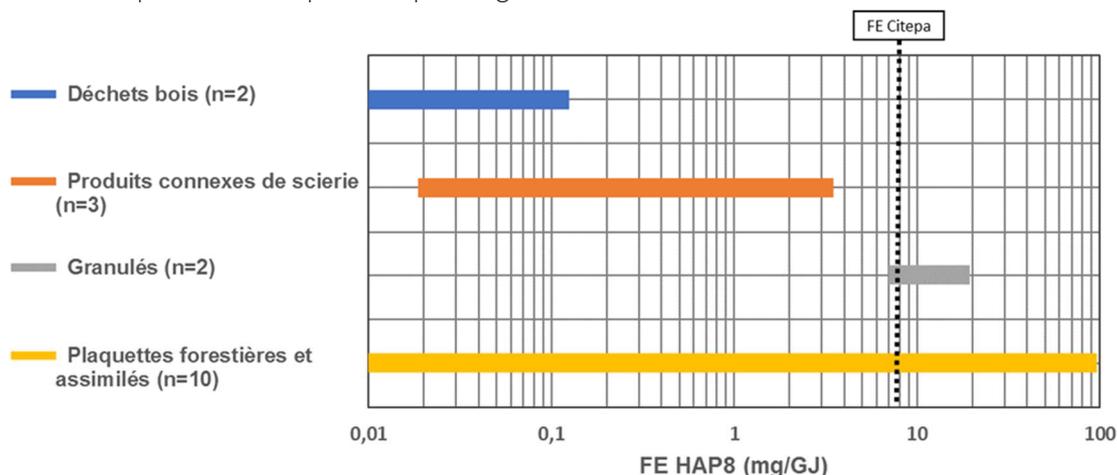


Figure 54 : Gammes des facteurs d'émission des 8 HAP par catégorie de combustible

La figure ci-dessous (

Figure 55) présente la variation des facteurs d'émission des 8 HAP par catégorie de puissance des installations de combustion. De même que pour les facteurs d'émission des 4 HAP, il semble que les chaudières de moyenne puissance [1 - 20 MW] soient plus performantes et/ou mieux équipées, et donc moins émettrices que celles de petite puissance [150 kW - 1 MW]. Le faible nombre de mesures pour les équipements de puissance inférieure à 1 MW ne permet cependant pas de confirmer cette analyse.

La

Figure 56 présente la gamme des facteurs d'émission observée selon les systèmes de traitement de fumée équipés sur les installations de combustion. La tendance générale observée pour les particules (voir chapitre 1.9), à savoir que les filtres à manches et les électrofiltres (ESP) sont plus efficaces que les cyclones et multicyclones seuls, est retrouvée pour les émissions des 8 HAP. Néanmoins, le nombre insuffisant de mesures collectées et l'étendue importante des facteurs d'émission observés avec multicyclone ne permettent pas de pouvoir conclure sur l'efficacité des systèmes de traitement de fumée.

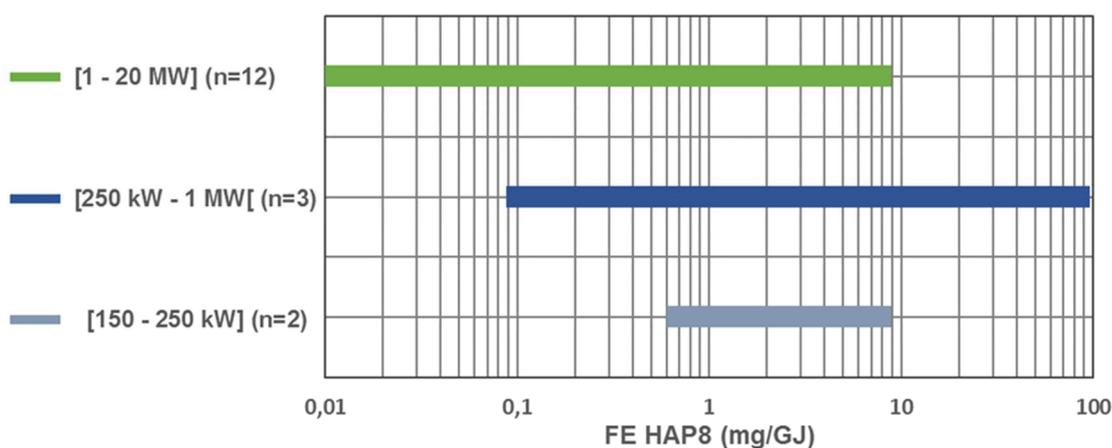


Figure 55 : Gammes des facteurs d'émission des 8 HAP par gamme de puissance d'appareil

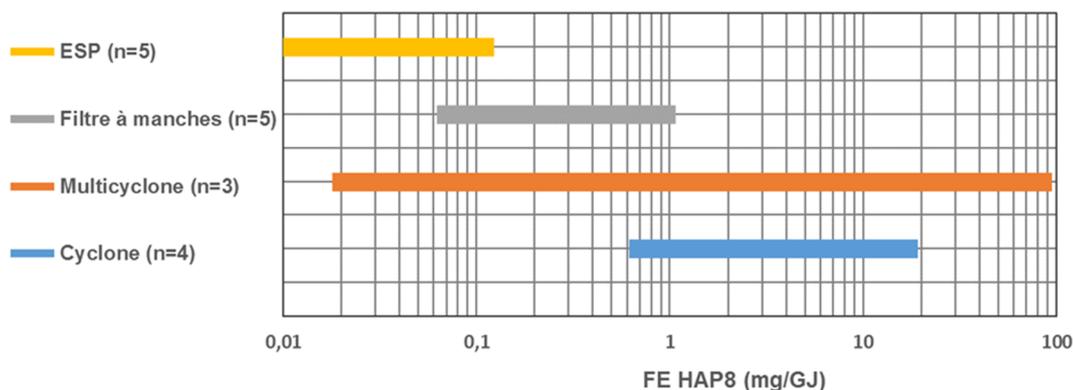


Figure 56 : Gammes des facteurs d'émission des 8 HAP par système de traitement de fumée

Enfin, la figure ci-dessous présente les variations des facteurs d'émission des HAP totaux selon le type de combustible et révèle premièrement que de nombreuses études s'intéressent à la quantification d'un plus grand nombre de substances que seuls les HAP 4 ou 8. De plus, une plus grande variété de types de combustibles est représentée pour les HAP totaux.

La catégorie « Granulés » semble à nouveau plus émettrice que les autres combustibles. La catégorie de combustibles « Sous-produits agricoles », absente des données HAP 4 ou HAP 8 présente des valeurs de facteur d'émission relativement faibles comparativement au reste. Il reste néanmoins difficile d'analyser l'impact des types de combustibles sur les facteurs d'émission. En effet, toutes les catégories de combustibles autres que le « Plaquettes forestières et assimilés » sont représentées par une unique étude ([3] pour « Granulés », [51] pour « Produits connexes de scierie », [5] pour « Sous-produits agricoles » et [16] pour « Déchets bois »).

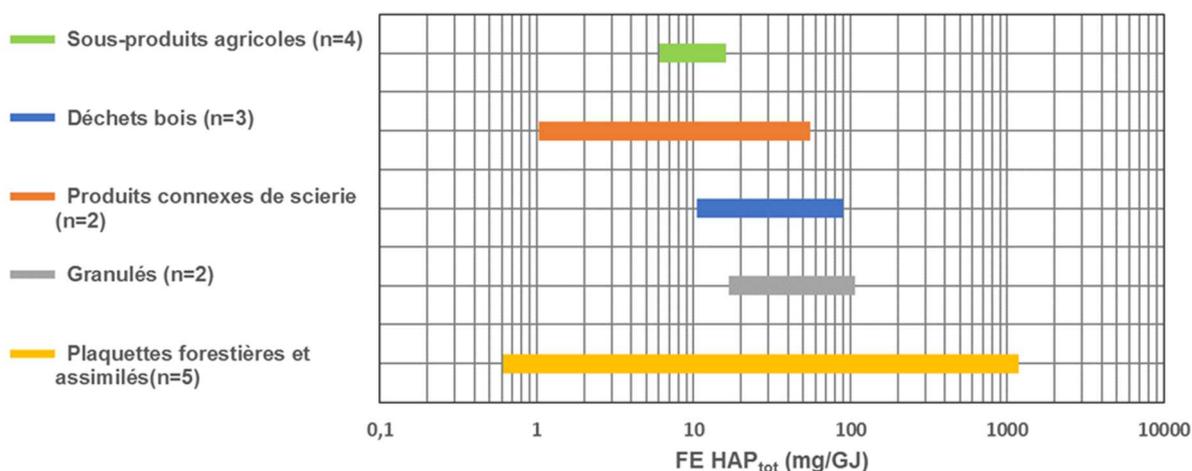


Figure 57 : Gammes des facteurs d'émission des HAP totaux par catégorie de combustible

La Figure 58 présente la variation des facteurs d'émission des HAP totaux par gamme de puissance des chaudières. De façon similaire aux 4 HAP CEE-NU ou aux 8 HAP ICPE, les chaudières de puissance supérieure à 1 MW semblent moins émettrices que celles de petite puissance [150 kW -1 MW]. Le nombre restreint de mesures ne permet cependant pas de généraliser outre mesure.

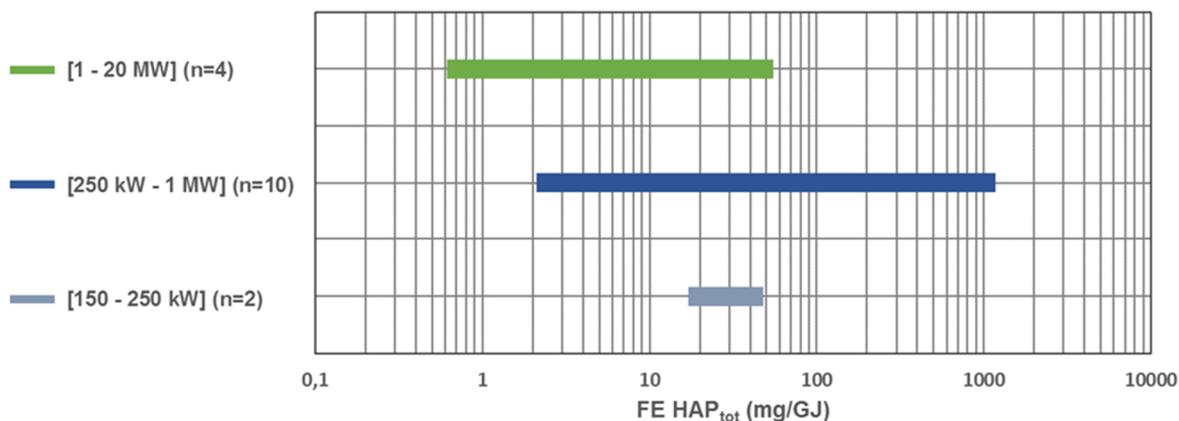


Figure 58 : Gammes des facteurs d'émission des HAP totaux par gamme de puissance d'appareil

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

Les dioxines sont des hydrocarbures aromatiques polycycliques chlorés (HAPC) et les furanes des polychlorodibenzo-furanes : le terme dioxine regroupe au total 75 PCDD et 135 PCDF. Ces substances sont formées de manière involontaire et sont libérées en tant que sous-produits d'activités anthropogéniques où du carbone, de l'oxygène et du chlore sont présents, tels que l'incinération, la combustion de combustibles, le blanchiment du papier au chlore ou la fabrication de pesticides. Pour les furanes, on les trouve émis dans les gaz d'échappement, dans les huiles de moteur, dans le chauffage domestique (bois, charbon, gaz), et dans la combustion des bois traités au pentachlorophenol (PCP), et des boues d'épuration contaminées. Dans une moindre mesure, les PCDD/F peuvent aussi résulter de processus naturels comme les feux de forêts et les volcans.

Parmi cette famille de substances, 17 sont réputées pour être très toxiques et mutagènes. La plus toxique est connue sous le nom de dioxine Seveso (en référence à la catastrophe du même nom). Les concentrations de ces polluants sont souvent exprimées en quantité équivalente toxique (i.e., dans l'unité ng-ITEQ), selon les facteurs d'équivalent toxiques de l'OMS. Les propriétés de ces composés, dont leur toxicité, dépendent du nombre d'atomes de chlore qui les composent. Cette famille de polluants, de par son temps de résidence dans l'atmosphère et le fait qu'ils puissent parcourir de longues distances, fait partie des polluants organiques persistants (POP) [17].

Bien que la combustion de biomasse en général puisse être émettrice de PCDD/F, une attention spécifique est souvent portée aux seuls bois traités comme les panneaux de particules et de fibres, les traverses de chemin de fer ou encore les poteaux téléphoniques/électriques. En effet, ces produits, qui sont parfois utilisés comme intrants pour la production d'électricité, sont très émetteurs car traités avec des composés organochlorés [17]. C'est pourquoi la réglementation européenne a mis en place les meilleures techniques disponibles quant à la préservation du bois et la production de ce type de conservateurs [52] afin d'abaisser les rejets de ces substances. En effet, des lignes directrices sont données afin de limiter la teneur en produits nocifs dans les conservateurs, privilégier ceux à base d'eau, limiter les émissions fugitives lors de la manipulation, limiter les rejets lors de la production via des systèmes d'abattement tels que des laveurs ou oxydateurs thermiques, etc.

L'ensemble des données relatives aux émissions de PCDD/F sont inventoriées dans le tableau ci-dessous et les facteurs d'émission varient de **1 ng/GJ** à **9 770 ng/GJ** :

- Le plus faible facteur d'émission (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) est obtenu pour la combustion de plaquettes forestières, à 43,1 % d'humidité, dans une chaudière de 2,5 MW équipée d'un filtre à manches, à 76 % de facteur de charge et 6 % d'O₂ [15].
- Le facteur d'émission le plus important est obtenu pour la combustion de déchets de bois urbains, à 22% d'humidité, dans un four de 410 kW équipé d'un cyclone, et à 11 % d'O₂ [18].

Par ailleurs le facteur d'émission moyen PCDD/F (hors valeurs inférieures aux limites de quantification) résultant de l'ensemble des études identifiées (48 mesures au total) est de **848 ng/GJ** et le facteur d'émission médian de **61 ng/GJ**.

À titre de comparaison, le facteur d'émission utilisé par le Citepa pour les dioxines et furannes pour des installations de combustion de puissance inférieure à 20 MW fonctionnant à la biomasse est de **40 ng/GJ** pour tous secteurs confondus.

Combustible	Humidité	Teneur en chlore (Cl) (en ppm)	Système de traitement de fumée	Système de combustion	Facteur de charge	Méthode d'échantillonnage et de mesure	Mesure (ng I-TEQ/Nm³)	Facteur d'émission PCDD/F (ng/G)	Référentiel de mesure	Commentaire	Référence
Granulés de bois	4,6 %	39	2,5µm in-stack cyclone	150 kW	76 %	Filtres quartz et PUFs		< 14,5			[3]
Plaquettes de pin				230 kW under stoker firing			[0,303 - 0,498]	[160 - 263]	11 % O ₂		[17] et [18]
Plaquettes forestières				450 kW moving grate firing			0,880	461			
Plaquettes d'écorce				2 MW moving grate firing			0,019	10,2			
Plaquettes d'écorce				16 MW moving grate firing			0,006	3,2			
Plaquettes de pin				9,6 MW wood dust burner			[0,004 - 0,006]	[2 - 3]			
Déchets de bois urbains	22 %	Moyenne : 849 Médiane : 495 Gamme : [20 - 4400]	Aucun	300 kW downdraft gasifier with cyclone burner			[0,12 - 0,15]	[65 - 81]			[17] et [18]
			Cyclone	410 kW pre oven			18,0	9 770			
			SNCR et cyclone sans DeNO _x	450 kW moving grate			1,87	1 015			
			SNCR et cyclone avec DeNO _x				1,57	852			
			Cyclone, Filtre textile Hydroxyde de calcium	850 kW moving grate			2,7	1 466			
			Cyclone, Filtre textile Hydroxyde de calcium/Charbon actif				2,04	1 107			
Cyclone et ESP	1,8 MW moving grate	9,57	5 195		[18]						

			NA	12 MW fluidized bed			0,1	54			
			Cyclone et ESP	17,5 MW circulating fluidized bed			[0,71 - 0,73]	[385 - 396]			[17] et [18]
Plaquettes forestières			Cyclone et ESP, SCR	0,6 MW heating plant			0,039	20	11 % O ₂		[17]
Paille						0,048	25				
Plaquettes forestières			Cyclone et filtre à manche, SCR	1 MW heating plant			0,05	26			
Granulés (<i>triticale</i>)						0,085	26				
Plaquettes forestières			ESP, SCR	11 MW heating plant			0,007	4			
Mélange plaquettes forestières et granulés (<i>triticale</i>)						0,011	3,7				
Plaquettes de pin	28,2 %		Multicyclone	13,8 MW boiler	100 %	Echantillonnage isocinétique et "mixed silica column and an alox column"	0,0783	41,3	11 % O ₂		[17] et [53]
Plaquette forestière			'flue gas cleaning'	6,3 MW district heating			0,003	1,4	10 % O ₂	26 ng I-TEQ/ton fuel	[17] et [54]
Paille						0,003	1,4				
Panneaux						0,003	1,4				
Paille			Aucun	300 kW boiler	60 %		1,2	572			
					100 %		0,5	239			
Déchets de bois urbains	[10 - 25] %		Cyclone	410 kW pre oven grate firing			14,42	7 875	11 % O ₂	173,3 ng I-TEQ/kg fuel	[17] et [55]
			Cyclone et filtre	850 kW grate firing			2,70	1 848	13 % O ₂	26,0 ng I-TEQ/kg fuel	

			Cyclone et ESP	1,8 MW grate firing		30°C) - Extraction with toluene and two-step column chromatography (alumina) and mixed column with silica. High resolution gas chromatography coupled with electron impact high resolution mass spectrometry	9,57	6 549		92,0 ng I-TEQ/kg fuel	
Bois d'épicéa non traité			Cyclone	250 kW underfeed stoker		Isokinetic sample, XAD-2 extracted with toluene and GC/MS analysis (SIM mode)	[0,224 - 0,543]	[143 - 359]	13 % O ₂	Différentes configurations testées	[16]
Panneaux - durcissant à base de sulfate							[0,094 - 0,631]	[63 - 421]			
Panneaux - durcissant à base de sulfate et chlorure							1,48	986			
Bois d'épicéa partiellement traité (CCB)							0,107	70,7			
Plaquettes forestières	38,7 %	2539	Filtre à manches	8 MW	63 %	Prélèvement d'un échantillon représentatif de l'effluent gazeux, collecte des particules sur filtre et collecte de la phase gazeuse sur adsorbant solide et dans un flacon à condensat Extraction des filtres, résines et condensats Concentration, purification et dosage par HRGC/HRMS	0,110	59,7	6 % O ₂		[15]
Produits bois en fin de vie	32,7 %	289	Électrofiltre	1,8 MW	107 %		0,003	1,3			
	35,3 %	977		2,5 MW	64 %		0,016	4,8			
Plaquettes forestières	22,8 %	287	Filtre à manches	6 MW	82 %		0,014	5,0			
Déchets de bois	38,3 %	233	Électrofiltre	7,2 MW lit fluidisé	55 %		0,082	31,6			
Plaquettes forestières	43,1 %	345	Filtre à manches	2,5 MW	76 %		0,003	1,0			
	41,4 %	240		10 MW	101 %		0,011	4,0			
	17,8 %	262	Électrofiltre	300 kW	68 %		0,010	3,5			
	39,9 %	2363	Filtre à manches	21 MW	110 %		0,031	11,6			

Tableau 19 : Facteurs d'émission des PCDD/F pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion

La Figure 59 présente les variations des facteurs d'émission des PCDD/F selon le type de combustible, elle révèle que de nombreuses études s'intéressent aux rejets de la combustion de « Bois déchets » et de « Plaquettes forestières et assimilés ». Ceci semble cohérent avec l'intérêt évoqué précédemment pour les bois traités, qui sont inclus dans la catégorie « Déchets bois » dans cette figure. De plus, les mesures relevées pour les bois usagés révèlent bien le fort potentiel émetteur de ce type de combustibles, qui présentent néanmoins parfois des valeurs de facteur d'émission relativement faibles. Pour une meilleure analyse, des informations supplémentaires sur le type de bois usagé telle que leur teneur en chlore (Cl) seraient nécessaires. En effet, les émissions de dioxines sont connues pour être plus importantes en cas de forte teneur en chlore, composé présent aussi dans les bois non traités, mais également d'autres paramètres tels que la présence de phénol et lignine [17]. Un nombre insuffisant de teneurs en chlore a été collecté pour pouvoir conclure sur l'influence de ce facteur sur les émissions de dioxines. Les fortes valeurs extrêmes de facteur d'émission observées pour les « Sous-produits agricoles » et les « Plaquettes forestières et assimilés » sont le résultat de la combustion de paille et plaquettes forestières respectivement, dans des chaudières de faible puissance (< 500 kW) non équipées de systèmes de traitement de fumée.

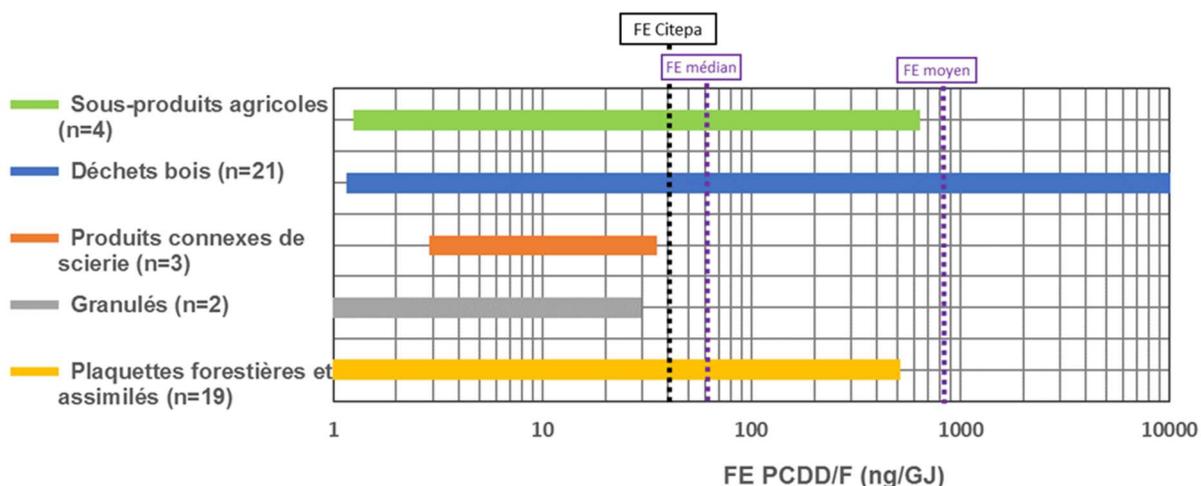


Figure 59 : Gammes des facteurs d'émission des PCDD/F par catégorie de combustibles

La Figure 59 présente l'étendue des facteurs d'émission des PCDD/F mesurés selon la gamme de puissance des équipements. Il peut notamment être observé que les installations de combustion de moyenne puissance [1 – 20 MW] semblent plus performantes et/ou mieux équipées que celles de faible puissance [250 kW - 1 MW], à nombre de mesures similaire. Cependant, la qualité du combustible semble être le facteur prédominant sur les émissions de PCDD/F et ce graphique ne suffit donc pas pour comparer les différentes caractéristiques d'équipements de façon précise.

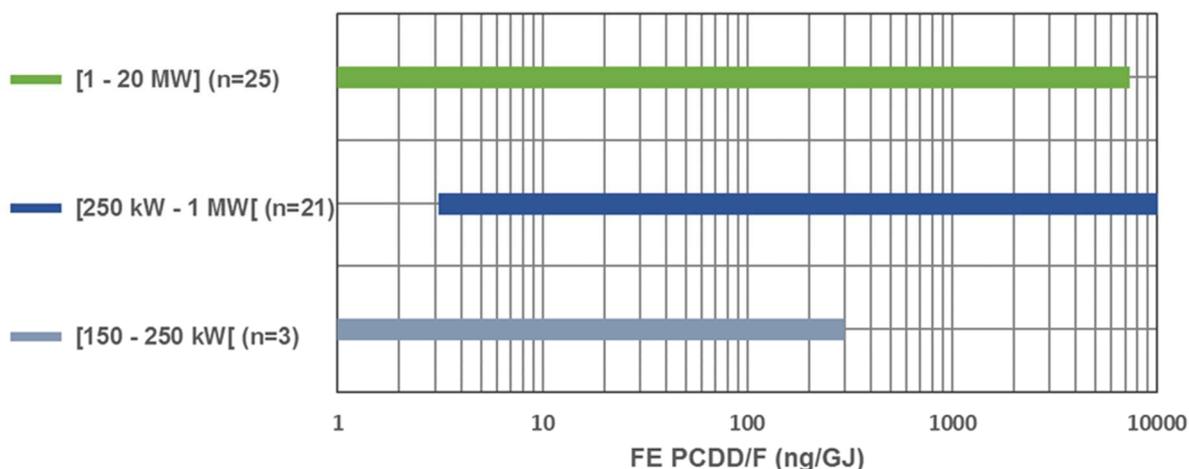


Figure 60 : Gammes des facteurs d'émission des PCDD/F par gamme de puissance d'appareil

La conclusion de cet état de l'art est présentée dans le rapport principal.

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

2.1. Méthodologie d'inventaire d'émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques pour la combustion de combustibles

Pour estimer les émissions, les lignes directrices du GIEC (Groupes d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) pour les gaz à effet de serre (GES) [37], et d'EMEP/EEA (European Environmental Agency) pour les polluants atmosphériques (PA) [34] préconisent des méthodologies recommandées au niveau international pour l'aide à la réalisation d'inventaires, selon différents degrés de précision et d'information disponibles. Ces différents niveaux de méthodologie sont appelés « Tier » et se classent de 1 à 3 selon un niveau de complexité croissante de la méthodologie.

De manière générale, peu importe le Tier et le secteur considéré, les émissions d'une activité donnée sont exprimées de la façon suivante :

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times FE_{s,a} \quad (1)$$

avec :

- - E : émission relative à la substance "s" et à l'activité "a", pendant le temps "t"
- - A : quantité d'activité relative à l'activité "a" pendant le temps "t"
- - FE : facteur d'émission relatif à la substance "s" et à l'activité "a".

Les termes $A_{a,t}$ et $FE_{s,a}$ dans l'équation (1) peuvent être déterminés pour différents degrés de détails (i.e., les Tier), selon différents paramètres influant sur les facteurs d'émission comme par exemple un type d'opération, une technologie ou un produit spécifique. Par exemple, pour la combustion de manière générale, une liste non exhaustive des paramètres pouvant influencer les émissions pour une quantité donnée d'énergie pourrait être la suivante :

- le type de combustible (charbon, fioul lourd, diesel, gaz naturel, bois, etc.) ;
- les caractéristiques du combustible (pouvoir calorifique, humidité, teneurs en carbone, soufre, etc.) ;
- le type d'équipement (chaudières, turbines, moteurs, fours, poêles, etc.) ;
- les caractéristiques de l'équipement comme la puissance et le type de technologie utilisée ;
- les conditions d'opération (facteur de charge, excès et concentration en oxygène, avec ou sans phases d'arrêt et/ou de démarrage, etc.) ;
- la présence ou non de techniques d'abattement (filtres à manches, cyclones, ESP, SCR/SNCR, de-NOx, laveurs, etc.).

En réalité, il est difficile, faute de données assez détaillées, d'arriver à modéliser toutes ces influences sur les rejets de la combustion. Des estimations sont donc faites par ensemble et des hypothèses sont prises, aussi bien pour les technologies que pour les combustibles.

De plus, tous ces paramètres n'affectent pas de façon semblable les émissions selon la substance considérée. En effet, pour les émissions de CO₂ ou de SO₂ par exemple, les teneurs en carbone ou en soufre suffisent respectivement à évaluer les émissions via bilan matière, dans le cas où aucune technique particulière d'abattement n'est utilisée.

2.1.1. Méthodologie Tier 1

Pour les GES comme pour les polluants atmosphériques (PA), la méthodologie Tier 1 consiste à appliquer directement l'équation (1) avec comme activité, la consommation de combustible (en GJ par exemple) et le facteur d'émission par défaut proposé dans les lignes directrices, selon le combustible considéré.

Pour les GES, les facteurs d'émission par défaut sont proposés par type de combustible relativement détaillé, alors que dans le guidebook EMEP/EEA (pour les PA), le Tier 1 donne des valeurs par défaut par catégorie générique comme combustibles solides (tout de type charbon), liquides (fiouls lourd et domestique, diesel, kérosène, etc.), gazeux (gaz naturel, GNL, GPL, gaz sidérurgiques) et biomasse (tout type confondu).

2.1.2. Méthodologie Tier 2

Pour la méthodologie de Tier 2, l'estimation des émissions de PA et GES se fait de la même façon que dans l'équation (1), avec un niveau de détails supplémentaire :

- Pour les GES, les facteurs d'émission ne sont plus pris par défaut mais sont désormais spécifiques au pays, permettant de réduire l'incertitude comparativement à la valeur par défaut du Tier 1. Pour le CO₂, nous rappelons que connaître la teneur en carbone des combustibles permet d'estimer un facteur d'émission spécifique. Pour le CH₄ et le N₂O, il est plus difficile d'estimer des facteurs d'émission par combustible parce qu'ils peuvent varier selon la technologie utilisée, la nature des combustibles et les conditions opératoires de la combustion.
- Pour les PA, la différenciation se fait au niveau de la technologie employée pour la combustion. La répartition des FE Tier 2 de la combustion se fait sur la gamme de puissance de l'installation et le type d'équipement (chaudières, turbines ou moteurs pour les combustibles liquides et gazeux ; fours, poêles, chaudières et autres pour les combustibles solides). En effet ceci est nécessaire car, pour les installations de combustion, de nombreuses réglementations européennes et françaises s'appliquent (e.g., directives LCP et MCP pour « large » et « medium combustion plants » pour respectivement des puissances supérieures et inférieures à 50 MW) et imposent des valeurs limites d'émission (VLE) par type de combustible utilisé et gamme de puissances, qui doivent donc être prises en compte afin d'être le plus précis dans l'estimation des émissions. Or, selon le guide EMEP, les facteurs d'émission proposés pour les différentes technologies n'incluent pas de système de traitement des fumées, même pour les installations d'une puissance supérieure à 1 MW normalement compris par la directive MCP. Cependant, ceci ne signifie pas, a priori, que toute mesure avec système de dépollution ait été exclue de la gamme de valeurs retenue pour estimer le facteur d'émission moyen.
- De plus, comme pour les GES, l'utilisation de facteurs d'émission spécifiques aux caractéristiques des combustibles du pays est recommandée, notamment pour le SO₂. Le niveau de détail disponible pour les valeurs de facteur d'émission par type de technologie pour la combustion de combustible dans les secteurs résidentiel, tertiaire et agricole (i.e., équipements de puissance < 50 MW, le chauffage urbain étant inclus avec la production d'électricité) est présenté dans le Tableau 20 : Différentes catégories d'installations de combustion d'EMEP pour lesquelles des facteurs d'émission sont proposés :

Ainsi, des estimations plus justes peuvent être faites en utilisant des facteurs d'émission spécifiques aux caractéristiques des combustibles pour les GES, et surtout en désagrégeant les émissions de PA par type d'équipement employé. Cependant, ceci requiert également de répartir la consommation entre les différentes catégories de puissance et d'installation, ce qui peut parfois s'avérer complexe en pratique.

Fuel	Sector*	Technology name	
Solid fuels (excluding biomass)	Small size (<50 kWth)	Open fireplaces	
Gaseous fuels		Partly closed/closed fireplaces	
Solid fuels (excluding biomass)		Conventional stoves	
Solid fuels (excluding biomass)		Conventional boilers <50kW	
Gaseous fuels		Conventional boilers < 50 kW	
Gas oil		Conventional stoves	
Gas oil		Conventional boilers < 50 kW	
Coal		Advanced stoves	
Coal		Standard boilers >50KWth <1MWth	
Coal	Standard boilers >1MWth <50MWth		
Coal	Boilers <1MWth – manual feed technology		
Coal	Boilers <1MWth – automatic feed technology		
Fuel oil	Medium size (50 kWth – 50 MWth)	Standard boilers >50KWth <1MWth	
Fuel oil		Standard boilers >1MWth <50MWth	
Gaseous gas		Standard boilers >50KWth <1MWth	
Gaseous fuel		Standard boilers >1MWth <50MWth	
Gaseous fuel		Gas turbines	
Gas oil		Gas turbines	
Gaseous fuel		Stationary reciprocating engines	
Gas oil		Stationary reciprocating engines	
Biomass		Small size (<50 kWth)	Open fireplaces
			Conventional stoves
	High-efficiency stoves		
	Advanced/ecolabelled stoves and boilers		
	Conventional boilers		
	Medium size (50 kWth – 50 MWth)	Pellet stoves and boilers	
		Boilers > 1 MW	
		Boilers < 1 MW	
		Manual boilers < 1 MW	
		Automatic boilers < 1 MW	

* : lorsque les installations de combustion sont de petite taille (< 50 kWth), l'application est considérée pour le secteur résidentiel alors que ceux de « medium size » sont destinés pour les secteurs tertiaire et agricole

Tableau 20 : Différentes catégories d'installations de combustion d'EMEP pour lesquelles des facteurs d'émission sont proposés

2.1.3. Méthodologie Tier 3

Enfin, pour les GES, la méthodologie Tier 3 des lignes directrices du GIEC s'assimile au Tier 2 d'EMEP/EEA, c'est-à-dire qu'une différenciation est faite selon le type de technologie utilisée, pour les émissions de CH₄ et N₂O.

En effet, les émissions de CO₂ ne dépendent que du contenu en carbone du combustible et donc un facteur d'émission spécifique au pays est un degré de précision supplémentaire de la méthodologie. Au-delà, et pour certains secteurs seulement (production d'électricité), il est possible de connaître les consommations et les émissions site par site.

Par exemple, pour la combustion de biomasse dans le secteur résidentiel, un détail est donné pour les poêles (conventionnel, catalytique ou non-catalytique), les cheminées ouvertes, les fosses (« pits » en anglais), et pour les poêles à charbon, à déchets agricoles ou à fumier (« dung stoves » en anglais). Cependant, pour la combustion de biomasse dans le tertiaire, aucune distinction selon le type d'installation est faite et donc des uniques valeurs par défaut de FE CH₄ et N₂O sont données.

Pour les polluants atmosphériques, l'expression des émissions selon les lignes directrices d'EMEP/EEA se complexifie et un niveau de détail assez élevé est demandé. Pour d'autres secteurs, des données sont

souvent récoltées par exploitation et par activité suite à des mesures effectuées, qui permettent de définir des facteurs d'émission spécifiques à chaque installation existante (et donc également au pays). C'est ce qu'on appelle une méthodologie « bottom-up », où des émissions et activités rapportées par les exploitants sont directement utilisées, permettant d'obtenir la meilleure précision possible. Il n'est pas rare qu'une méthode mixte, avec des données bottom-up et une approche plus classique avec des facteurs d'émission par défaut appliqué au solde d'activité, soit utilisée lorsque tous les sites connus ne représentent pas 100 % de l'activité. C'est le cas par exemple de la combustion où seules les installations d'une puissance supérieure à 20 MW (base GERE pour les installations soumises à enregistrement ou autorisation) ont obligation de rapporter certaines données d'émissions et d'autres informations comme la consommation de combustibles et certaines caractéristiques, la puissance de l'installation, le nombre d'heures de fonctionnement, etc. De ce fait, pour les secteurs résidentiel et tertiaire, la méthodologie Tier 3 est quelque peu différente comme il n'est pas possible de récolter des données bottom-up. L'estimation des émissions se fait toujours sous la forme de l'expression (1) avec cette fois une distinction, en plus de celle faite en Tier 2 sur le type d'équipement et la puissance, sur les performances technologiques de l'appareil (e.g., ancien, récent, très performant, etc.) qui prennent en compte le rendement énergétique ainsi que les caractéristiques de combustion de l'appareil, mais aussi son âge, et les différentes normes imposées à certains appareils (par exemple, labels Flamme verte pour les poêles) avec les éventuels systèmes de dépollution installés. La complexité de cette méthodologie réside dans la distribution des consommations de combustible selon tous ces critères et il faut donc construire ce qu'on appelle communément un parc d'équipements le plus détaillé possible.

2.2. Pertinence d'évolutions des facteurs d'émission

Dans le cadre de la réalisation des inventaires d'émissions, le Citepa publie chaque année un guide méthodologique décrivant de manière détaillée le système d'inventaire national et des méthodes utilisées (OMINEA). Certaines émissions de sources dites « fixes » sont déclarées auprès du Ministère en charge des installations classées en France conformément à l'arrêté GERE ("Arrêté du 31 janvier 2008 relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions et de transferts de polluants et des déchets"). Comme expliqué dans le paragraphe sur les méthodologies des guides, ces données sont utilisées directement en tant que données d'émissions site par site selon une méthodologie appelée « bottom-up ».

En revanche, pour les activités ayant un caractère surfacique, telles que les installations de combustion de biomasse de 0 à 20 MW, l'emploi de facteurs d'émission est nécessaire. Jusqu'à présent les petites installations de puissance inférieures à 1 MW ne sont pas distinguées de celles de la gamme de puissance supérieure ([1 – 20 MW]).

Pour ces activités, les travaux d'inventaires nationaux s'appuient sur des guides développés au niveau international pour l'aide à la réalisation des inventaires (notamment sur le Guide EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 [34]) mais de nombreuses autres sources sont également utilisées.

Notamment, pour la combustion de biomasse, une étude réalisée en 2003 par le Citepa [14] a permis de déterminer un grand nombre de facteurs d'émission pour ce type d'installations résidentielles, tertiaires et industrielles. Pour les polluants non couverts par cette étude, les facteurs d'émission du Guidebook EMEP/EEA 2016 sont utilisés.

Les études compilées par le Citepa en 2003, donnaient des concentrations de polluants mesurées dans des installations de 0,2 à 8 MW. L'unité d'activité utilisée est la consommation de combustible (énergie entrante), exprimée en unité énergétique (GJ). En effet, un inventaire s'appuie sur des statistiques de consommation qui sont exprimés dans ces unités et doit être cohérent avec le bilan énergétique national. L'utilisation de données volumiques (avec le stère notamment) ou massiques pour la biomasse n'est pas toujours adaptée, celles-ci pouvant présenter des PCI très variés et donc retransmettre des quantités d'énergie différentes. Afin de convertir les concentrations en polluant en sortie de cheminée (en masse de polluant par volume de fumée sortant de la cheminée) en facteurs d'émission en masse de polluant par quantité d'énergie (GJ), la connaissance du débit d'air et de la consommation de combustibles est nécessaire. Cependant, l'inventaire des émissions couvrant les années 1990 à aujourd'hui, les facteurs d'émission doivent être déterminés pour couvrir l'ensemble de la période et prendre en compte l'évolution réglementaire, l'évolution technologique et d'autres facteurs pertinents. Or, certains des facteurs d'émission déduits de cette étude de 2003 ne semblent plus être adaptés aux installations plus récentes et à l'évolution qu'a connu le parc ces dernières années.

Dans ce contexte, des travaux ont été réalisés en 2018 et 2019 avec l'ADEME, le CIBE, la FEDENE et le Citepa pour proposer de nouvelles valeurs de facteurs d'émission basées sur une collecte de rapports d'émissions des installations du Fonds Chaleur pour des puissances installées entre 1 et 20 MW.

Dans le cadre du projet ACIBIOQA, les campagnes de mesure qui vont être réalisées pourront peut-être permettre d'élargir la révision des facteurs d'émission des polluants et d'affiner la méthodologie retenue, notamment concernant les hypothèses retenues sur l'intégration des phases de démarrage et d'arrêt des installations.

La détermination de ces facteurs d'émissions actualisés nécessitera la collecte d'un certain nombre de paramètres dont les mesures de concentrations dans les cheminées et les débits associés, ainsi que d'autres paramètres opératoires pouvant influencer les rejets d'émissions. Ils pourront donc permettre de réévaluer les émissions actuelles et antérieures.

Comme vu dans la partie précédente, la prise en compte de facteurs d'émission discriminés selon plusieurs paramètres demande à ce que les niveaux d'activité le soient aussi de façon similaire (consommation de combustibles dans les gammes de puissance : par exemple, consommations dans les installations de puissance inférieure à 1 MW, de 1 à 2 MW, de 2 à 5 MW, de 5 à 10 MW et de 10 à 20 MW), puisque la réglementation peut être plus ou moins contraignante selon les gammes de puissance et les technologies différentes mises en œuvre.

2.3. Méthodologie employée par le Citepa pour la réalisation d'inventaires d'émissions de la combustion de biomasse dans les installations de puissance comprise entre 0 et 20 MW en France (hors chauffage domestique)

Hormis le secteur résidentiel (chauffage domestique au bois), les secteurs concernés par de la combustion de bois en France sont les suivants : chauffage urbain, industrie manufacturière, combustion en agriculture/sylviculture et tertiaire.

Le Tableau 21 présente les consommations de bois depuis 1990 actuellement allouées aux différents secteurs (hors résidentiel et fours de l'industrie). Ces données sont issues de l'inventaire national édition 2020, les combustibles retenus pour l'analyse sont le bois (NAPFUE 111), les déchets de bois (NAPFUE 116) et les déchets agricoles (NAPFUE 117).

Les consommations de biomasse du chauffage urbain proviennent des enquêtes de la SNCU (Syndicat National du Chauffage Urbain). Celles des autres secteurs proviennent du bilan national de l'énergie réalisé par le SDES (Service des Données et des Etudes Statistiques du MTES).

De plus, l'intégration de facteurs d'émission différenciés pour les catégories de chaudières de [0 - 20] MW et [20 - 50] MW nécessite également de répartir les consommations par catégorie de puissance. Le Tableau 6 ci-dessous présente la distribution des consommations de bois entre ces différentes catégories pour les divers secteurs considérés. Un travail de désagrégation des catégories de puissance avec davantage de niveaux nécessiterait donc, pour être intégré correctement dans les inventaires nationaux, d'en connaître les consommations précises pour ces secteurs, idéalement sur l'ensemble de la période allant de 1990 jusqu'à l'année en cours.

À défaut de données robustes idéales, certaines hypothèses simplificatrices pourraient être réalisées pour les années pour lesquelles les informations de répartition des consommations ne sont pas disponibles. En ce qui concerne les émissions, une synthèse de l'ADEME sur les rapports d'émissions des chaudières biomasse [57] du Fonds Chaleur indique par catégorie des FE pour les TSP, NO_x et SO₂ en différenciant les catégories [2 - 5] et [5 - 20] MW.

Pour le secteur agriculture/sylviculture, l'hypothèse est faite que toutes les installations sont inférieures à 20 MW.

Unité GJ

SNAP	010201	010202	010203	010203	020103	020302	030101	030102	030103
Secteur	Chauffage urbain/réseaux de chaleur (enquête SNCU)				Tertiaire	Combustion en agriculture / Sylviculture	Industrie manufacturière		
Puissance installation	> 300 MW	50-300 MW	20-50 MW	0-20 MW	0-50 MW	0-50 MW	> 300 MW	50-300 MW	0-50 MW
1990	-	-	97 551	88 134	4 026 160	1 674 720	833 345	9 950 537	3 803 983
1991	-	-	127 025	114 763	4 209 882	1 814 005	833 345	9 950 537	4 367 790
1992	-	-	197 961	178 851	4 393 605	1 953 291	833 345	10 465 450	2 735 655
1993	-	-	175 965	158 979	4 577 328	2 092 576	718 925	8 158 011	14 743 819
1994	-	-	197 961	178 851	4 761 050	2 231 861	771 448	6 191 310	15 181 028
1995	-	37 551	332 203	300 134	4 944 773	2 371 147	119 896	6 835 717	16 776 778
1996	-	86 839	279 341	252 375	5 128 496	2 510 432	567 161	7 507 372	15 090 576
1997	-	103 496	187 580	169 472	5 312 218	2 649 717	654 730	7 823 533	19 293 080
1998	-	103 143	123 874	111 916	5 495 941	2 789 003	570 320	7 645 618	15 301 860
1999	-	197 519	166 523	150 448	5 679 664	2 928 288	809 946	7 135 681	13 639 659
2000	-	201 770	191 269	172 806	5 863 387	3 067 573	418 097	6 433 246	14 607 682
2001	-	176 477	188 875	170 642	6 047 109	3 206 859	418 097	8 170 485	10 429 472
2002	-	353 945	429 931	388 428	6 230 832	3 346 144	385 119	8 072 986	9 520 828
2003	-	490 654	572 620	517 343	6 414 555	3 485 429	358 920	11 534 341	5 401 481
2004	-	455 346	510 883	461 566	6 598 277	3 624 715	-	9 594 553	9 173 063
2005	-	801 657	320 361	289 436	6 782 000	3 764 000	-	10 727 426	32 819 642
2006	-	723 599	361 814	1 068 743	4 228 000	4 006 000	-	12 477 009	15 057 415
2007	-	744 667	376 568	1 157 975	5 900 000	4 263 000	-	13 478 690	33 381 239
2008	-	1 962 718	672 502	245 299	5 645 000	4 538 000	-	14 324 181	34 860 144
2009	-	1 647 074	1 945 228	973 320	6 570 000	4 829 000	-	10 276 303	43 991 949
2010	-	2 182 445	2 311 026	1 503 992	5 605 000	5 140 000	-	10 210 716	61 231 106
2011	-	2 097 577	1 749 886	2 878 547	5 400 104	5 470 000	-	13 026 135	29 873 439
2012	-	3 088 265	3 394 224	2 072 650	6 848 838	5 508 644	-	13 205 672	32 761 759
2013	-	5 986 063	1 913 839	6 448 680	9 793 947	5 570 546	-	13 648 419	41 644 710
2014	-	5 820 127	2 942 505	8 331 140	10 785 401	5 648 869	-	14 164 250	35 817 731
2015	-	6 722 165	2 613 978	13 063 600	11 014 770	5 746 567	-	15 059 337	44 891 027
2016	2 671 157	5 555 091	3 344 438	16 016 720	10 959 666	5 792 308	1 187 078	19 072 780	50 189 087
2017	2 590 103	6 630 169	3 719 809	16 416 149	11 239 777	5 823 393	1 175 033	18 496 728	45 003 046
2018	2 549 227	6 521 707	3 912 951	16 557 482	11 344 547	5 941 518	1 125 593	19 652 779	50 421 155

Tableau 21 : Données de consommations de bois entre 1990 et 2018 dans l'inventaire d'émissions français (édition 2020), pour les secteurs du chauffage urbain, de l'industrie manufacturière, du tertiaire et de l'agriculture/sylviculture.

Secteur	Chauffage urbain/réseaux de chaleur % à appliquer sur total bois secteur (enquête SNCU)			Tertiaire % à appliquer sur total bois secteur 0-50 MW (bilan énergie SDES)		Industrie manufacturière % à appliquer sur total bois secteur 0-50 MW (bilan énergie SDES)		Comb agri/sylvi % à appliquer sur total bois secteur 0-50 MW (bilan énergie SDES)
	> 50 MW	20-50 MW	0-20 MW	20-50 MW	0-20 MW	20-50 MW	0-20 MW	0-20 MW
1990	0%	53%	47%	0%	100%	16%	84%	100%
1991	0%	53%	47%	0%	100%	15%	85%	100%
1992	0%	53%	47%	0%	100%	14%	86%	100%
1993	0%	53%	47%	0%	100%	14%	86%	100%
1994	0%	53%	47%	0%	100%	13%	87%	100%
1995	6%	50%	45%	0%	100%	13%	87%	100%
1996	14%	45%	41%	0%	100%	14%	86%	100%
1997	22%	41%	37%	0%	100%	15%	85%	100%
1998	30%	37%	33%	0%	100%	17%	83%	100%
1999	38%	32%	29%	0%	100%	18%	82%	100%
2000	36%	34%	31%	0%	100%	20%	80%	100%
2001	33%	35%	32%	0%	100%	21%	79%	100%
2002	30%	37%	33%	0%	100%	22%	78%	100%
2003	31%	36%	33%	0%	100%	23%	77%	100%
2004	32%	36%	32%	0%	100%	24%	76%	100%
2005	57%	23%	21%	0%	100%	25%	75%	100%
2006	34%	17%	50%	0%	100%	25%	75%	100%
2007	33%	17%	51%	0%	100%	24%	76%	100%
2008	68%	23%	9%	0%	100%	24%	76%	100%
2009	36%	43%	21%	0%	100%	24%	76%	100%
2010	36%	39%	25%	0%	100%	23%	77%	100%
2011	31%	26%	43%	1%	99%	24%	76%	100%
2012	36%	40%	24%	2%	98%	25%	75%	100%
2013	42%	13%	45%	4%	96%	26%	74%	100%
2014	34%	17%	49%	5%	95%	28%	72%	100%
2015	30%	12%	58%	7%	93%	29%	71%	100%
2016	30%	12%	58%	7%	93%	28%	72%	100%
2017	31%	13%	56%	7%	93%	28%	72%	100%
2018	31%	13%	56%	7%	93%	28%	72%	100%

Tableau 22 : Répartition des consommations de bois entre les gammes de puissance [0 - 20] MW et [20 - 50] MW, pour les secteurs du chauffage urbain, de l'industrie manufacturière, du tertiaire et de l'agriculture/sylviculture

2.4. Méthodologie d'estimation et facteurs d'émission employés

La méthodologie des facteurs d'émission employés dans l'inventaire français pour les installations de combustion de puissance entre 0 et 20 MW se distinguent en deux catégories de substances :

- les GES et certains polluants pour lesquels des méthodologies d'estimation simples et basées sur un facteur d'émission constant sont employées (Tier 1/2 GES et PA),
- les polluants pour lesquels une différenciation est faite basée sur l'évolution de la technologie (Tier 2).

2.4.1. Méthodologie Tier 1-2

Pour les GES émis lors de la combustion de biomasse (CO₂, CH₄ et N₂O), des valeurs constantes basées sur la consommation de combustibles et des données spécifiques aux pays sont utilisées. Les valeurs de facteurs d'émission employés sont les suivantes :

	CO ₂ (kg/GJ)	CH ₄ (g/GJ)	N ₂ O (g/GJ)
Facteur d'émission	96,8	3,2	4

Tableau 23: Facteurs d'émission des gaz à effet de serre de l'inventaire français pour la combustion de biomasse dans des installations de combustion de 0 à 20 MW

Le facteur d'émission du CO₂ est recalculé à partir de la teneur en carbone du bois français de 47,5 % extrait d'un rapport Carbofor [38], alors que les FE CH₄ et N₂O sont extraits des lignes directrices du GIEC 2006 [37].

Ces valeurs sont inchangées selon les différents secteurs pour les catégories [0 – 20[MW, sauf pour l'industrie manufacturière où aucune distinction [0 – 20[et [20 - 50] MW n'est réalisée. Pour cette catégorie, les FE CH₄ et N₂O sont eux pris égaux aux facteurs d'émission pour les chaudières [20 - 50] MW et donc le FE CH₄ est de 30 g/GJ (le FE N₂O reste inchangé) [37].

La même hypothèse, selon laquelle le changement de technologie n'est pas supposé avoir un impact considérable sur le facteur d'émission, est retenue pour les polluants suivants : le CO, le NH₃, les métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn), les dioxines et furanes (PCDD/F), les HAP (les 8 HAP-ICPE), le PCB et le HCB.

Les facteurs d'émission du CO, des métaux lourds, des HAP et des PCDD/F proviennent de l'étude réalisée par le Citepa en 2003 [14].

Le FE NH₃ est issu du guide EMEP/EEA 2016 [34], le FE PCB est extrait d'un rapport de l'AEAT [39] et le FE HCB provient d'une source EMEP [40].

2.4.2. Méthodologie Tier 2

Pour les estimations des émissions de NO_x, SO₂, COVNM, TSP/PM et BC (Black Carbon), pour tous les secteurs hormis l'industrie manufacturière, une différenciation est faite à partir de 2010 pour inclure l'évolution des performances suites à l'intégration des installations Fonds Chaleur (FC) dans le parc. Les facteurs d'émission provenant du FC ont été déterminés conjointement par l'ADEME et le Citepa, dans une note méthodologique fournie au MTES. Ainsi, avec la part grandissante des chaudières Fonds Chaleur, plus performantes et moins émettrices, les facteurs d'émission évoluent à la baisse à partir de 2010. L'hypothèse d'une augmentation linéaire de la consommation de ces chaudières a été retenue dans l'inventaire en l'absence de données antérieures.

La part des consommations des chaudières du Fonds Chaleur au fur et à mesure des années est la suivante :

	1990-2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
% consommation chaufferie FC	0	5,6	11,2	16,8	22,4	28,0	33,6	39,2	44,8	50,4

Tableau 24 : Part des chaufferies Fonds Chaleur tous secteurs confondus dans la consommation de biomasse

Pour les installations autres que FC, les facteurs d'émission proviennent de l'étude Citepa de 2003 [14], à l'exception du SO₂ pour lequel une communication de l'ADEME quant à la teneur en soufre moyenne du bois français a permis de calculer le facteur d'émission correspondant.

Les valeurs des facteurs d'émission selon le type de technologies sont les suivantes :

Facteur d'émission (g/GJ)	NO _x	SO ₂	COVNM	TSP
Chaufferies hors FC	200	10	4,8	100
Chaufferies FC	132	6	2,2	16,8

Tableau 25 : Facteurs d'émission des NO_x, SO₂, COVNM et TSP considérés dans l'inventaire français pour la combustion de biomasse dans les installations d'une puissance de 0 à 20 MW, avec distinction pour celles du Fonds Chaleur

Ainsi, les facteurs d'émission considérés pour la part [0 - 20] MW de l'industrie manufacturière (confondue avec la part 20-50 MW) sont égaux aux facteurs d'émission des chaudières hors du dispositif Fonds Chaleur.

Enfin, les facteurs d'émission des PM et du BC sont recalculés en fonction de la granulométrie établie par le Citepa, basée sur diverses sources et hypothèses sur les systèmes de traitement de fumée utilisés, qui donne les ratios de particules entre les différentes tailles :

Granulométrie PM/TSP	PM ₁₀ (% TSP)	PM _{2,5} (% TSP)	BC (% PM _{2,5})
Tertiaire et Agriculture	95	93	28
Industrie manufacturière	77,8	61	3,3
Chauffage Urbain	79,8	66,5	3,3

Tableau 26 : Granulométries appliquées dans l'inventaire français pour la combustion de biomasse dans les installations d'une puissance de 0 à 20 MW, selon différents secteurs

Une vérification à partir des données d'émissions des inspections DREAL des installations hors Fonds Chaleur devra permettre d'établir si les facteurs d'émissions Fonds Chaleur pourront être étendus à l'ensemble des installations.

3. Logistique des campagnes de mesures sur site

3.1. Méthodologie pour la réalisation des campagnes de mesures

La caractérisation des émissions des chaufferies biomasse retenues pour le projet ACIBIOQA concerne la quantification des composés suivants :

- 1.1 gaz de combustion (CO, CO₂, O₂, COVT, NO_x) ;
- 2.1 granulométrie (PM₁₀ et PM_{2,5}) ;
- 3.1 HAP ;
- 4.1 métaux ;
- 5.1 carbone suie (BC) - EC/OC ;
- 6.1 particules totales TSP (phase solide et condensable) et solides SP ;
- 7.1 classes de volatilité.

3.2. Logistique des campagnes de mesures sur site

3.2.1. Planification des campagnes de mesures

Chaque campagne d'essais a été réalisée sur une période de cinq jours (voyage, montage et démontage compris). Les préconisations générales du programme LabRef 22 concernant l'organisation de la campagne et la réalisation des essais ont été respectées. Deux à trois prélèvements manuels ont été réalisés par jour, soit un total de minimum six à neuf prélèvements par campagne d'essais. Le nombre de prélèvements par paramètre dépendait des conditions de réalisation des campagnes (niveaux de concentration attendus, taille des conduits et nombre de trappes disponibles notamment).

3.2.2. Calendrier des campagnes d'essai

Trois campagnes d'essais ont été réalisées durant l'année 2020 et quatre ont été réalisées durant le premier semestre 2021.

- La première campagne d'essais s'est déroulée en semaine 11 de l'année 2020 (du 09 au 13 mars) sur le site de CH5. Il était prévu de poursuivre en semaine 12 sur la chaufferie CH4 mais la survenue en France de la pandémie mondiale de Covid 19 et le confinement de mars-avril 2020 ont forcé l'interruption des mesures et la reprogrammation de cette intervention ;
- La seconde campagne de mesure s'est déroulée sur le site de CH6 en semaine 28 de l'année 2020 (du 06 au 10 juillet) ;
- La troisième et dernière campagne de 2020, s'est réalisée sur le site CH4 en semaine 51 de l'année 2020 (du 14 au 18 décembre) ;
- Les quatrième et cinquième campagnes de mesures se sont déroulées sur les chaufferies CH1 et de CH2 les semaines 7 et 8 de l'année 2021 (du 15 au 19 février et du 22 au 26 février, respectivement).
- La sixième campagne de mesure s'est déroulée sur la chaufferie CH3 la semaine 15 de l'année 2021 (du 12 au 16 avril).
- La septième et dernière campagne d'essais a eu lieu sur le site de CH11 durant la période estivale de l'année 2021. La semaine d'intervention reste à définir.

Site	Année	Semaine
CH5	2020	11
CH6		28
CH4		51
CH1	2021	7
CH2		8
CH3		15
CH11		42

Tableau 27: Calendrier des campagnes d'essais

4. Descriptif des sites retenus et Résultats détaillés des campagnes d'essais

4.1. Site CH6

4.1.1. Données clés

Maître d'ouvrage	Entreprise
Puissance bois	1 650 kW
Puissance appoint	16 000 kW
Nombre de chaudière bois	1
Type de filtration	Multicyclone et Filtre à manches
Consommateur(s)	Réseau de chaleur (bâtiments industrie et tertiaire)
Type de foyer	Grilles mobiles inclinées
Type de combustible	50 % plaquettes forestières 50 % bois d'élagage (Humidité 30 à 35 %, PCI 3,04 MWh/t, granulométrie C3)

La chaufferie présente une surface de 150 m² uniquement pour la chaufferie bois et son filtre.

Le silo est composé de deux compartiments de stockage aériens et sont équipés d'un convoyage par échelles raclées. Le volume utile est de 1386 m³.

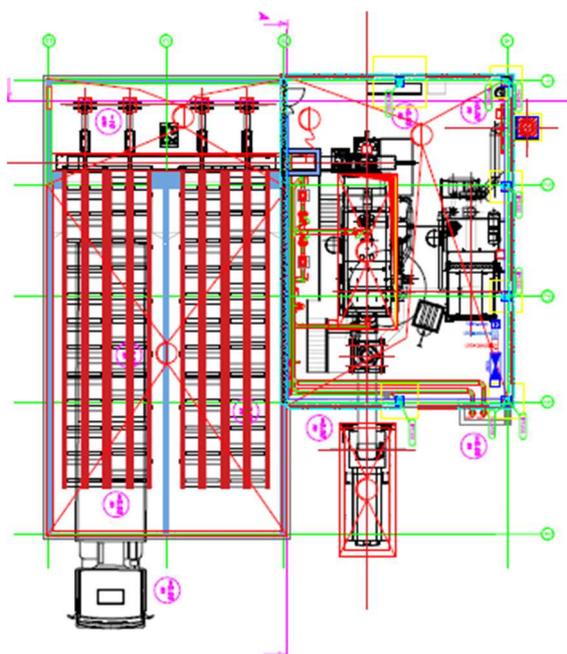


Figure 61 : Plan de la chaufferie CH6

Le combustible est un mixte de plaquettes forestières (50 %) et de bois d'élagage (50 %) pour environ 1850 tonnes par an avec une humidité de 30 à 35 %.

Les cendres sont collectées dans une benne située à l'extérieur du bâtiment.

4.1.2. Compatibilité pour la réalisation des mesures

Le site est équipé de trappe NFX 44052 permettant la réalisation des mesures.

Le site est retenu pour la réalisation des mesures.

4.1.3. Analyse fonctionnelle

La chaudière CH6 de 1,65 MW est une nouvelle chaudière installée en complément d'une chaufferie (bois et gaz) plus ancienne sur le site. Le réseau de chaleur du site fonctionnait à la biomasse principalement l'hiver et au gaz l'été (process de déshumidification salle blanche des usines du groupe et eau chaude sanitaire du restaurant) avec un taux de couverture biomasse d'environ 40 %. La puissance appelée étant relativement importante notamment avec la construction de nouveaux bâtiments et le taux de couverture biomasse en hiver n'étant pas maximal, l'entreprise a financé une nouvelle chaufferie biomasse pour assurer les besoins ECS en été et compléter la production biomasse en hiver.

La chaufferie a été mise en service en 2019. Elle a fait l'objet d'un contrat de conception réalisation exploitation. Il n'y a pas eu de problème important depuis sa mise en service.

La chaufferie est déclarée au titre du régime ICPE 20910A. Les valeurs limites d'émission applicables sont à 6 % d'O₂ :

- Poussières 50 mg/Nm³
- NOx 500 mg/Nm³
- SO₂ 200 mg/Nm³
- CO 250 mg/Nm³

Des contrôles périodiques pour le contrôle des VLE sont réalisés. Il n'y pas de dépassement constaté sur les premières années.

La chaudière CH6 (N73 Bois) a couvert, en 2019, 23 % des besoins assurant un taux de couverture biomasse de 76 %. Son temps de fonctionnement est de 3000 heures.

Le rendement de la chaudière est de 85 %.

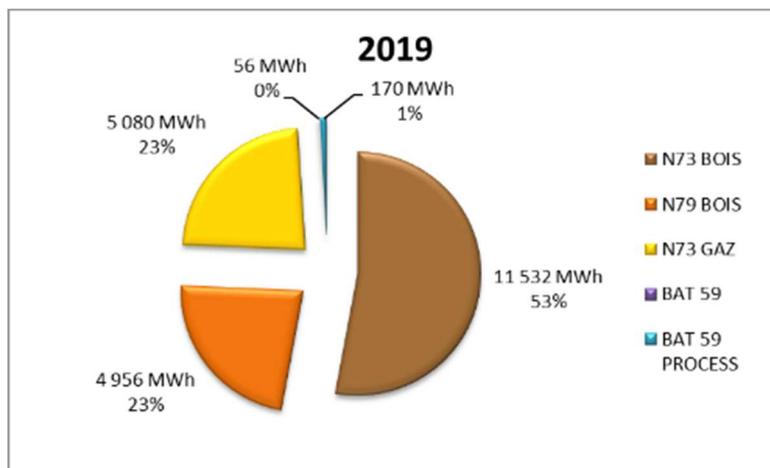


Figure 62 : Bilan énergétique sur le site CH6

4.1.4. Résultats de la campagne de mesures

Lors de la campagne de mesure, la chaudière fonctionnait à 90 % de sa charge nominale.

4.1.5. Débit, humidité, température de l'effluent

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Moyennes
Débit sur sec (m ³ /h)	2	270 minutes	1661
Humidité (%)	1	305 minutes	14,5
Température (°C)	2	270 minutes	120

Tableau 28 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH6)

4.1.6. Gaz de combustion

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6 % d'O ₂
O ₂ (%)	2	270 minutes	8,5	
CO ₂ (%)			12,2	
CO (mg/m ³)			128,6	152,9
NO _x (mg/m ³)			175,1	210,0
COVt (mg/m ³)			0,4	0,5

Tableau 29 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH6)

4.1.7. Particules solides et condensables

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6 % d'O ₂
PM (Solide) (mg/m ³)	1	305 minutes	0,12	0,14
PM (Solide + condensable) (mg/m ³)	2	141 minutes	1,78	2,2
PM (condensables) (mg/m ³)	2		0,5	0,6
PM ₁ (%)	1	300 minutes	100	
PM _{2,5} (%)			0	
PM ₁₀ (%)			0	
>PM ₁₀ (%)			0	

Tableau 30 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH6)

4.1.8. Métaux, HAP, Carbone Suie et Classes de volatilité

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6 % d'O ₂
Somme 16 Métaux (mg/m ³)	1	305 minutes	0,027	0,033
Somme 8 HAP (µg/m ³)	1	300 minutes	0,069	0,081
Carbon suie (mg/m ³)	1	287 minutes	0,007	0,008
Classes de Volatilité (ng/m ³)	2	141 minutes	En attente d'analyse	

Tableau 31 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH6)

4.1.9. Interprétation des résultats

La chaudière CH6 a une puissance supérieure à 1 MW et le site est une ICPE. Il est soumis à l'arrêté du 3 août 2018 (ICPE 20910A) et a été financé par le Fonds chaleur de l'ADEME avec un engagement 75 mg/Nm³.

Émissions	Résultats à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Attentes Réglementaires à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Conclusions
Poussières	0,14	Arrêté du 02/08/2018 : 50 Fonds Chaleur : 75	<ul style="list-style-type: none"> Émissions faibles, bien en dessous des réglementations notamment grâce à la présence d'un filtre à manche
CO	153	Arrêté du 02/08/2018 : 250	<ul style="list-style-type: none"> Émissions modérées, en dessous des attentes réglementaires Bonne qualité de combustion

NOx	210	Arrêté du 02/10/2009 : 500 Fonds Chaleur : 300	<ul style="list-style-type: none"> Émissions modérées, en dessous des attentes réglementaires Combustible peu chargé en azote
SO ₂	-	Arrêté du 02/08/2018 : 50	<ul style="list-style-type: none"> Pas de donnée
COV	0,5	-	<ul style="list-style-type: none"> Émissions faibles

Tableau 32 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation

La chaufferie présente un rendement de production plutôt bon d'environ 85 % et un taux de charge élevé de 90 %. Ces valeurs expliquent aussi les émissions de poussières et de CO modérées.

Au regard des résultats des émissions de NOx, il semble que le combustible utilisé (50 % plaquettes forestières, 50 % bois d'élagage) ait une teneur en azote faible.

L'analyse de la courbe O₂ sur une journée montre que la chaudière fonctionne par oscillation autour de 8 % d'O₂.

**Evolution temporelle de l'O₂ et du CO₂ pendant la durée des mesures
08/07/2020**

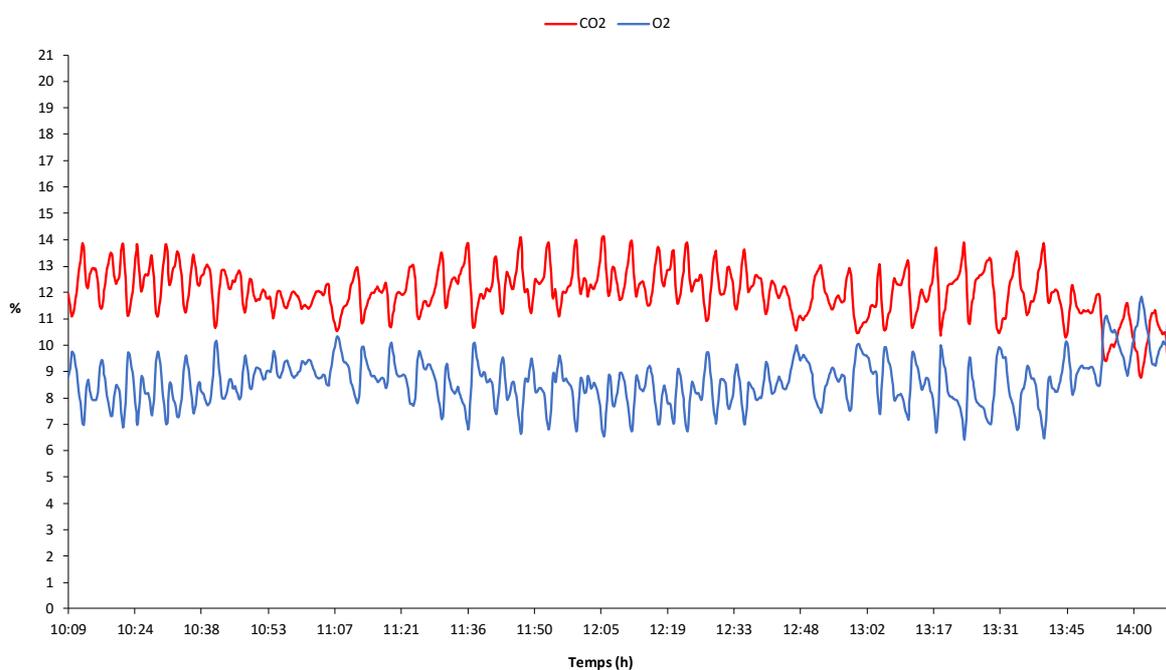
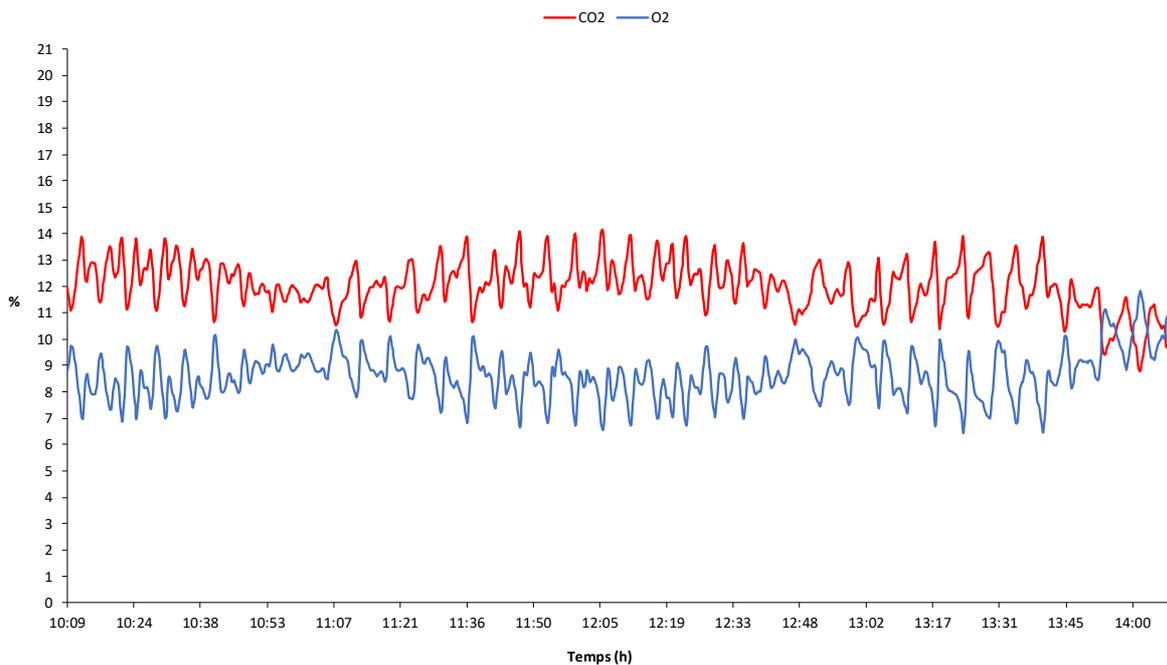


Figure 63 : Courbe O₂ et CO₂ pour les essais du 8 juillet 2020

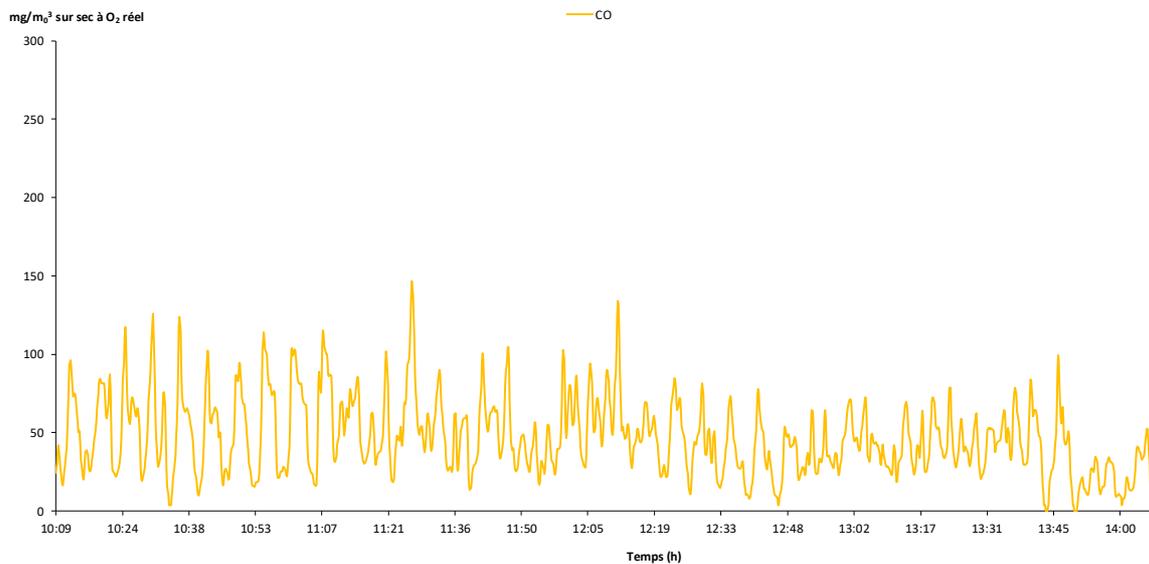
4.1.10. Résultats des campagnes d'essais sur CH6 (1,65 MW)

Paramètres	Unités	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy.	Jours
Débit sur sec	m ³ /h	1729	1593		1661	
Humidité	%	14,7	14,3		14,5	
Température	°C	119	121		120	
		300 min	240 min			
O ₂	%	8,3	8,6		8,5	07-08/07/2020
CO ₂	%	12,3	12,0		12,2	07-08/07/2020
CO	mg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	249,1	56,7		152,9	07-08/07/2020
NO _x	mg/m ³ eq. NO ₂ sur sec à 6% d'O ₂	196,0	223,9		210,0	07-08/07/2020
COVt	mg/m ³ eq. C sur sec à 6% d'O ₂	0,9	0,01		0,5	07-08/07/2020
		305min				
PM (Solide)	mg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	0,14			0,14	07/07/2020
		164min	118min			
PM (solide + condensable)	mg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	1,7	2,6		2,2	07/07/2020
		300min				
PM ₁	%	100			100	08/07/2020
PM _{2,5}	%	0			0	08/07/2020
PM ₁₀	%	0			0	08/07/2020
>PM ₁₀	%	0			0	08/07/2020
		305min				
Σ 16 Mtx	mg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	0,033			0,033	08/07/2020
		300min				
Σ 8 HAPs	µg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	0,081			0,081	07/07/2020
		287min				
EC	mg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	0,000			0,000	09/07/2020
OC	mg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	0,008			0,008	09/07/2020
TC	mg/m ³ sur sec à 6% d'O ₂	0,008			0,008	09/07/2020

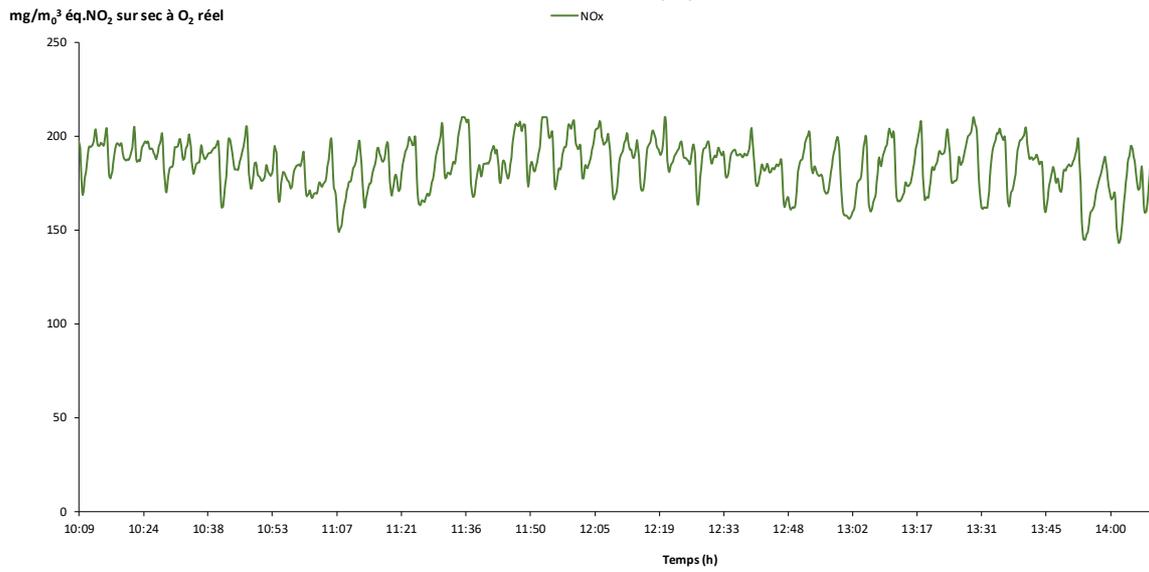
Evolution temporelle de l'O2 et du CO2 pendant la durée des mesures
08/07/2020



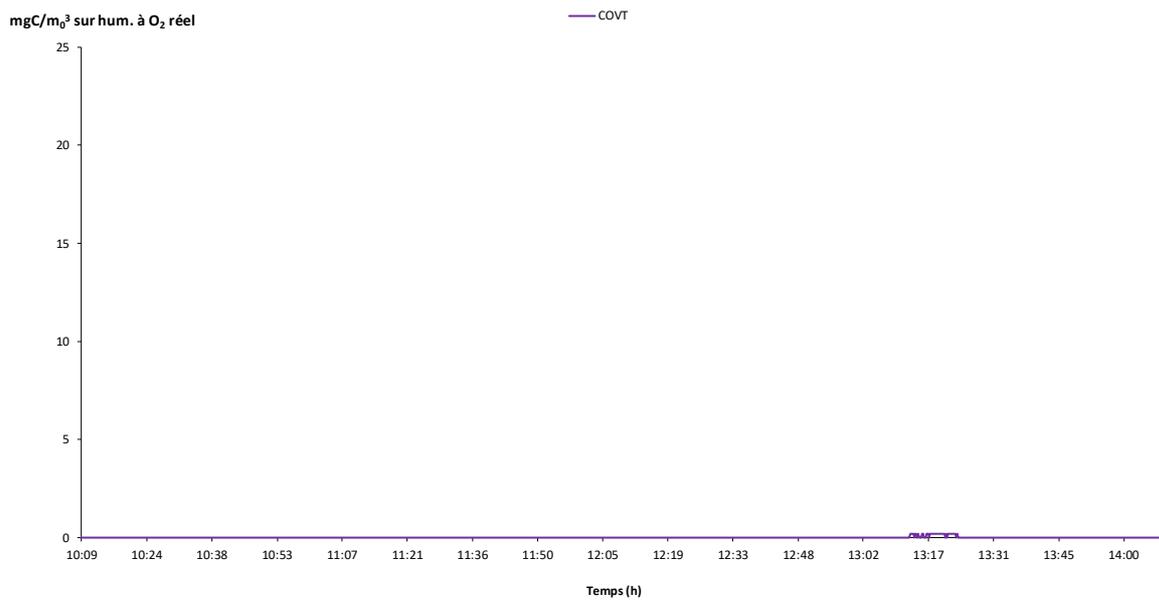
Evolution temporelle du CO pendant la durée des mesures
08/07/2020



Evolution temporelle des NOx pendant la durée des mesures
08/07/2020



Evolution temporelle des COV pendant la durée des mesures
08/07/2020



4.2.3. Analyse fonctionnelle

La chaudière CH5 date de 2018. La chaufferie tourne uniquement pendant la saison de chauffe et dessert un réseau de chaleur de 1407 m. Le taux de couverture biomasse est de 95 %. Le gaz est utilisé en cas de panne ou en début et fin de saison.

Quelques incidents au démarrage ont été constatés (pompe de charge, vanne 3 voies et fort taux d'imbrulés) mais ceux-ci ont été réglés. Le Syndicat Départemental est toujours en l'attente de raccorder un EHPAD aujourd'hui équipé d'une chaufferie ce qui permettrait d'augmenter le taux de charge de la chaudière.

La granulométrie du combustible étant variable celle-ci occasionne des bourrages des vis.

Sur l'année 2019, le rendement de la chaudière était de l'ordre de 81 %.

La chaufferie et le réseau sont exploités en régie par le Syndicat Départemental qui exploite une quinzaine de chaufferies. Chaque chaufferie bénéficie d'un passage par jour et d'un expert biomasse qui intervient régulièrement sur les réglages de combustion (air primaire, air secondaire).

La chaudière est bien dimensionnée (temps de fonctionnement pleine puissance supérieur à 2 200 heures).

La chaufferie n'est pas soumise au régime ICPE 2910 (à partir de 1 MW), mais son engagement avec l'ADEME contraint le site à respecter une VLE poussière de 75mg/ Nm³ (à 6 % d'O₂).

Le Syndicat Départemental réalise un suivi des émissions et des poussières sur l'ensemble de ces chaufferies tous les 3 ans environ. Le résultat de ces mesures est présenté dans l'analyse des résultats.

4.2.4. Résultats de la campagne de mesures

La chaudière présente un fonctionnement automatique dit « de tout ou rien ». Lors de la campagne de mesure, la chaudière fonctionnait à une allure approximative de 50 % de sa charge nominale.

4.2.5. Débit, humidité, température de l'effluent

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Moyennes
Débit sur sec (m ³ /h)	1	360 minutes	1229
Humidité (%)	3	63 minutes	11,5
Température (°C)	1	360 minutes	81

Tableau 33 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH5)

4.2.6. Gaz de combustion

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
O ₂ (%)	1	360 minutes	12,9		
CO ₂ (%)			7,9		
CO (mg/m ³)			498,6	925,3	614,8
NOx (mg/m ³)			92,6	171,8	114,1
COVt (mg/m ³)			7,6	14,2	9,4

Tableau 34 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH5)

4.2.7. Particules solides et condensables

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
PM (Solide) (mg/m ³)	3	63 minutes	41,1	84,2	56,0
PM (Solide + condensable) (mg/m ³)	3	82 minutes	47,9	104,3	69,3
PM (condensables) (mg/m ³)	3		7,4	15,6	10,4
PM ₁ (%)	1	15 minutes	57		
PM _{2,5} (%)			10		
PM ₁₀ (%)			20		
>PM ₁₀ (%)			13		

Tableau 35 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH5)

4.2.8. Métaux, HAP, Carbone Suie et Classes de volatilité

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
Somme 16 Métaux (mg/m ³)	3	63 minutes	1,1	2,3	1,5
Somme 8 HAP (µg/m ³)	2	121 minutes	0,9	1,6	1,1
Carbon suie (mg/m ³)	3	82 minutes	4,7	3,4	6,8
Classes de Volatilité (ng/m ³)	3	82 minutes	En attente d'analyse		

Tableau 36 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH5)

4.2.9. Interprétation des résultats

La chaudière CH5 a une puissance de 800 kW et le site n'est pas une ICPE. Il est soumis à l'arrêté du 2 octobre 2009 et a été financé par le fond chaleur de l'ADEME avec un engagement de 75 mg/Nm³.

Émissions	Résultats à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Attentes Réglementaires à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Engagement Constructeur à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Conclusions
Poussières	84	Arrêté du 02/10/2009 : 225 Fonds Chaleur : 75	33	<ul style="list-style-type: none"> Émissions légèrement supérieures à l'engagement ADEME et contradictoire avec les engagements constructeurs Surplus d'émissions (~15 %) dû à la partie condensable des PM₁
CO	925	-	-	<ul style="list-style-type: none"> Émissions importantes, au-delà des attentes réglementaires
NOx	172	Arrêté du 02/10/2009 : 750 Fonds Chaleur : 300	-	<ul style="list-style-type: none"> Émissions faibles, en-dessous des attentes réglementaires des sites plus importants Combustible peu chargé en azote
COV	14.2	-	-	<ul style="list-style-type: none"> Émissions faibles

Tableau 37 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation et à l'engagement constructeur (CH5)

Lors de la campagne de mesure, le taux de charge a été évalué à 50 % ce qui pourrait expliquer les émissions de CO importantes.

Il est difficile d'expliquer la très bonne performance pour les NOx, l'un des facteurs étant certainement une teneur en azote faible du combustible en entrée (plaquette de scierie).

L'analyse de la courbe O₂ sur une journée montre que la chaudière réalise des cycles courts de 30 minutes avec oscillation autour du point de consigne pendant les phases à pleine puissance.

Comme pour le site CH1, il semble que ce fonctionnement par cycle engendre des émissions bien plus élevées pour les CO qu'un fonctionnement en pleine charge (engagement constructeur).

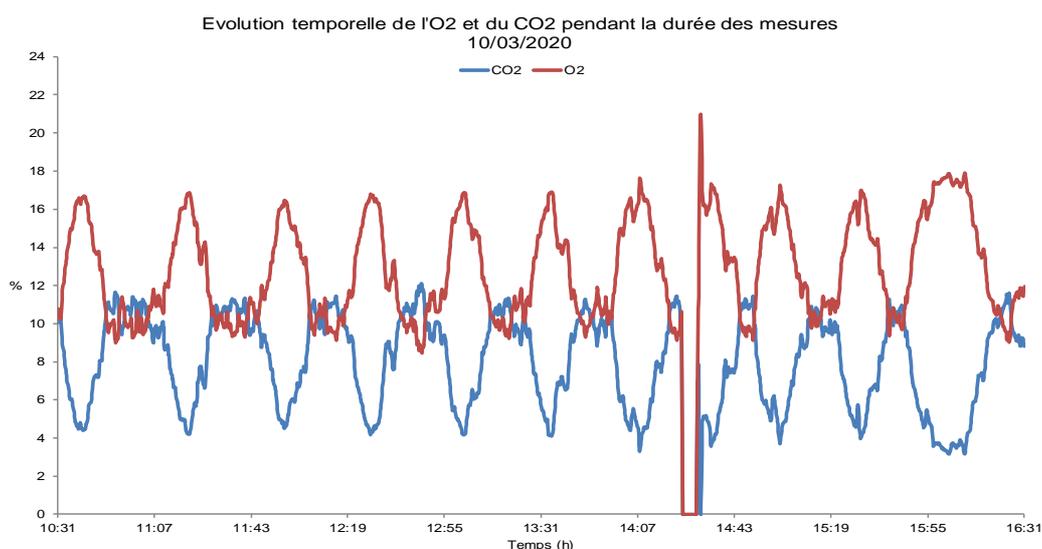


Figure 65 : Courbe O₂ et CO₂ pour les essais du 10 mars 2021 (CH5)

4.2.10. Entretien constructeur

Le mode de régulation historique de leurs chaudières est effectivement une oscillation entre fonctionnement pleine puissance (ON) et un maintien de feu (Off). Si la consigne de température est à 85 °C, la chaudière va fonctionner à pleine puissance jusqu'à 89 °C (+4 °C) et s'arrêter pour ne pas dépasser cette consigne. Elle attend ensuite de redescendre en température à 81 °C (-9°C) pour redémarrer. C'est ce mode de régulation qui a été mis en place sur la chaudière CH5.

La spécificité de ces chaudières est la possibilité avec ce fonctionnement d'avoir un minimum technique très bas (3 % annoncé par le constructeur) et de ne pas avoir besoin de ballon tampon.

Le constructeur a été interpellé sur le fait que ce fonctionnement pourrait engendrer des émissions de polluants (CO) et de poussières plus importantes. Aucune étude n'a été conduite sur ce sujet en interne. Pour le constructeur, ce fonctionnement assure une durée de vie de la chaudière optimale en préservant celle-ci des risques de condensations (atteinte du point de rosée en sous-charge).

Le constructeur est en capacité de faire fonctionner ses chaudières avec un mode de régulation thermostatique à savoir que la chaudière ajuste en permanence sa puissance pour osciller autour de la consigne. Cela oblige le constructeur à régler sur la chaudière de nombreux points de fonctionnement.

Il semble que le constructeur maîtrise mal les impacts pollution et rendement des deux solutions et propose en priorité le mode On/Off moins risqué pour la chaudière.

Il semblerait que le Syndicat Départemental ait demandé très récemment au constructeur de mettre en place cette régulation sur la chaufferie certainement suites aux résultats que nous lui avons transmis.

	Janvier/Février 2019
CO (mg/Nm ³)	257
NOx (mg/Nm ³)	130

SO ₂ (mg/Nm ³)	<i>Pas de mesure</i>
Poussières (mg/Nm ³)	50,3
COV (mg/Nm ³)	<i>Pas de mesure</i>

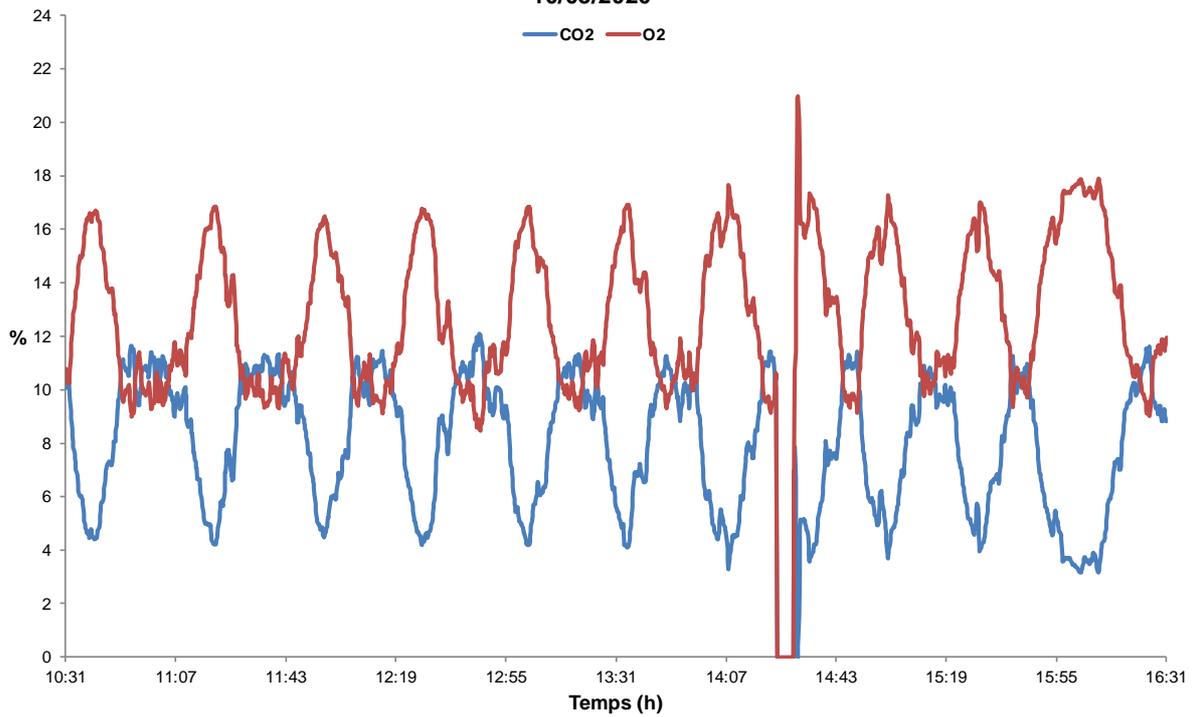
Tableau 38 : Mesures des bureaux de contrôle, commandées par le Syndicat Départemental sur la chaudière bois (CH5)

Les résultats de mesure indiquent de faibles émissions de poussières et des émissions de NOx moyennes, en-dessous des attentes réglementaires. Les émissions de CO sont modérées, laissant penser que les mesures ont été prises lors d'un fonctionnement de la chaudière à un taux de charge élevé. (essais de 90 minutes). Les mesures des émissions de CO ne sont pas obligatoires dans les contrôles réglementaires de la chaudière mais ont toutefois été effectuées par les bureaux de contrôle.

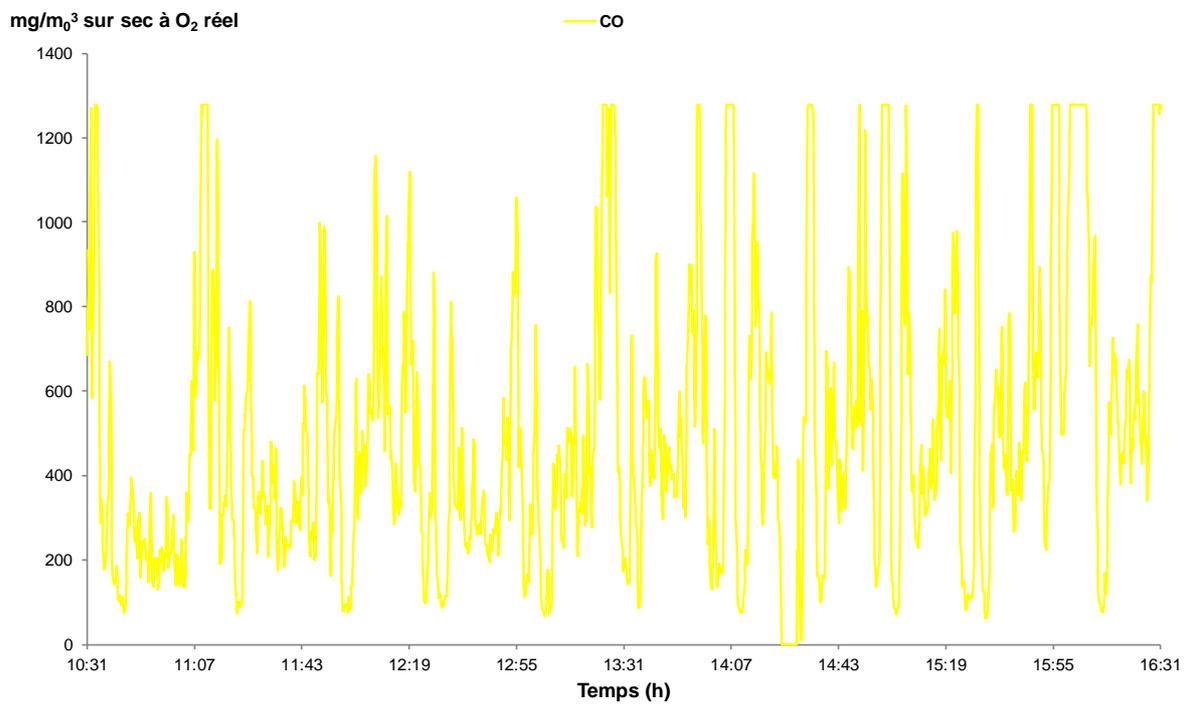
4.2.1. Résultats des campagnes d'essais sur CH5 (800 kW)

Paramètres	Unités	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy.	Jours
Débit sur sec	m ₀ ³ /h	1229			1229	
Humidité	%	11,5			11,5	
Température	°C	81			81	
		420 min				
O ₂	%	12,9			12,9	10/03/2020
CO ₂	%	7,9			7,9	10/03/2020
CO	mg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	614,8			614,8	10/03/2020
NO _x	mg/m ₀ ³ eq. NO ₂ sur sec à 11% d'O ₂	114,1			114,1	10/03/2020
COVt	mg/m ₀ ³ eq. C sur sec à 11% d'O ₂	9,4			9,4	10/03/2020
		70min	60min	60min		
PM (Solide)	mg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	54,4	48,1	65,4	56,0	10/03/2020
		63min	113min	70min		
PM (solide + condensable)	mg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	66,1	55,9	86,0	69,3	11/03/2020
		15min				
PM ₁	%	57			57	11/03/2020
PM _{2,5}	%	10			10	11/03/2020
PM ₁₀	%	20			20	11/03/2020
>PM ₁₀	%	13			13	11/03/2020
		70min	60min	60min		
Σ 16 Mtx	mg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	1,4	1,7	1,4	1,5	10/03/2020
		117min	124min			
Σ 8 HAPs	µg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	0,7	1,4		1,1	10/03/2020
		63min	113min	70min		
EC	mg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	5,9	4,7	6,1	5,6	11/03/2020
OC	mg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	0,6	1,1	2,1	1,2	11/03/2020
TC	mg/m ₀ ³ sur sec à 11% d'O ₂	6,5	5,8	8,2	6,8	11/03/2020

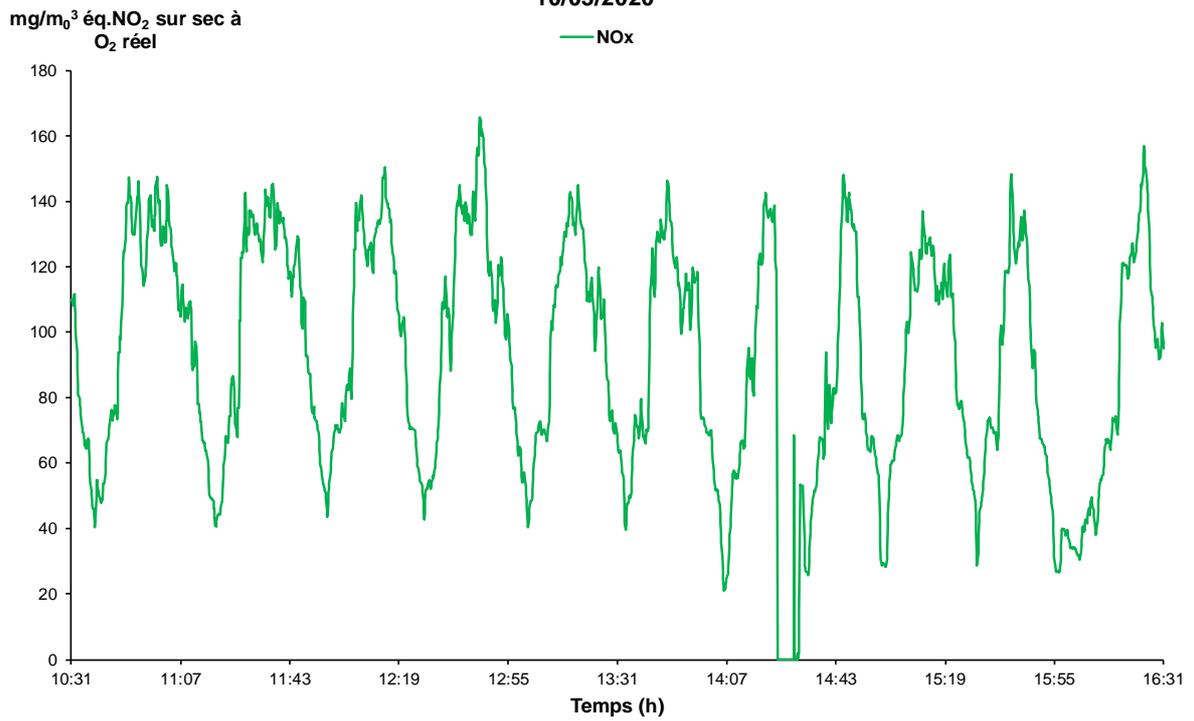
Evolution temporelle de l'O₂ et du CO₂ pendant la durée des mesures
10/03/2020



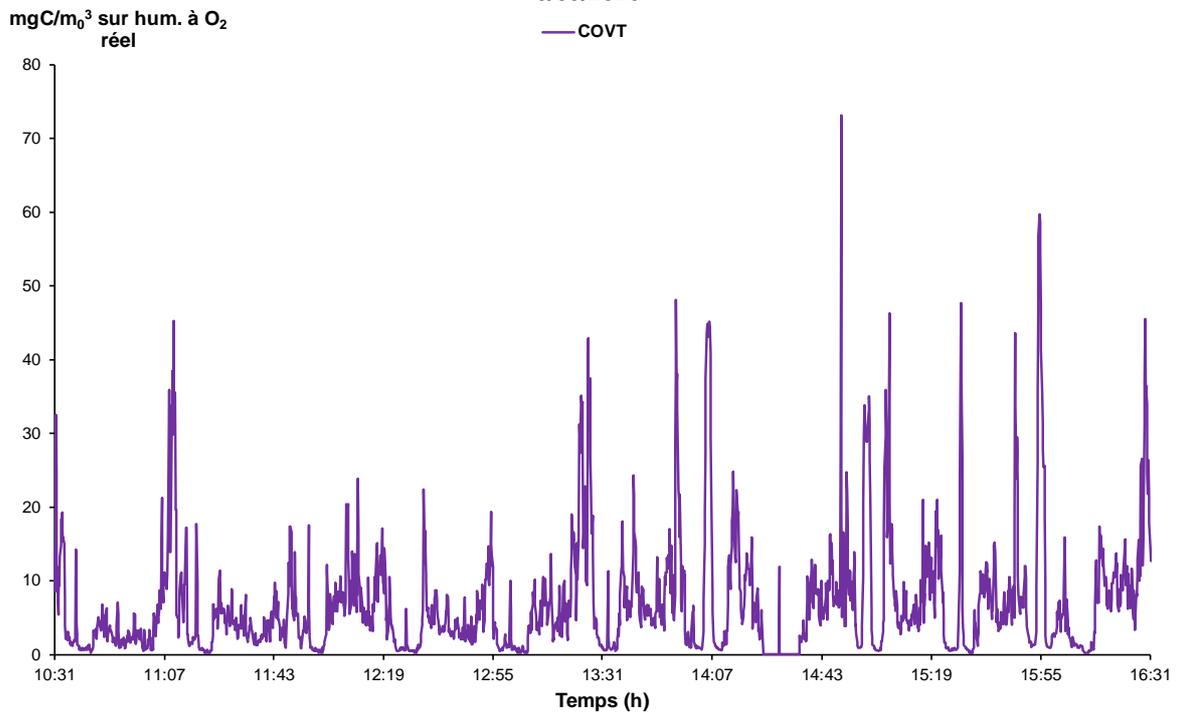
Evolution temporelle du CO pendant la durée des mesures
10/03/2020



Evolution temporelle des NOx pendant la durée des mesures 10/03/2020



Evolution temporelle des COVt pendant la durée des mesures 10/03/2020



L'évacuation et le stockage des cendres se fait grâce à une évacuation par vis sans fin et stockage dans un bac métallique de 240 L. Puis, elles sont transférées dans une benne extérieure avec un retourneur de bac, et sont ensuite compostées par le Syndicat.

La production de la chaudière bois est évaluée grâce à un comptage énergétique.

4.3.2. Compatibilité pour la réalisation des mesures

La trappe dispose d'une longueur amont tout juste nécessaire (4 DN). L'accès se fait par une petite trappe avec un recul de 44 cm par rapport au mur, et il n'y a pas de lumière.

Le site est donc retenu dans le panel des projets à étudier.

4.3.3. Analyse fonctionnelle

La chaudière CH4 date de 2007.

La chaufferie et le réseau sont exploités en régie par le Syndicat Départemental qui exploite une quinzaine de chaufferies. Chaque chaufferie bénéficie d'un passage par jour et d'un expert biomasse qui intervient régulièrement sur les réglages de combustion (air primaire, air secondaire).

La chaufferie tourne uniquement pendant la saison de chauffe et dessert un réseau de chaleur de 2100 m. Le taux de couverture biomasse est proche de 100 %. Le Fioul est utilisé en cas de panne ou en début et fin de saison.

La chaudière est bien dimensionnée (temps de fonctionnement pleine puissance supérieur à 2000 heures). Aucune problématique de fonctionnement n'a été observée.

Le rendement de la chaudière bois est de l'ordre de 80 %.

La chaufferie n'est pas soumise au régime ICPE 2910 (à partir de 1 MW), mais son engagement avec l'ADEME contraint le site à respecter une VLE poussière de 150 mg/ Nm³ (à 6% d'O₂).

4.3.4. Résultats de la campagne de mesures

La chaudière a un fonctionnement automatique dit « de tout ou rien ». Lors de la campagne de mesure, la chaudière fonctionnait à une allure ralentie approximative de 30 % de sa charge nominale. La charge semble faible pour une semaine de décembre. Cette faible charge n'est pas que la conséquence de la démolition de l'immeuble de 16 logements mais aussi d'un redoux climatique.

4.3.5. Débit, humidité, température de l'effluent

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Moyennes
Débit sur sec (m ³ /h)	2	480 minutes	719
Humidité (%)	1	165 minutes	8,8
Température (°C)	2	480 minutes	78

Tableau 39: Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH4)

4.3.6. Gaz de combustion

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
O ₂ (%)	2	480 minutes	12,7		
CO ₂ (%)			7,6		
CO (mg/m ⁰³)			4875,2	8841,1	5874,3
NOx (mg/m ⁰³)			113,1	205,1	136,3
COVt (mg/m ⁰³)			178,3	330,8	219,8

Tableau 40 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH4)

4.3.7. Particules solides et condensables

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
PM (Solide) (mg/m ³)	3	46 minutes	180,7	341,0	226,7
PM (Solide + condensable) (mg/m ³)	3	60 minutes	198,1	406,8	270,4
PM (condensables) (mg/m ³)	3		10,3	21,2	14,1
PM ₁ (%)	3	6 minutes	71		
PM _{2,5} (%)			9		
PM ₁₀ (%)			11		
>PM ₁₀ (%)			9		

Tableau 41 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH4)

4.3.8. Métaux, HAP, Carbone Suie et Classes de volatilité

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
Somme 16 Métaux (mg/m ³)	1	165 minutes	1,9	3,3	2,2
Somme 8 HAP (µg/m ³)	1	120 minutes	195,0	340,1	226,7
Carbon suie (mg/m ³)	3	3 minutes	6,8	11,7	7,1
Classes de Volatilité (ng/m ³)	3	60 minutes	En attente d'analyse		

Tableau 42 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH4)

4.3.9. Interprétation des résultats

La chaudière CH4 a une puissance inférieure à 2 MW et le site n'est pas ICPE. Il est soumis à l'arrêté du 2 octobre 2009. Le site est financé par le Fonds Chaleur de l'ADEME, avec à l'époque une exigence de 150 mg/Nm³ pour les émissions de poussières.

Émissions	Résultats à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Attentes Réglementaires à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Conclusions
Poussières	341	Arrêté du 02/10/2009 : 225 Fonds Chaleur : 150	<ul style="list-style-type: none"> Émissions élevées malgré la présence d'un multicyclone Faible surplus d'émissions (~5 %) dû à la partie condensable des PM₁ Mesure sur 1 heure prenant en compte des phases On et Off
CO	8841	-	<ul style="list-style-type: none"> Bien au-delà des attentes réglementaires des sites plus importants en taille Combustion incomplète
NOx	205	Arrêté du 02/10/2009 : 750 Fonds Chaleur : 500	<ul style="list-style-type: none"> En-dessous des attentes réglementaires des sites plus importants Combustible peu chargé en azote
COV	331	-	<ul style="list-style-type: none"> Émissions très élevées

Tableau 43 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation (CH4)

Lors de la campagne de mesure, le taux de charge a été évalué à 30 % ce qui pourrait expliquer les émissions de CO importantes.

Il est difficile d'expliquer la très bonne performance pour les NOx, l'un des facteurs étant certainement une teneur en azote faible du combustible en entrée (50 % déchets verts, 50 % bois d'élagage).

L'analyse de la courbe O₂ sur une journée montre que la chaudière réalise des cycles très courts de 20 minutes avec oscillation autour du point de consigne. Comme pour le site CH1, il semble que ce fonctionnement par cycle engendre des émissions bien plus élevées pour les CO qu'un fonctionnement en pleine charge (engagement constructeur).

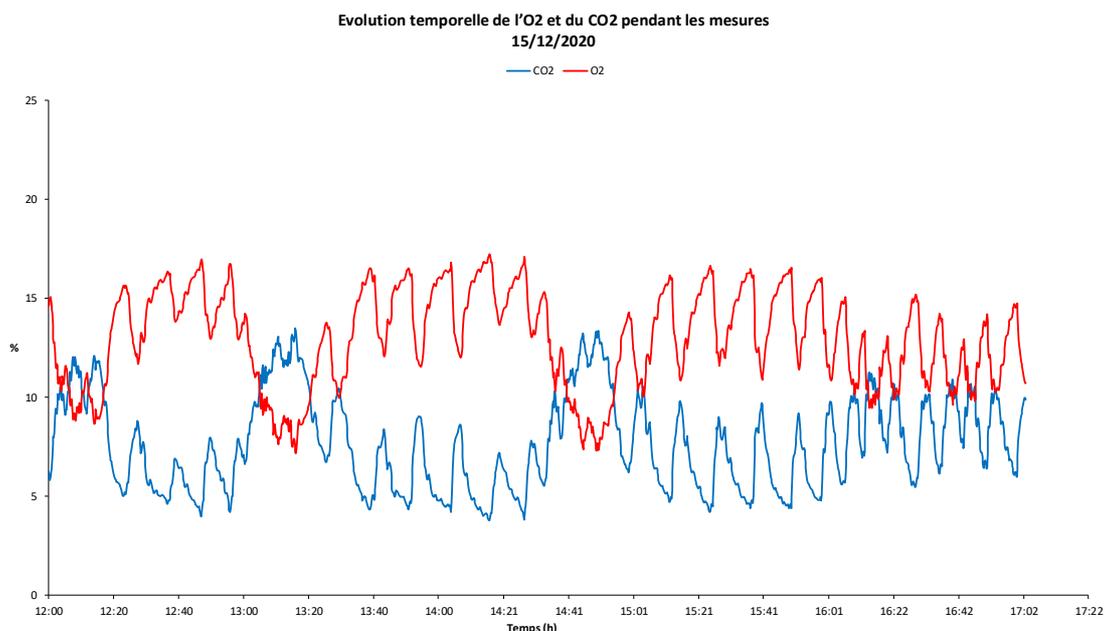


Figure 67 : Courbe O₂ et CO₂ pour les essais du 15 février 2021 (CH4)

La mise en place d'un ballon permettrait de limiter le nombre de cycle sur une journée et donc le nombre de cycle et ainsi le nombre de phases de démarrage qui génèrent des émissions de CO et de poussières plus importantes qu'en régime nominal.

Le Syndicat a réalisé des analyses de combustion en collaboration avec leur exploitant.

	Avant réglages	Après réglages	Après réglages
Taux de charge	38 %	71 %	30 %
CO à 6% d'O ₂ (mg/m ³)	3194	168	6436
NOx à 6% d'O ₂ (mg/m ³)	193	312	160
SO ₂ à 6% d'O ₂ (mg/m ³)	167	0	0

Tableau 44 : Analyses de combustion réalisées en décembre 2020 par le Syndicat, avec un combustible de type copeaux de bois (CH4)

Les réglages assurés en direct avec l'exploitant ont permis de supprimer les émissions d'oxydes de soufre et de réduire légèrement les émissions de NOx. Les mesures après réglages à un taux de charge à 30 % sont très similaires aux mesures effectuées dans le cadre du projet ACIBIOQA à un taux de charge est identique. Les mesures du Syndicat Départemental ont été déclarées comme conformes car les émissions de SO₂, NOx et CO sont en-dessous des attentes réglementaires lorsque le taux de charge est à 71 %. Un point d'attention a été donné relatif aux émissions de CO qui explosent à charge basse, mais aucune solution n'a été mise en place par la suite (chaudière non ICPE).

	Février 2017	Janvier/Février 2019
CO (mg/Nm ³)	93,1	15,3
NOx (mg/Nm ³)	243,9	244

SO ₂ (mg/Nm ³)	41,1	<i>Pas de mesure</i>
Poussières (mg/Nm ³)	149,3	182
COV (mg/Nm ³)	2,6	<i>Pas de mesure</i>

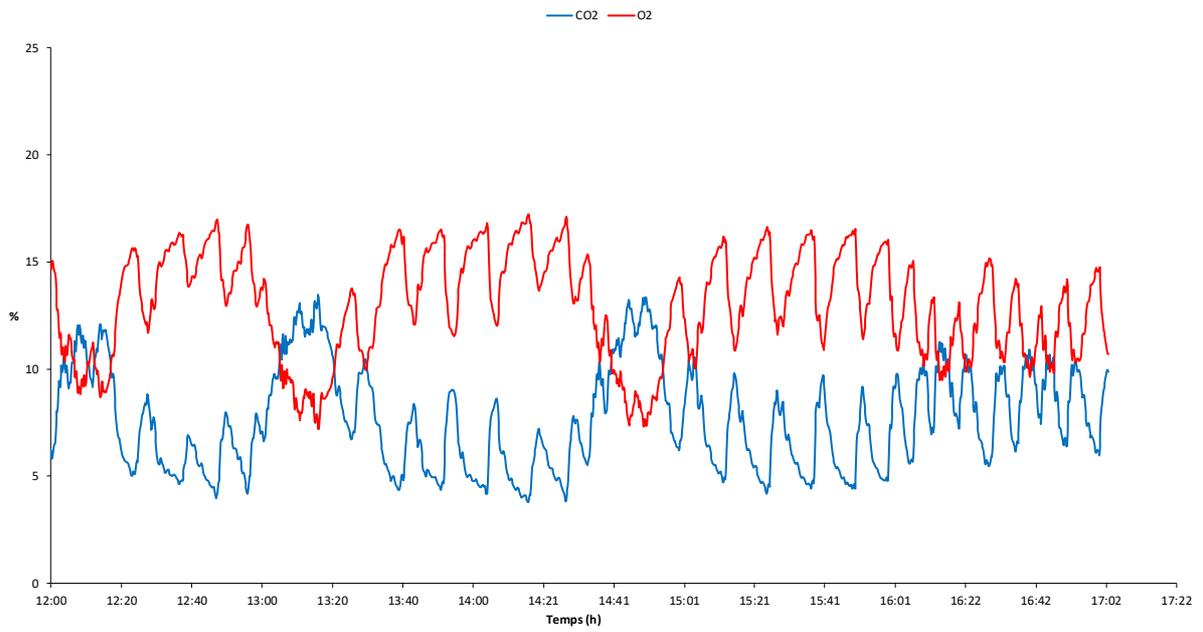
Tableau 45 : Mesures des bureaux de contrôle commandées par le Syndicat Départemental sur la chaudière bois (CH4)

D'autres mesures ont été réalisées en février 2017 : les résultats de mesure indiquent des émissions de poussières légèrement au-dessus des attentes réglementaires, et des émissions de NOx moyennes en dessous des réglementations. Les émissions de CO sont très faibles, laissant penser que les mesures ont été prise lors d'un fonctionnement de la chaudière à un taux de charge élevé. (essais de 90 minutes).

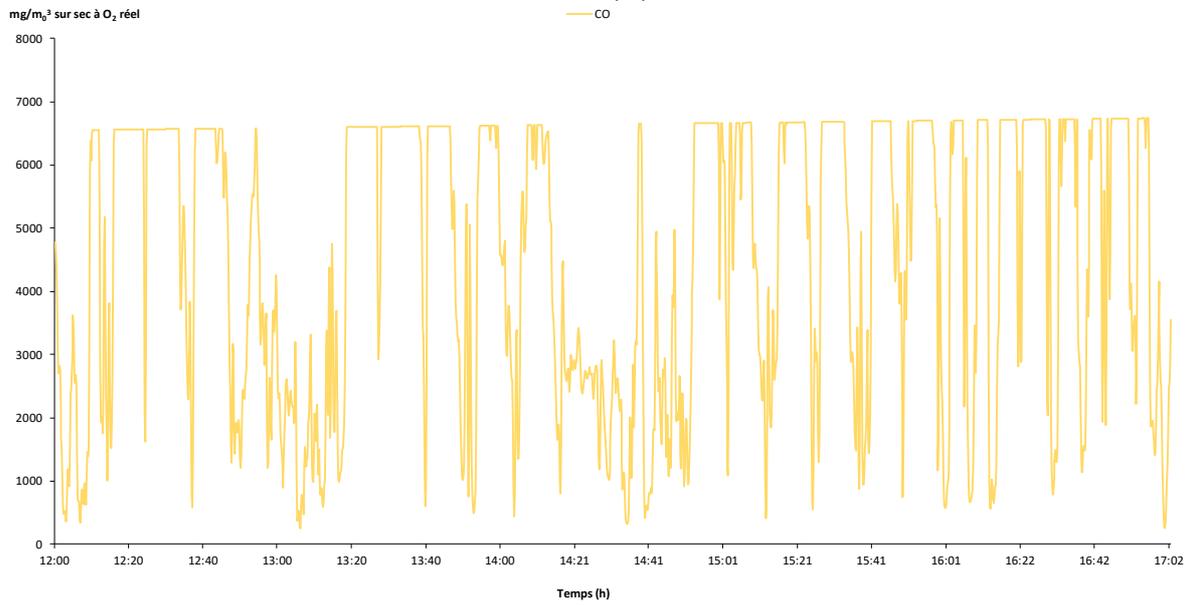
4.3.1. Résultats des campagnes d'essais sur CH4 (720 kW)

Paramètres	Unités	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy.	Jours
Débit sur sec	m ³ /h	715	723		719	
Humidité	%	8,8			8,8	
Température	°C	75	81		78	
		480 min	480 min			
O ₂	%	12,7	12,7		12,7	15-16/12/2020
CO ₂	%	7,4	7,8		7,6	15-16/12/2020
CO	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	5438,3	6310,2		5874,3	15-16/12/2020
NOx	mg/m ³ eq. NO ₂ sur sec à 11% d'O ₂	132,0	140,6		136,3	15-16/12/2020
COVt	mg/m ³ eq. C sur sec à 11% d'O ₂	89,3	350,2		219,8	15-16/12/2020
		40 min	51 min	46 min		
PM (Solide)	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	222,4	254,0	203,0	226,7	15/12/2020
		60 min	60 min	60 min		
PM (solide + condensable)	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	238,0	283,0	290,2	270,4	15/12/2020
		10 min	5 min	3 min		
PM ₁	%	63	71	79	71	13/03/2020
PM _{2,5}	%	11	9	6	9	13/03/2020
PM ₁₀	%	11	13	9	11	13/03/2020
>PM ₁₀	%	15	7	5	9	13/03/2020
		165 min				
Σ 16 Mtx	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	2,2			2,2	15/12/2020
		120 min				
Σ 8 HAPs	µg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	226,7			226,7	16/12/2020
		5 min	3 min	1 min		
EC	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	1,6	0,3	1,7	1,2	16/12/2020
OC	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	5,9	7,5	4,3	5,9	16/12/2020
TC	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	7,6	7,8	6,0	7,1	16/12/2020

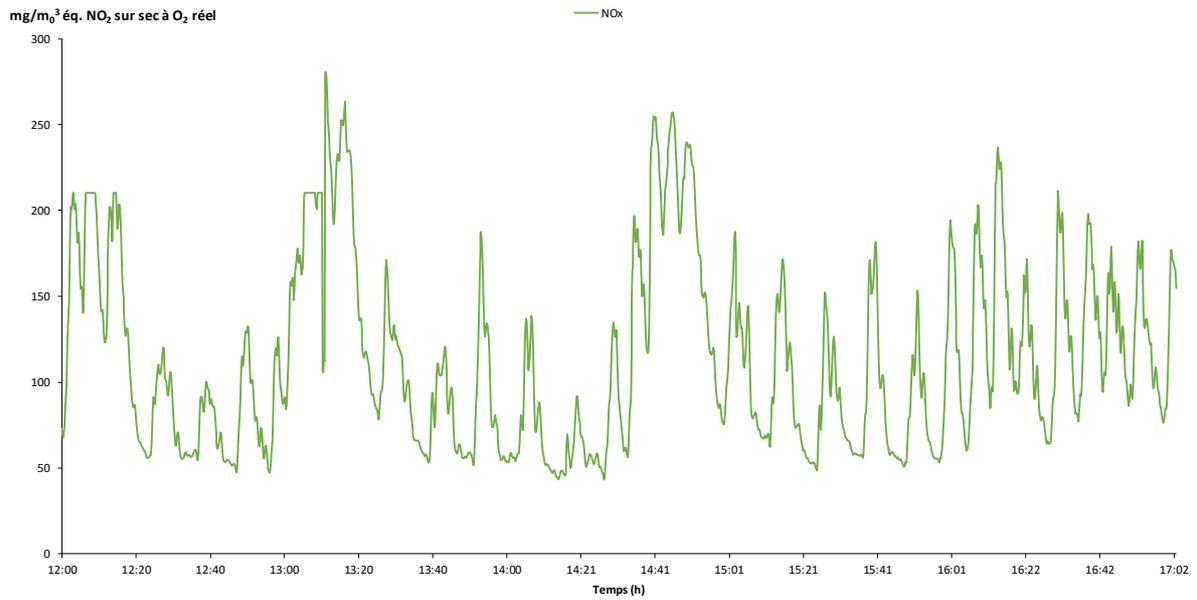
Evolution temporelle de l'O2 et du CO2 pendant les mesures
15/12/2020



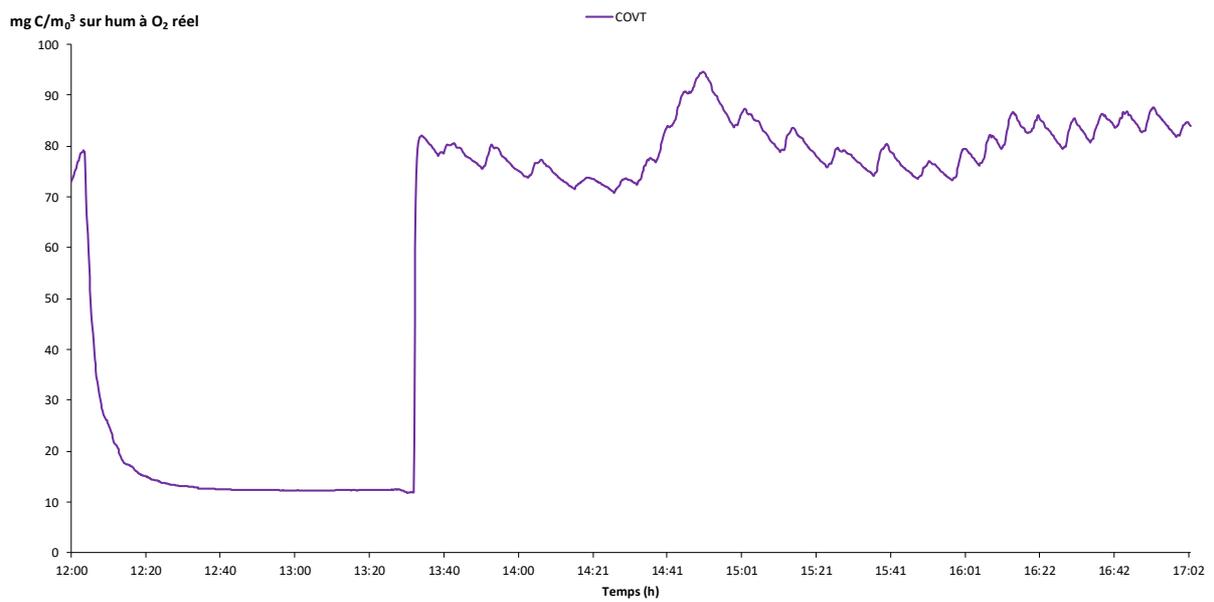
Evolution temporelle du CO pendant les mesures
15/12/2020



Evolution temporelle des NOx pendant les mesures 15/12/2020



Evolution temporelle des COV pendant les mesures 15/12/2020



4.4. Site CH1

4.4.1. Données clés

Maitre d'ouvrage	Syndicat Intercommunal
Puissance bois	150 kW
Puissance appoint	150 kW Fioul
Nombre de chaudière bois	1
Type de filtration	Multicyclone externe
Consommateur(s)	Réseau de chaleur de 350 m (mairie, école, poste, presbytère, maison indiv.)
Type de foyer	Volcan
Type de combustible	Plaquette bocagère (Humidité 25 %, PCI 3,3 MWh/t, granulométrie P45A)

Le silo, semi enterré mesure 5m par 5 m (45 m³ utile) et est équipé d'un dessileur rotatif à pales, pour une autonomie de 1,5 mois. L'accès se fait par le haut pour un déversement gravitaire. Des trappes coulissent pour permettre la livraison du bois.

La chaufferie qui comprend la chaudière fioul mesure 20 m².

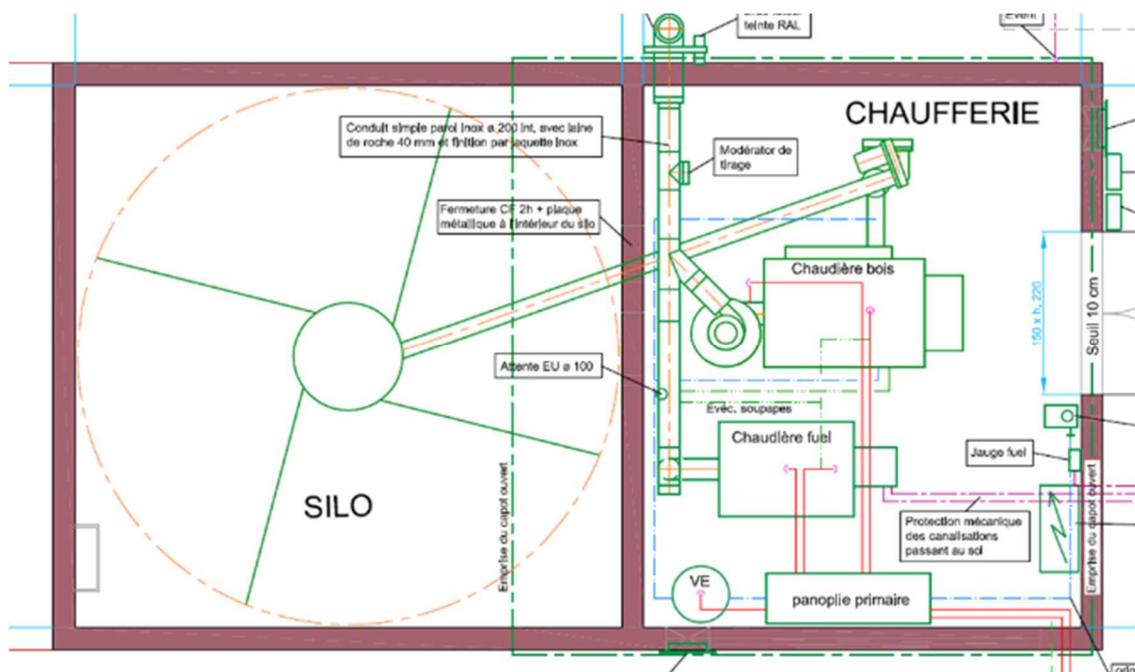


Figure 68 : Plan de la chaufferie CH1

La chaudière bois et la chaudière fioul sont branchées sur le même conduit de fumées.

Le combustible utilisé est la plaquette bocagère issues de l'exploitation des espaces verts de la commune (plateforme à 14 km).

L'évacuation et le stockage des cendres se fait avec un bac cendrier manuel. Celles-ci sont ensuite épandues dans les espaces verts de la commune.

La production de la chaudière bois est évaluée grâce à un comptage énergétique.

4.4.2. Compatibilité pour la réalisation des mesures

La trappe disponible sur le conduit de la cheminée ne dispose pas des longueurs aval et amont nécessaires à la bonne réalisation des mesures. La création de trappes en extérieur est possible malgré le dénivelé.

Le site est retenu dans le panel des projets qui a été instrumentés.

4.4.3. Analyse fonctionnelle

La chaudière CH1 date d'une dizaine d'année, elle a très peu de problèmes techniques. La chaufferie et le réseau sont exploités en régie par le Syndicat. L'entretien courant est délégué à la Commune (un passage par jour) ce qui permet de réduire le tarif P2 du réseau. La chaufferie tourne uniquement pendant la saison de chauffe et dessert un réseau de chaleur de 350 m. Le taux de couverture biomasse est proche de 100%. Le fioul est utilisé en cas de panne ou en début et fin de saison.

Sur l'année 2018, le rendement de la chaudière est évalué à 72 %. La puissance souscrite du réseau (évaluée au moment des études) est 114 kW.

La chaudière est surdimensionnée, avec un nombre important de cycles sur une journée. Le constructeur est néanmoins favorable à ce surdimensionnement qui améliore la durée de vie de l'équipement.

D'un point de vue analyse économique globale, le surdimensionnement impacte l'investissement au départ du projet, génère des coûts d'achat de combustible plus importants (rendement très dégradé) ce qui pourrait largement compenser des frais de renouvellements plus importants tout en réduisant l'impact sur l'environnement (meilleure combustion et moins de consommation).

La chaufferie n'étant pas soumise au régime ICPE 2910 (à partir de 1 MW) il n'y a aucun contrôle des émissions.

4.4.4. Résultats de la campagne de mesure

La chaudière a un fonctionnement automatique dit « de tout ou rien ». Lors de la campagne de mesure, la chaudière fonctionnait à une allure ralentie approximative de 50 % de sa charge nominale.

4.4.5. Débit, humidité, température de l'effluent

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Moyennes
Débit sur sec (m ³ /h)	2	360 minutes	327
Humidité (%)	1	157 minutes	7,7
Température (°C)	2	360 minutes	108

Tableau 46 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH1)

4.4.6. Gaz de combustion

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6 % d'O ₂	Concentration moyenne à 10 % d'O ₂
O ₂ (%)	2	360 minutes	16,6		
CO ₂ (%)			3,6		
CO (mg/m ³)			1017,6	3043,0	2555,0
NO _x (mg/m ³)			120,1	356,3	293,6
COVt (mg/m ³)			60,8	180,6	151,9

Tableau 47 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH1)

4.4.7. Particules solides et condensables

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6 % d'O ₂	Concentration moyenne à 10% d'O ₂
PM (Solide) (mg/m ³)	3	52 minutes	121,4	483,5	353,7
PM (Solide + condensable) (mg/m ³)	3	37 minutes	140,5	504,0	353,5
PM (condensables) (mg/m ³)	3		23,9	83,1	60,8
PM ₁ (%)	3	10 minutes	97		
PM _{2,5} (%)			3		
PM ₁₀ (%)			0		
>PM ₁₀ (%)			0		

Tableau 48 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH1)

4.4.8. Métaux, HAP, Carbone Suie et Classes de volatilité

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6 % d'O ₂	Concentration moyenne à 10% d'O ₂
Somme 16 Métaux (mg/m ³)	1	157 minutes	1,8	7,0	5,1
Somme 8 HAP (µg/m ³)	1	154 minutes	34,5	176,6	129,5
Carbon suie (mg/m ³)	3	1 minute	5,4	84,4	61,0
Classes de Volatilité (ng/m ³)	3	37 minutes	En attente d'analyse		

Tableau 49 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH1)

4.4.9. Interprétation des résultats

La chaudière CH1 a une puissance inférieure à 500 kW et le site n'est pas ICPE. Il est soumis à l'arrêté du 15 septembre 2009 (entretien des chaudières, qui n'est pas adapté à la réalité du terrain) et aux exigences de l'UE du 28 avril 2015. Il n'est pas soumis au fonds chaleur de l'ADEME car trop petit.

Émissions	Résultats à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Attentes Réglementaires à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Conclusions
Poussières	484	Arrêté du 15/09/2009 : 80 Exigences UE : 60	<ul style="list-style-type: none"> Au-delà des attentes réglementaires malgré la présence d'un multicyclone qui devrait théoriquement abaisser les poussières à un niveau d'environ 225 mg/Nm³. Surplus d'émissions (~17 %) dû à la partie condensable des PM₁
CO	3043	Exigences UE : 750	<ul style="list-style-type: none"> Bien au-delà des attentes réglementaires des sites plus importants en taille Combustion incomplète
NO _x	356	Exigences UE : 300	<ul style="list-style-type: none"> Émissions modérées, légèrement au-dessus des attentes réglementaires de l'UE. Combustible peu chargé en azote
COV	180	Arrêté du 15/09/2009 : 13 Exigences UE : 30	<ul style="list-style-type: none"> Émissions très supérieures aux attentes réglementaires

Tableau 50 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation (CH1)

Sur cette chaufferie nous avons identifié un rendement de production très médiocre proche de 70 % ce qui traduirait une combustion incomplète et des donc des émissions de poussières et de CO élevées.

Le combustible utilisé est de la plaquette bocagère ; étant donné les résultats sur les NO_x, nous pouvons penser que ce combustible est très faiblement chargé en azote.

L'analyse de la courbe O₂ sur une journée montre que la chaudière réalise une succession de cycle on-off de 20 min (10 % d'O₂ correspond à une charge maximale, 20 % O₂ à un arrêt). Rappelons que la chaudière est surdimensionnée ce qui accentue ce fonctionnement en cycle très court.

Au regard des résultats sur les émissions de poussières et de CO, il semble que ce fonctionnement par cycle accentué par le surdimensionnement de la chaudière engendrerait des émissions bien plus élevées qu'un fonctionnement en pleine charge (engagement constructeur).

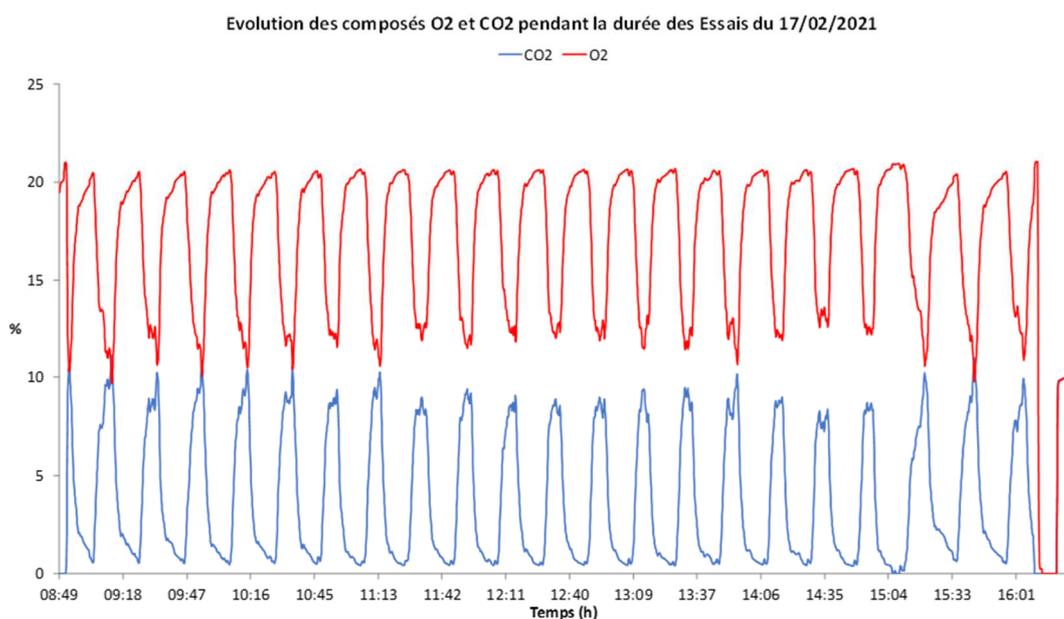


Figure 69 : Courbe O₂ et CO₂ pour les essais du 17 février 2021 (CH1)

4.4.10. Entretien constructeur

Les émissions de poussières peuvent être générées par trois causes :

- la qualité du combustible, la présence importante de fines augmentant la quantité de poussières dans les fumées ;
- le tirage de la cheminée, un excès de tirage augmentant la quantité de poussières dans les fumées ;
- le nombre de cycles, la production de poussières étant plus importante à l'allumage et à l'extinction (température de foyer plus faible qu'en plein charge).

Le fonctionnement par cycle est caractéristique de leurs chaudières comme la majorité des chaudières bois. Si la consigne est de 85 °C, la chaudière est en plein charge pour atteindre 85 °C puis elle module entre 30 % (minimum technique) et 100 % jusqu'à 89 °C (4 à 5 °C). A cette température, la chaudière se met en veille jusqu'à ce que la température redescende en dessous de 78 °C.

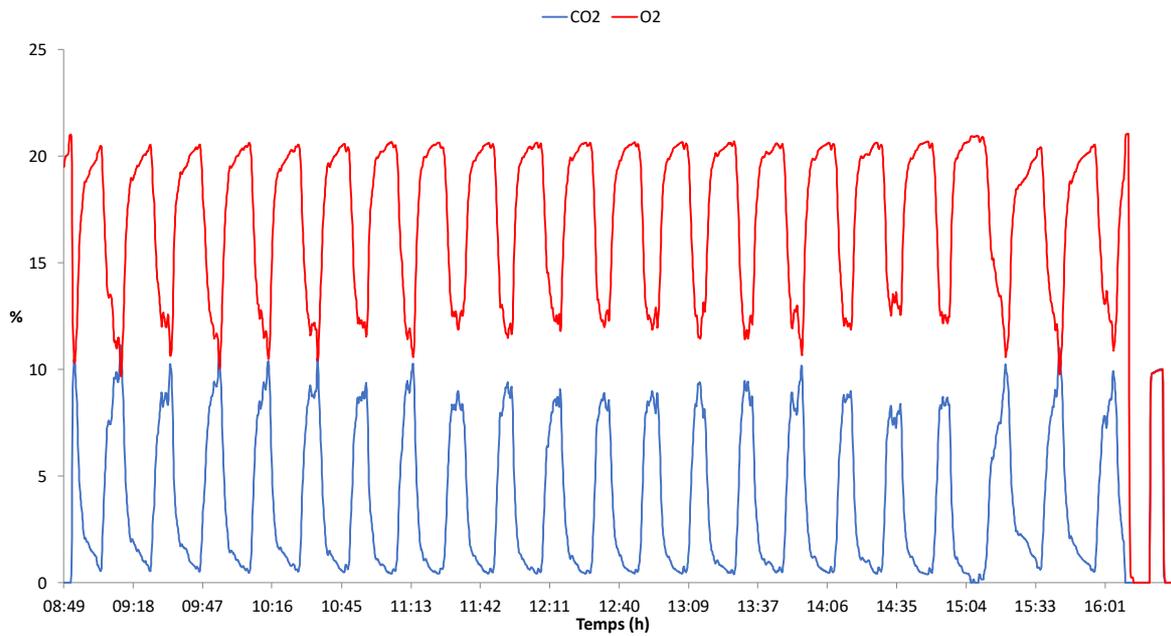
Pour diminuer le nombre de cycles, le constructeur est favorable à la mise en place d'un ballon qui permet d'augmenter la durée des cycles : Temps de chauffe du ballon + temps de décharge du ballon = plusieurs heures au lieu d'un cycle de 20 min.

Il est possible aussi de jouer sur les différences de températures en abaissant la consigne à 80 °C au lieu de 90 °C, la plage de modulation passant de 5 °C à 10 °C ce qui rallonge un peu les cycles.

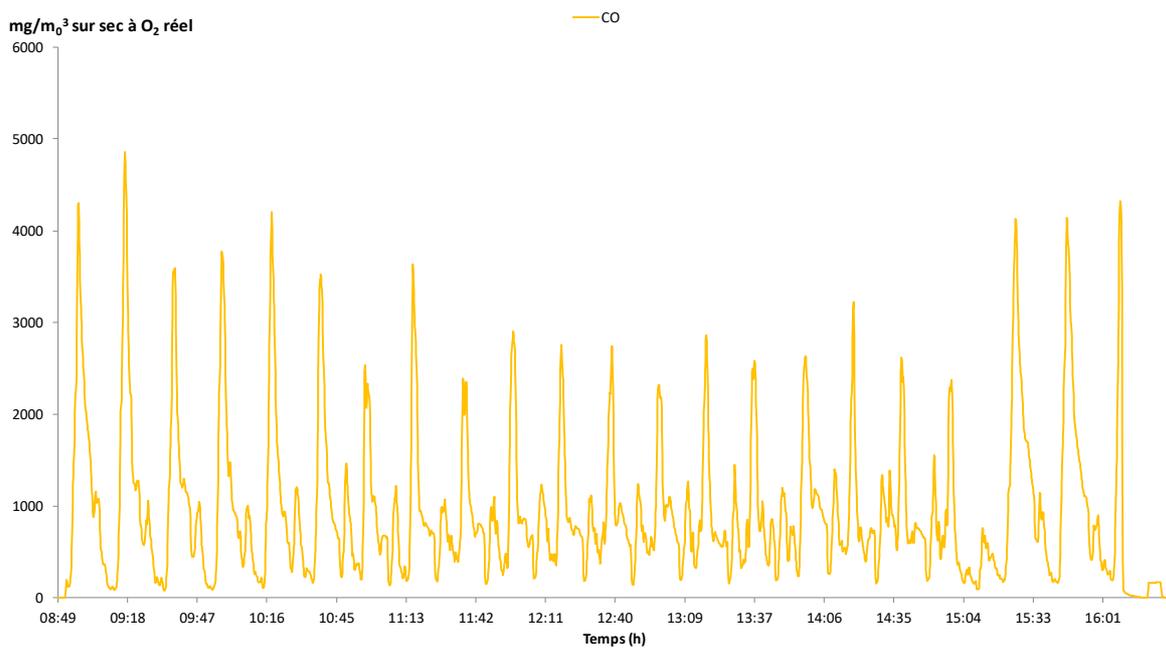
4.4.11. Résultats des campagnes d'essais sur CH1 (150 kW)

Paramètres	Unités	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy.	Jours
Débit sur sec	m ⁰ ³ /h	327	327		327	17/02/2021
Humidité	%	7,7			7,7	17/02/2021
Température	°C	108	108		108	
		300 min	420 min			
O ₂	%	15,9	16,6		16,6	16-17/02/2021
CO ₂	%	3,4	3,7		3,6	16-17/02/2021
CO	mg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	2160,1	2949,8		2555,0	16-17/02/2021
NO _x	mg/m ⁰ ³ eq. NO ₂ sur sec à 10% d'O ₂	251,2	336,0		293,6	16-17/02/2021
COVt	mg/m ⁰ ³ eq. C sur sec à 10% d'O ₂	134,2	169,5		151,9	16-17/02/2021
		50 min	65 min	42 min		
PM (SP)	mg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	360,1	301,4	399,5	353,7	17/02/2021
		30 min	51 min	30 min		
PM (TSP)	mg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	377,5	329,1	353,8	353,5	16/02/2021
		10 min	10 min	10 min		
PM ₁	%	96	97	97	97	18/02/2013
PM _{2,5}	%	3	2	4	3	18/02/2013
PM ₁₀	%	0	1	0	0	18/02/2013
>PM ₁₀	%	1	0	0	0	18/02/2013
		157 min				
Σ 16 Mtx	mg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	5,1			5,1	17/02/2021
		154 min				
Σ 8 HAPs	µg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	129,5			129,5	17/02/2021
		2 min	1 min	1 min		
EC	mg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	6,9	0,0	0,0	2,3	16/02/2021
OC	mg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	70,6	63,7	40,8	58,4	16/02/2021
TC	mg/m ⁰ ³ sur sec à 10% d'O ₂	78,2	63,7	40,8	61,0	16/02/2021

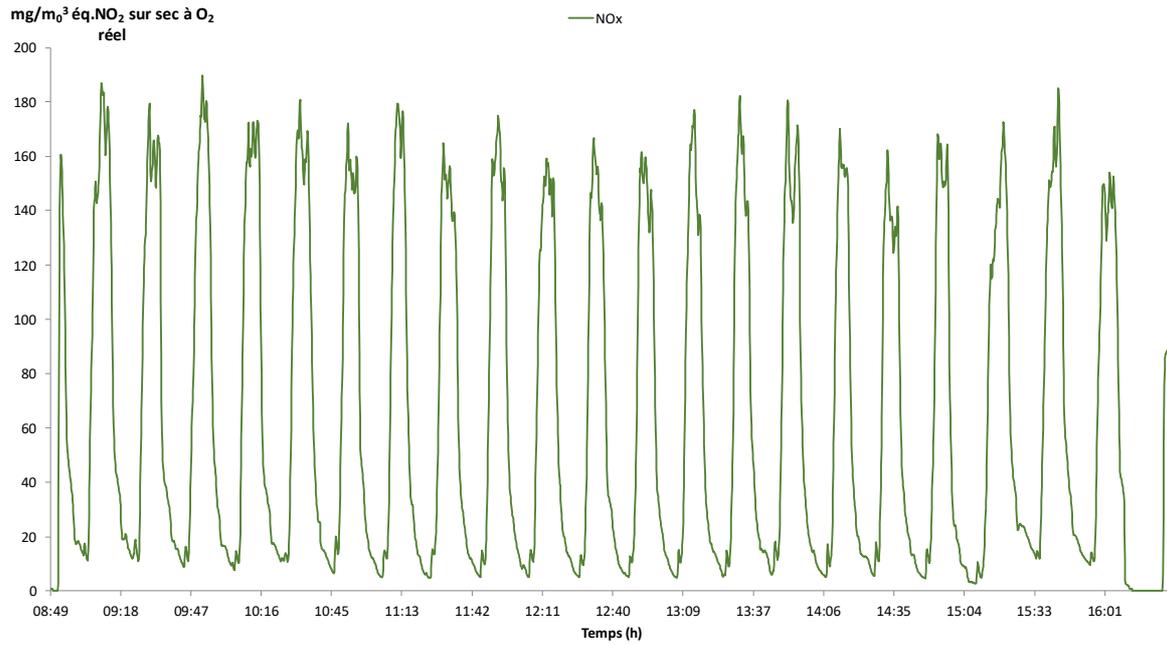
Evolution des composés O2 et CO2 pendant la durée des Essais du 17/02/2021



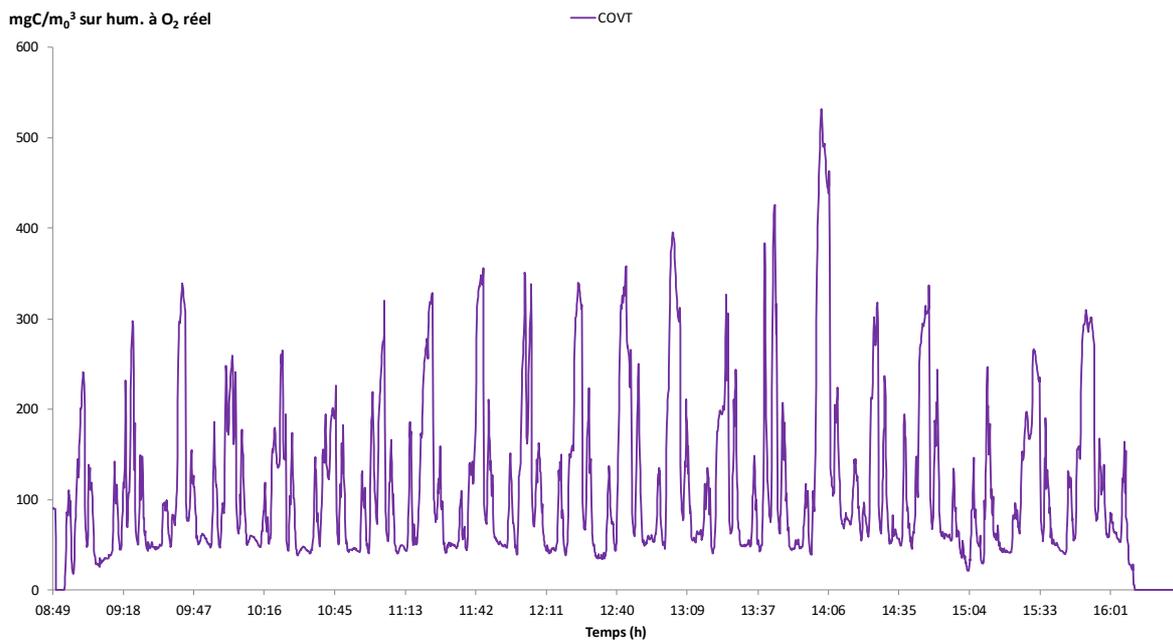
Evolution du composé CO pendant la durée des Essais du 17/02/2021



Evolution des composés NOx pendant la durée des Essais du 17/02/2021



Evolution des composés COVT pendant la durée des Essais du 17/02/2021



4.5. Site CH2

4.5.1. Données clés

Maitre d'ouvrage	Parc Naturel Régional
Puissance bois	400 kW
Puissance appoint	pas d'appoint
Nombre de chaudière bois	2 (2x200kW)
Type de filtration	aucune
Consommateur(s)	Réseau de chaleur de 360 m (8 bâtiments : bureaux, musées, offices du tourisme et restaurant)
Type de foyer	Volcan
Type de combustible	Bois d'élagage (Humidité 30 %)

Le silo, semi enterré mesure 5,5 m par 5 m (50 m³ utile) et est équipé d'un dessileur rotatif à pales, pour une autonomie de 2 semaines. L'accès se fait par le haut pour un déversement gravitaire. Des trappes coulissent pour permettre la livraison du bois.

La chaufferie qui comprend les deux chaudières bois mesure 33 m².

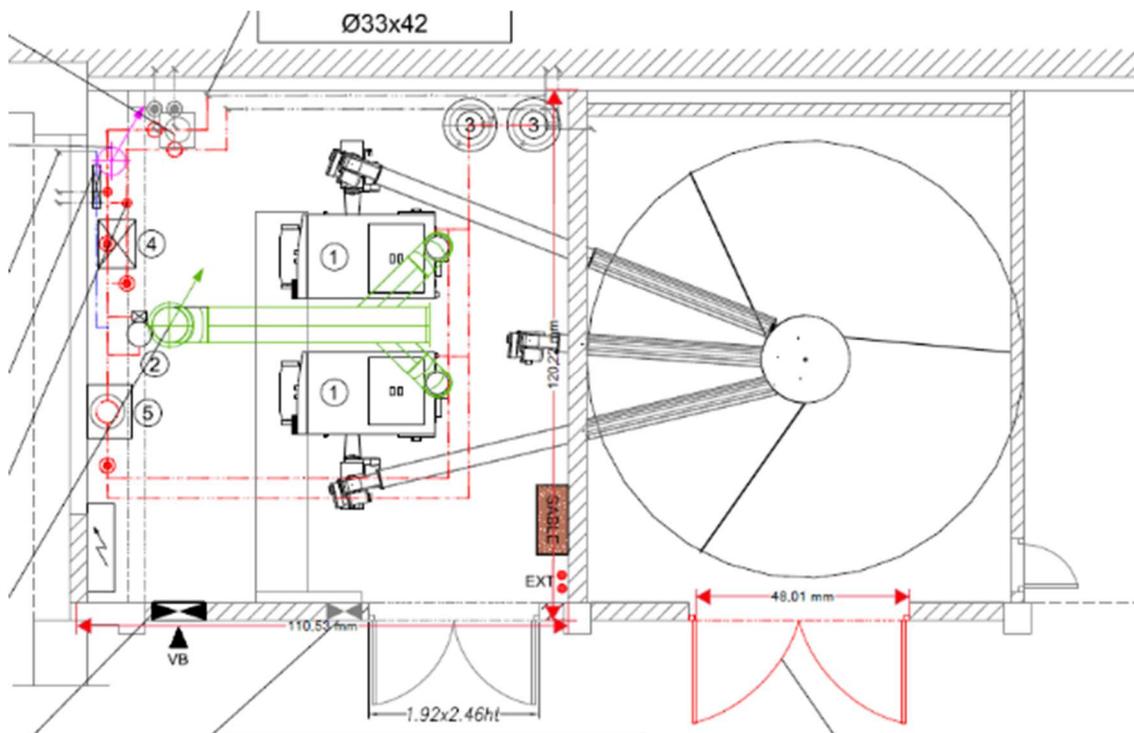


Figure 70 : Plan de la chaufferie CH2

Les chaudières bois sont branchées sur le même conduit de fumées.

Le combustible utilisé est le bois d'élagage du site.

L'évacuation et le stockage des cendres se fait avec un bac cendrier manuel. Celles-ci sont ensuite épandues dans les espaces verts du site. La production de la chaudière bois est évaluée grâce à un comptage énergétique.

4.5.2. Compatibilité pour la réalisation des mesures

Cette chaufferie n'a pas de trappe mais la cheminée (conduit de gauche) est directement accessible depuis une plateforme non couverte. Néanmoins il est possible de créer une trappe.

Le site est retenu dans le panel de projet avec, au préalable, la création d'une trappe.

4.5.3. Analyse fonctionnelle

La chaufferie date de 2016. La chaufferie et le réseau sont exploités par le syndicat du Parc. L'entretien courant est délégué aux agents du Parc (1 passage par jour). La chaufferie tourne uniquement sur la saison de chauffe et dessert l'ensemble des bâtiments du Parc.

Le projet a été dimensionnée pour fonctionner 100 % à la biomasse sans appoint depuis le choix de la mise en place de deux chaudières de 200 kW. Elles fonctionnent en cascade toutes les 30 heures.

Aucun incident important n'a été noté depuis leur mise en service.

Le rendement est inconnu car il n'y a pas de suivi des quantités de bois. La puissance souscrite du réseau (évaluée au moment des études) est 448 kW.

La chaufferie n'étant pas soumise au régime ICPE 2910 (à partir de 1 MW) il n'y a aucun contrôle des émissions.

4.5.4. Résultats de la campagne de mesures

La chaudière a un fonctionnement automatique dit « de tout ou rien ». Lors de la campagne de mesure, la chaudière fonctionnait à une allure ralentie approximative de 40 % de sa charge nominale due à la faible affluence de personnel dans les locaux.

4.5.5. Débit, humidité, température de l'effluent

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Moyennes
Débit sur sec (m ³ /h)	3	260 minutes	449
Humidité (%)	1	184 minutes	21
Température (°C)	3	260 minutes	75

Tableau 51 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH2)

4.5.6. Gaz de combustion

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 10% d'O ₂
O ₂ (%)	3	260 minutes	14,3		
CO ₂ (%)			6,7		
CO (mg/m ₀ ³)			1099,9	2508,6	1835,2
NO _x (mg/m ₀ ³)			157,8	358,5	262,3
COVt (mg/m ₀ ³)			62,5	142,2	104,0

Tableau 52 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH2)

4.5.7. Particules solides et condensables

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 10% d'O ₂
PM (Solide) (mg/m ₀ ³)	3	62 minutes	77,2	133,7	97,8
PM (Solide + condensable) (mg/m ₀ ³)	3	86 minutes	66,6	135,9	99,4
PM (condensables) (mg/m ₀ ³)	3		29,2	54,2	39,6
PM ₁ (%)	3	28 minutes	93		
PM _{2,5} (%)			5		
PM ₁₀ (%)			1		
>PM ₁₀ (%)			1		

Tableau 53 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH2)

4.5.8. Métaux, HAP, Carbone Suie et Classes de volatilité

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 10% d'O ₂
Somme 16 Métaux (mg/m ₀ ³)	1	184 minutes	0,6	1,1	0,8
Somme 8 HAP (µg/m ₀ ³)	1	60 minutes	35,2	54,5	39,9
Carbon suie (mg/m ₀ ³)	3	6 minutes	2,2	6,6	3,5
Classes de Volatilité (ng/m ₀ ³)	3	86 minutes	En attente d'analyse		

Tableau 54 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH2)

4.5.9. Interprétation des résultats

La chaudière du Parc a une puissance inférieure à 500 kW et le site n'est pas ICPE. Il est soumis à l'arrêté du 2 octobre 2009 et aux exigences de l'UE du 28 avril 2015. Il n'est pas financé par le Fonds chaleur de l'ADEME car trop petit.

Émissions	Résultats à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Attentes Réglementaires à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Engagement constructeur Valeurs converties à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Conclusions
Poussières	134	Arrêté du 02/10/2009 : 225 Exigences UE : 60	31 – 36 (à 100 % de charge)	<ul style="list-style-type: none"> Les turbulateurs dans la chaudière permettent de modérer les émissions mais elles restent au-dessus des attentes de l'UE Surplus d'émissions (~40%) dû à la partie condensable des PM1 Attention mesure sur 1 heure = chaudière « On », ne prend pas en compte les phases « Off »
CO	2509	Exigences UE : 750	9 (à 100 % de charge)	<ul style="list-style-type: none"> Bien au-delà des attentes réglementaires des sites plus importants en taille Combustion incomplète Mesures sur 3 heures, donc prend en compte les phases « Off »
NOx	358	Arrêté du 02/10/2009 : 750 Exigences UE : 300	321 – 343 (à 100 % de charge)	<ul style="list-style-type: none"> Émissions modérées, légèrement au-dessus des attentes réglementaires de l'UE. Combustible peu chargé en azote
COV	142	Exigences UE : 30	6 (à 100 % de charge)	<ul style="list-style-type: none"> Émissions très supérieures aux attentes réglementaires

Tableau 55 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences réglementaires et à l'engagement constructeur (fiche technique) (CH2)

Sur cette chaufferie nous n'avons pas d'information sur le rendement car il n'y a pas de suivi des quantités de bois en entrée. Lors de la campagne de mesure, le taux de charge a été évalué à 40 % ce qui pourrait expliquer les émissions de CO importantes. La campagne de mesure s'est déroulée en période Covid et sur une semaine de février très clémente en termes de conditions météo.

Le combustible utilisé est du bois d'élagage en provenance directe du site (zone très rurale) ; étant donné les résultats sur le NOx, nous pouvons penser que ce combustible est très faiblement chargé en azote.

L'analyse de la courbe O₂ sur une journée montre que la chaudière réalise des cycles de 2 heures avec oscillation autour du point de consigne pendant 1 heure et arrêt pendant 1 heure.

Comme pour le site CH1, il semble que le fonctionnement par cycle engendre des émissions bien plus élevées pour les CO qu'un fonctionnement en pleine charge (engagement constructeur).

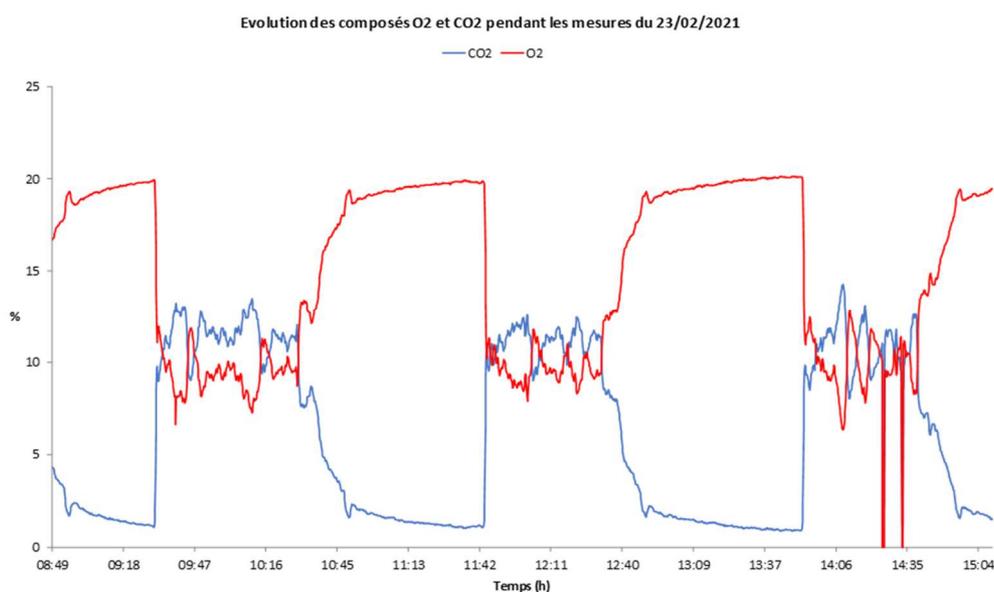


Figure 71 : Courbe O₂ et CO₂ pour les essais du 23 février 2021

4.5.10. Entretien constructeur

Les émissions de poussières peuvent être générées par 3 causes :

- la qualité du combustible, la présence importante de fines augmentant la quantité de poussières dans les fumées ;
- le tirage de la cheminée, un excès de tirage augmente la quantité de poussières dans les fumées (maxi de 10 Pa sur la gamme Eco et 20 Pa sur la gamme WTH) ;
- le nombre de cycles, la production de poussières étant plus importante à l'allumage et à l'extinction (température de foyer plus faible qu'en pleine charge).

Le fonctionnement par cycle est caractéristique de leurs chaudières comme la majorité des chaudières bois.

Si la consigne est de 85 °C, la chaudière est en pleine charge pour atteindre 85 °C puis elle module entre 30 % (minimum technique) et 100 % jusqu'à 89 °C (4 à 5 °C). A cette température, la chaudière se met en veille jusqu'à ce que la température redescende en dessous de 78 °C.

Pour diminuer le nombre de cycle le constructeur est favorable à la mise en place d'un ballon qui permet d'augmenter la durée des cycles : Temps de chauffe du ballon + temps de décharge du ballon = plusieurs heures au lieu d'un cycle de 20 min.

Il est possible aussi de jouer sur les différences de températures en abaissant la consigne à 80 °C au lieu de 90 °C, la plage de modulation passant de 5 °C à 10 °C ce qui rallonge un peu les cycles.

Pour les chaudières de cette gamme, les essais en usines donnent les résultats suivants :

Paramètres	30 % de charge	100 % de charge
Poussières (mg/Nm ³)	12-16	21-24
CO (mg/Nm ³)	37	6
NOx (mg/Nm ³)	121-135	214-229
COV (mg/Nm ³)	< 3	4

Tableau 56 : Résultats des essais en usine pour les chaudières de cette gamme

Les émissions de poussières de la chaudière sont en pratique quatre fois supérieures aux valeurs prévues par le constructeur à 100 % de charge : 97.8 mg/Nm³ pour une valeur annoncée d'environ 21-24 mg/Nm³.

Les émissions de NOx se situent autour de 260 mg/Nm³, ce qui est légèrement supérieur à la limite indiquée par le constructeur de 214-229 mg/Nm³.

Les émissions de COVs réelles de la chaudière sont plus hautes (~100 mg/Nm³) que la valeur prévue par le constructeur de 4 mg/Nm³ à 100 % de charge.

Les émissions de CO sont très largement supérieures aux valeurs du constructeur qui indique que pour ce type de chaudière des émissions de CO sont autour de 6 mg/Nm³ à 100 % de charge et les émissions mesurées sur le site sont de l'ordre de 1800 mg/Nm³.

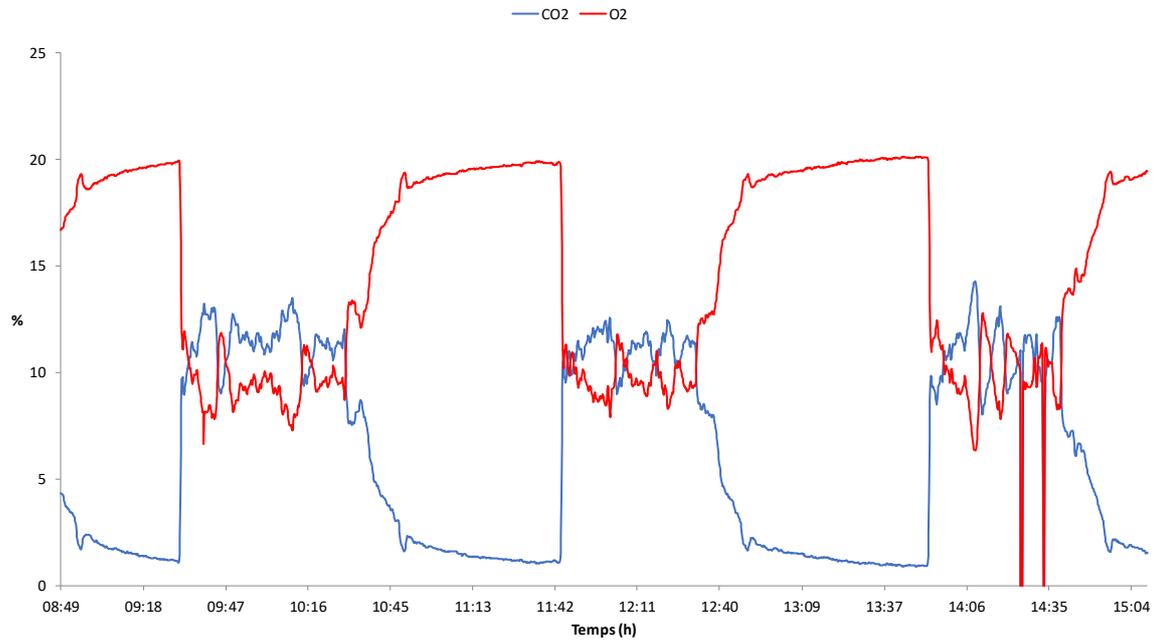
Le constructeur est conscient que ces résultats sont obtenus en laboratoire et donc non représentatif des conditions réelles. Ces résultats devraient cependant être approchés lorsque la chaudière est à pleine charge donc lorsque l'O₂ est proche de 10 %.

Les données du constructeur ne prennent peut-être pas en compte la baisse de la qualité de la combustion lors des arrêts et démarrages de la chaudière réguliers dus au fonctionnement par cycle.

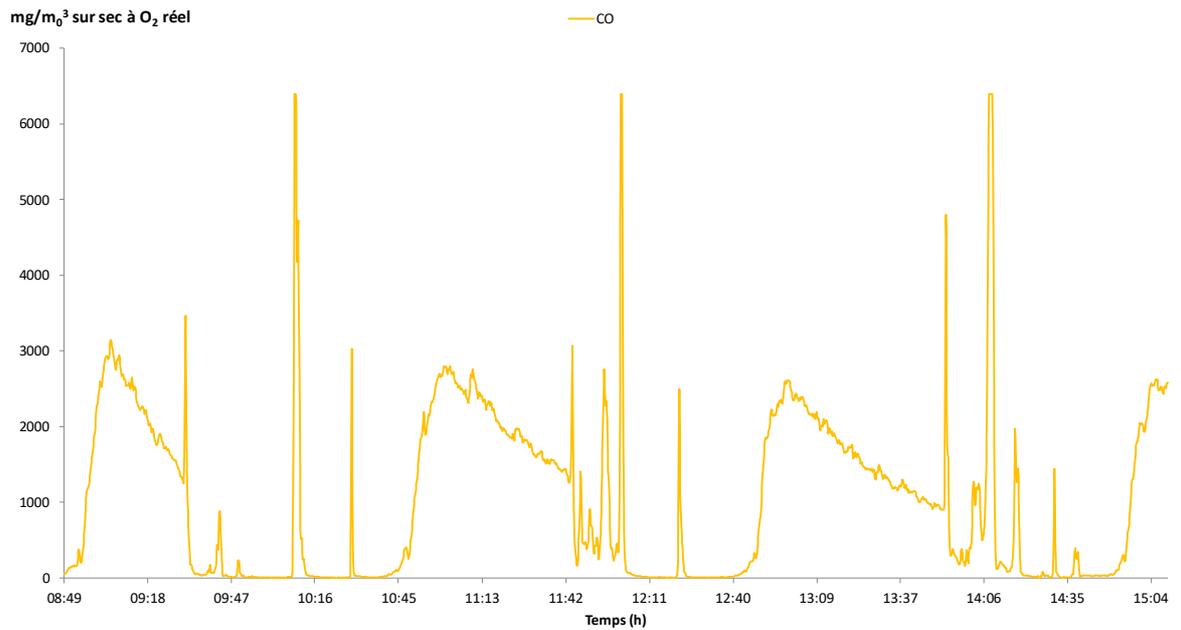
4.5.11. Résultats des campagnes d'essais sur CH2 (200 kW)

Paramètres	Unités	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy.	Jours
Débit sur sec	m ³ /h	447	448	456	449	
Humidité	%	8,2			8,2	
Température	°C	73	77	75	75	
		360 min	240 min	180 min		
O ₂	%	14,8	14,5	13,7	14,3	23-24-25/02/2021
CO ₂	%	6,1	6,6	7,3	6,7	23-24-25/02/2021
CO	mg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	1818,8	2042,6	1644,1	1835,2	23-24-25/02/2021
NOx	mg/m ³ eq. NO ₂ sur sec à 10% d'O ₂	264,9	263,5	258,4	262,3	23-24-25/02/2021
COVt	mg/m ³ eq. C sur sec à 10% d'O ₂	70,2	145,9	95,8	104,0	23-24-25/02/2021
		60 min	60 min	64 min		
PM (SP)	mg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	47,6	185,0	60,8	97,8	24/02/2021
		80 min	110 min	67 min		
PM (TSP)	mg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	82,0	79,3	137,0	99,4	23/02/2021
		25 min	39 min	20 min		
PM ₁	%	85	97	98	93	23/02/2021
PM _{2,5}	%	8	4	2	5	23/02/2021
PM ₁₀	%	3	0	0	1	23/02/2021
>PM ₁₀	%	4	0	0	1	23/02/2021
		184 min				
Σ 16 Mtx	mg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	0,8			0,8	24/02/2021
		60 min				
Σ 8 HAPs	µg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	39,9			39,9	23/02/2021
		6 min	5 min	6 min		
EC	mg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	0,2	0,2	0,3	0,2	23/02/2021
OC	mg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	7,0	1,8	0,9	3,2	23/02/2021
TC	mg/m ³ sur sec à 10% d'O ₂	7,1	2,0	1,2	3,5	23/02/2021

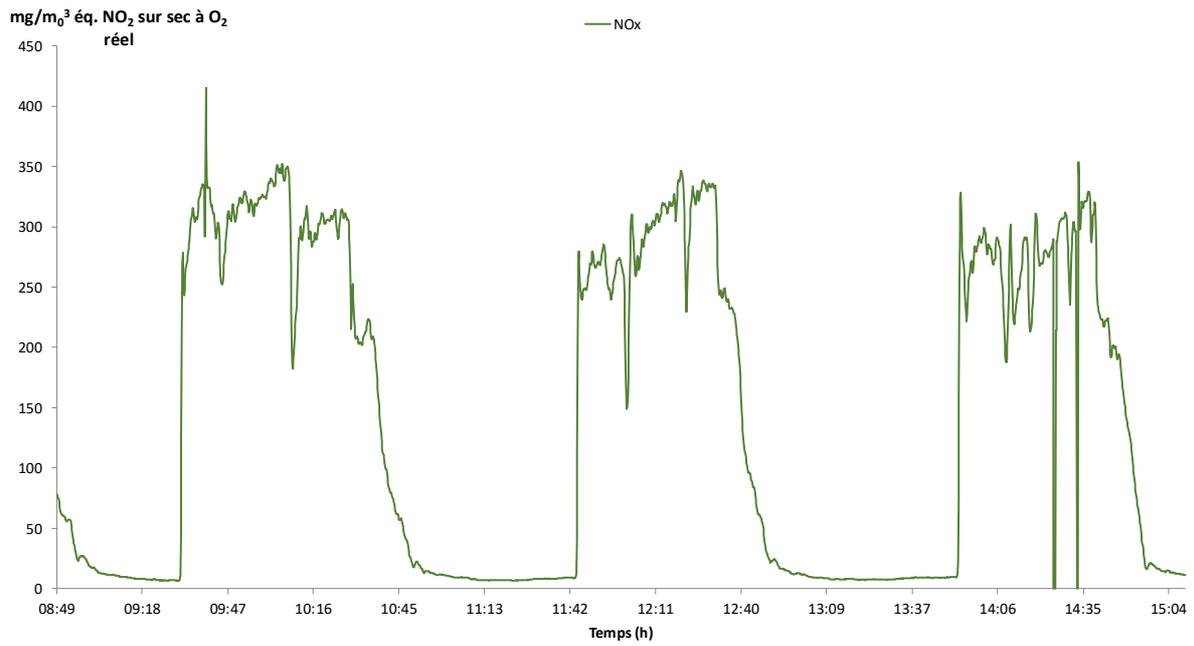
Evolution des composés O2 et CO2 pendant les mesures du 23/02/2021



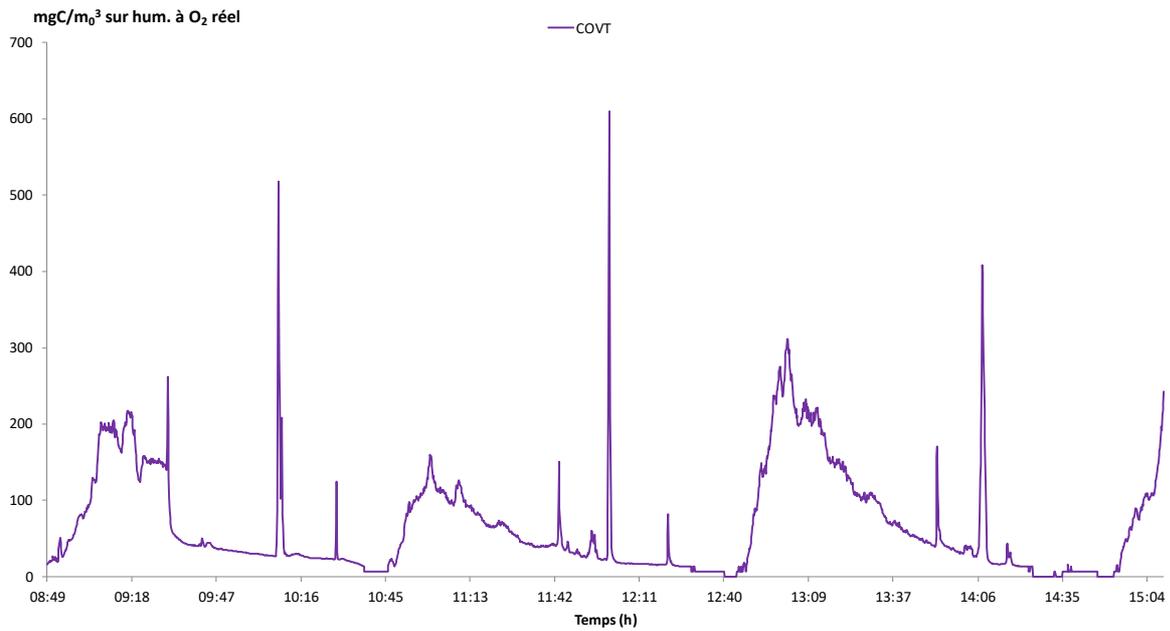
Evolution du composé CO pendant les mesures du 23/02/2021



Evolution des NOx pendant les mesures du 23/02/2021



Evolution des composés COVt pendant les mesures du 23/02/2021



4.6. Site CH3

4.6.1. Données clés

Maitre d'ouvrage	École privée
Puissance bois	800 kW
Puissance appoint	1150 kW (gaz)
Nombre de chaudière bois	2 (300 + 500 kW)
Type de filtration	Deux cyclones ACS
Consommateur(s)	Réseau de chaleur (privé: campus scolaire avec internat campus scolaire, piscines)
Type de foyer	Grille mobile
Type de combustible	Plaquettes forestières (Humidité 20 à 30 %)

Le silo enterré de 90 m³ est équipé d'un dessileur rotatif et a une autonomie de 2 à 3 jours en période de fonctionnement pleine puissance. L'accès se fait par le haut pour un déversement gravitaire.

Le combustible utilisé est du bois déchiqueté et des plaquettes forestières, provenant d'un fournisseur à 15 – 20 kilomètres, pour une humidité de 20 à 30 %. Le combustible est transféré aux chaudières par vis sans fin puis par chaîne de remontée dans une boîte de répartition. La chaufferie est entrée dans le programme européen AgroBioHeat et va prochainement tester les sarments de vigne.

Les chaudière bois et la chaudière gaz possèdent deux conduits de fumées distincts. Le conduit des chaudières bois est en DN500, double paroi.

Chaque chaudière est équipée d'un cyclone. Les cendres sous foyer sont aspirées et stockées dans un bâtiment externe, puis fournies à un agriculteur local pour épandage. Les cendres volantes sont stockées sous les cyclones.

4.6.2. Compatibilité pour la réalisation des mesures

Il n'y avait pas de trappes sur les conduits de fumées, elle a été créé pour le projet.

Le conduit en extérieur n'est pas très haut (environ 2 m).

Une trappe peut éventuellement être créée sur les carneaux verticaux en sortie des cyclones.

Pour réaliser les mesures, il a été nécessaire de mettre une des deux chaudières à l'arrêt.

Le site a été retenu pour les mesures avec création d'une trappe en sortie de la filtration sur la chaudière de 500 kW.

4.6.3. Analyse fonctionnelle

La chaufferie CH3 date de 2017. Elle est exploitée par une entreprise qui passe deux fois par semaine sur site. L'entretien courant est fait en interne, avec un technicien qui vient deux fois par semaine.

La chaufferie tourne toute l'année et dessert un réseau de chaleur privé. Elle alimente les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire du campus scolaire, équipé d'un internat et de plusieurs piscines. Les chaudières bois sont mises à l'arrêt 2 à 3 fois par an, sur une durée de 2 jours, pour entretien.

Le taux de couverture biomasse est d'environ 80 %. Le gaz est utilisé en appoint en cas de fortes demandes en période hivernale, en secours si besoin.

Les cendres sont récupérées par un agriculteur.

Pendant 3 ans la chaufferie a très mal fonctionné à cause du matériel et du mauvais SAV fabricant. La chaufferie fonctionne "normalement" depuis janvier 2020.

4.6.4. Résultats de la campagne de mesures

Lors de la campagne de mesure, la chaudière fonctionnait à une allure approximative de 80 % de sa charge nominale (puissance délivrée lors des mesures = 400 kW).

Une rupture de la chaîne de vidange des cendres est survenue lors de la campagne de mesure entraînant l'arrêt de la chaudière. La panne étant trop importante pour être réparée dans un délai raisonnable, les prélèvements pour la mesure de la masse des condensables ainsi que la détermination des composés organiques par classe de volatilité n'ont pas pu être réalisés sur cette chaufferie.

4.6.5. Débit, humidité, température de l'effluent

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Moyennes
Débit sur sec (m ³ /h)	1	60 minutes	1405
Humidité (%)	1	60 minutes	12,8
Température (°C)	1	383 minutes	126

Tableau 57 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH3)

4.6.6. Gaz de combustion

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
O ₂ (%)	2	251 minutes	9,6		
CO ₂ (%)			11,2		
CO (mg/m ³)			373,9	494,5	328,6
NO _x (mg/m ³)			179,1	233,4	157,8
COVt (mg/m ³)			20,7	27,6	18,4

Tableau 58 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH3)

4.6.7. Particules solides et condensables

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
PM (Solide) (mg/m ³)	3	50 minutes	102,6	128,4	84,4
PM (Solide + condensable) (mg/m ³)	Aucunes données				
PM (condensables) (mg/m ³)					
PM ₁ (%)	3	20 minutes	75		
PM _{2,5} (%)			10		
PM ₁₀ (%)			8		
>PM ₁₀ (%)			7		

Tableau 59 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH3)

4.6.8. Métaux, HAP, Carbone Suie et Classes de volatilité

Paramètres	Nombre d'essais	Durée moyenne des essais	Concentration moyenne à O ₂ réel	Concentration moyenne à 6% d'O ₂	Concentration moyenne à 11% d'O ₂
Somme 16 Métaux (mg/m ³)	1	167 minutes	2,9	11,6	7,7
Somme 8 HAP (µg/m ³)	1	82 minutes	13,3	22,5	15,0
Carbon suie (mg/m ³)		50 minutes	3,6	4,3	2,9
Classes de Volatilité (ng/m ³)	Aucunes données				

Tableau 60 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH3)

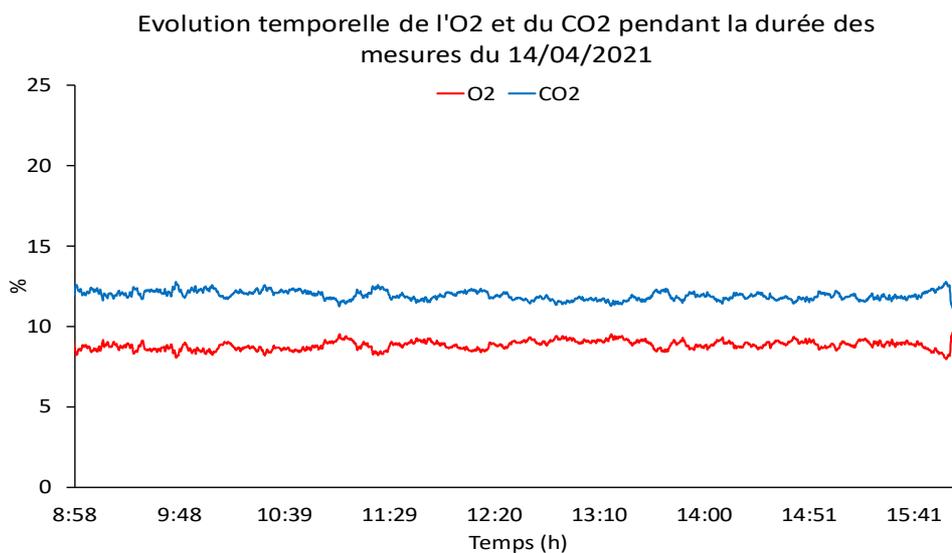


Figure 72 : Courbe O₂ et CO₂ pour les essais du 14 avril 2021 (CH3)

4.6.9. Interprétation des résultats

La chaudière CH3 a une puissance inférieure à 2 MW et le site n'est pas ICPE. Il est soumis à l'arrêté du 2 octobre 2009 aux exigences de l'UE du 28 avril 2015 et a été financé par le Fonds Chaleur de l'ADEME.

Émissions	Résultats à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Attentes Réglementaires à 6% d'O ₂ en mg/Nm ³	Conclusions
Poussières	128	Arrêté du 02/10/2009 : 225 Fonds Chaleur : 75	<ul style="list-style-type: none"> Émissions supérieures à l'engagement ADEME, malgré la présence d'un cyclone
CO	495	-	<ul style="list-style-type: none"> Légèrement au-delà des attentes réglementaires des sites plus importants en taille
NOx	233	Arrêté du 02/10/2009 : 750 Fonds Chaleur : 500	<ul style="list-style-type: none"> En-dessous des attentes réglementaires des sites plus importants Combustible peu chargé en azote
COV	28	-	<ul style="list-style-type: none"> Émissions modérées

Tableau 61 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation (CH3)

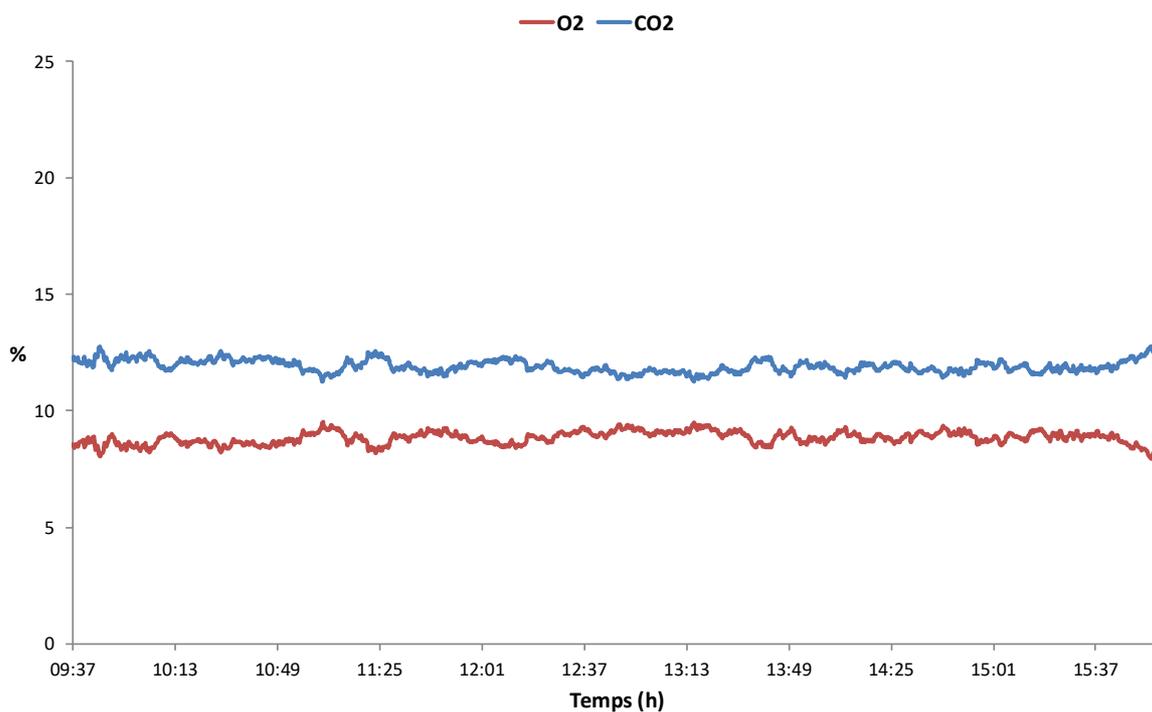
Lors de la campagne de mesure, un taux de charge relativement élevé d'environ 80 % a été observé, et la chaudière fonctionnait avec un taux d'O₂ plutôt constant autour de 8%. Cela explique notamment les émissions de CO modérées par rapport à d'autre site montrant des fonctionnements par cycles.

Les émissions de NOx sont modérées également et peuvent être expliquées par une teneur en azote faible du combustible en entrée (plaquettes forestières locales).

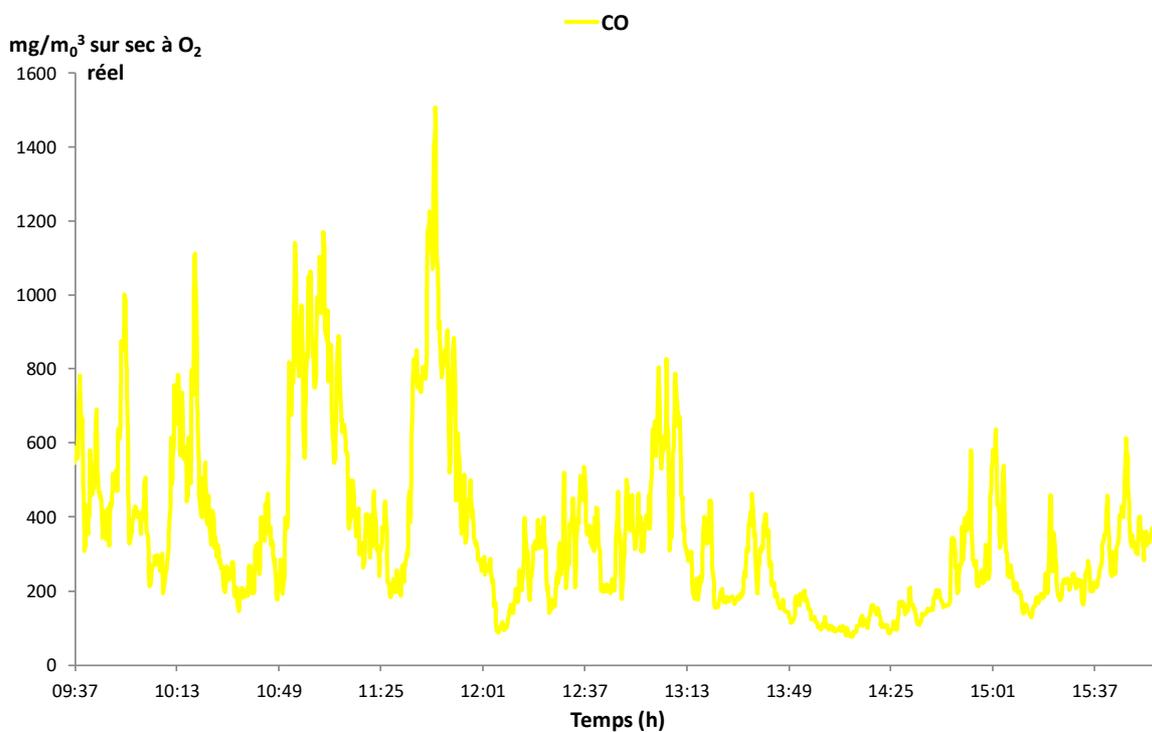
4.6.10. Résultats des campagnes d'essais sur CH3

Paramètres	Unités	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy.	Jours
Débit sur sec	m ³ /h	1405			1405	14/04/2021
Humidité	%	12,8			12,8	14/04/2021
Température	°C	126			126	14/04/2021
		119 min	383 min			
O ₂	%	10,3	8,8		9,6	13-14/04/2021
CO ₂	%	10,5	11,9		11,2	13-14/04/2021
CO	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	367,0	290,1		328,6	13-14/04/2021
NO _x	mg/m ³ eq. NO ₂ sur sec à 11% d'O ₂	182,7	132,3		157,5	13-14/04/2021
COVt	mg/m ³ eq. C sur sec à 11% d'O ₂	20,2	16,5		18,4	13-14/04/2021
		55 min	45 min	45 min		
PM (SP)	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	91,1	86,4	78,5	84,4	14/04/2021
		min	min	min		
PM (TSP)	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	Aucunes données				
		36 min	15 min	18 min		
PM ₁	%	66	80	79	75	13/04/2021
PM _{2,5}	%	13	10	8	10	13/04/2021
PM ₁₀	%	11	5	8	8	13/04/2021
>PM ₁₀	%	10	5	6	7	13/04/2021
		167 min				
Σ 16 Mtx	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	7,7			7,7	14/04/2021
		82 min				
Σ 8 HAPs	µg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	15			15	14/04/2021
		55 min	45 min	45 min		
EC	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	1,9	2,2	2,7	2,3	14/04/2021
OC	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	1,2	0,4	0,4	0,6	14/04/2021
TC	mg/m ³ sur sec à 11% d'O ₂	3,1	2,5	3,1	3,0	14/04/2021

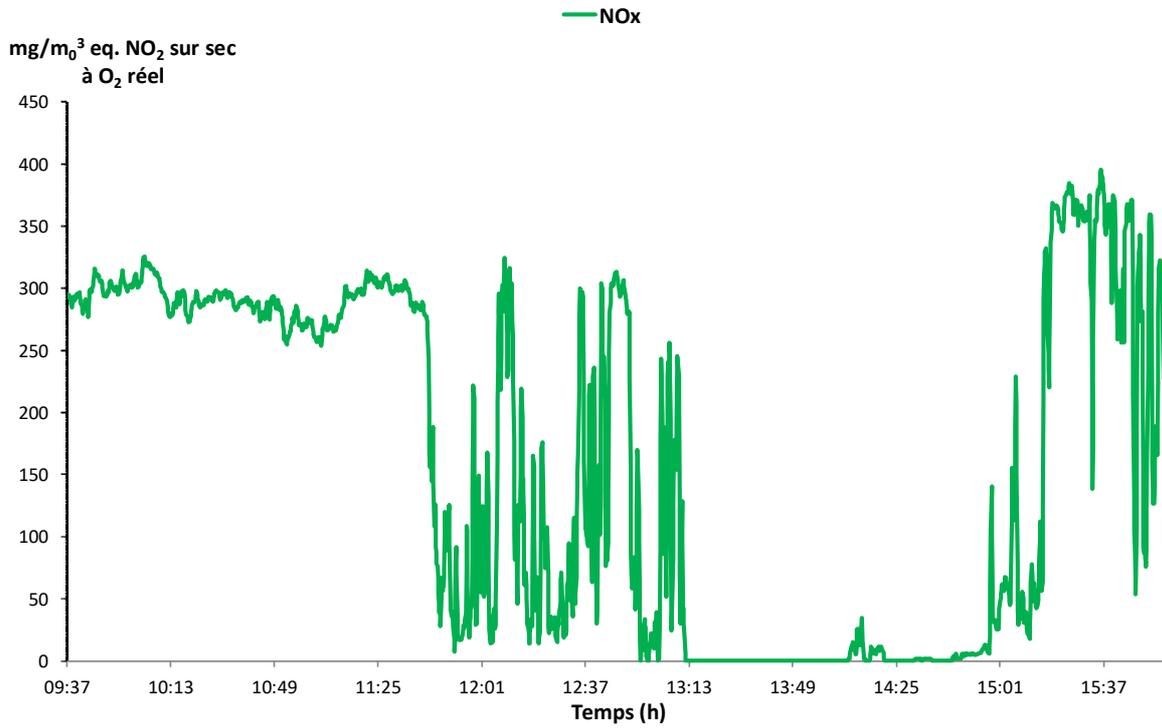
Evolution des composés O2 et CO2 pendant les mesures du 14/04/2021



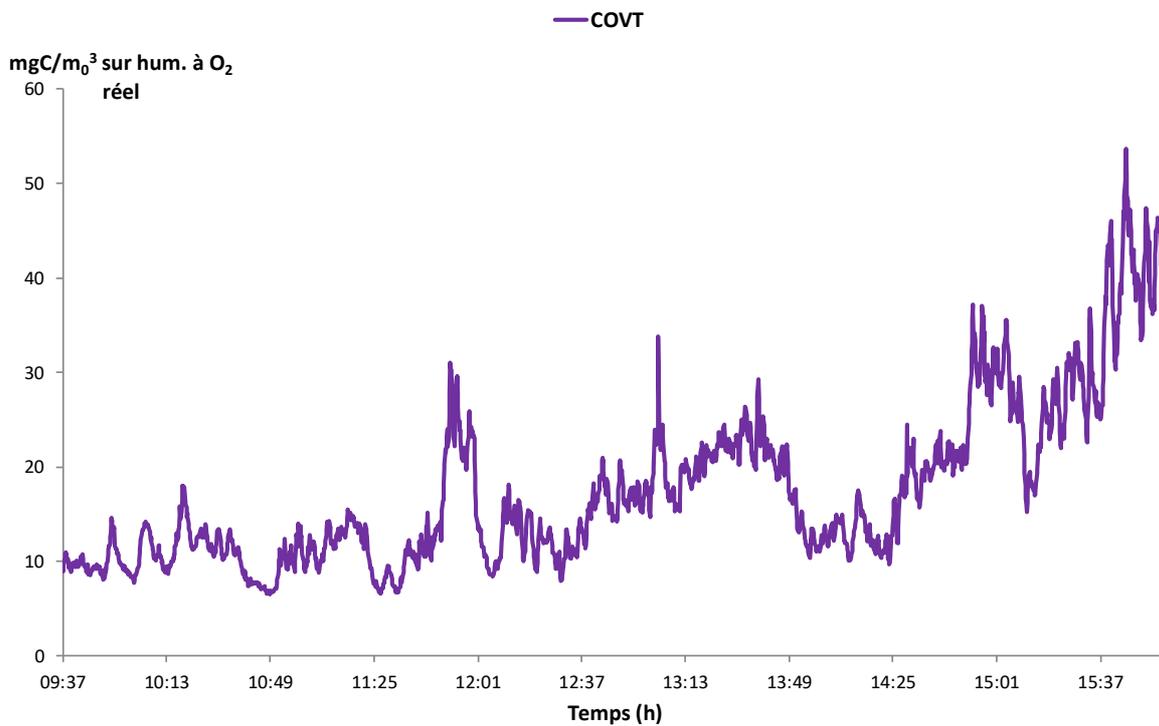
Evolution du composé CO pendant les mesures du 14/04/2021



Evolution des NOx pendant les mesures du 14/04/2021



Evolution des COVt pendant les mesures du 14/04/2021



5. References bibliographiques

- [1] L. Johansson, C. Tullin et B. Leckner, «Particulate emissions from small-scale biomass combustion,» chez *Aerosols from biomass combustion international seminar at 27 June 2001 in Zurich by IEA Bioenergy Task 32 and Swiss Federal Office of Energy*, Zurich, 2001.
- [2] T. Kaivosoja, P. Jalava, H. Lamberg, A. Virén, M. Tapanainen, T. Torvela, U. Tapper, O. Sippula, J. Tissari, R. Hillamo, M.-R. Hirvonen et J. Jokiniemi, «Comparison of emissions and toxicological properties of fine particles from wood and oil boilers in small (20–25 kW) and medium (5–10 MW) scale,» *Atmospheric Environment*, vol. 77, pp. 193-201, 2013.
- [3] S. R. Chandrasekaran, J. R. Laing, T. M. Holsen, S. Raja et P. K. Hopke, «Emission characterization and efficiency measurements of high-efficiency wood boilers,» *Energy & Fuels*, pp. 5015-5021, 2011.
- [4] P. Yu, «Ultrafine and nanoparticle emissions of different biomass combustion appliances – Thesis of M.S degree,» Politecnico di Milano – Department of Civil and Environmental Engineering, 2013.
- [5] F. Fachinger, F. Drewnick, R. Gieré et S. Borrmann, «Communal biofuel burning for district heating: Emissions and immissions from medium-sized (0.4 and 1.5 MW) facilities,» *Atmospheric Environment*, vol. 181, pp. 177-185, 2018.
- [6] J. Lundgren, R. Hermansson et J. Dahl, «Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, pp. 443-453, May 2004.
- [7] H. Lamberg, «Small-scale pellet boiler emissions – Characterization and comparison to other combustion units,» Department of Environmental Science, Faculty of Science and Forestry, University of Eastern Finland, Kuopio, Finland, 2014.
- [8] L. Rector, P. J. Miller, S. Snook et M. Ahmadi, «Comparative emissions characterization of a small-scale wood chip-fired boiler and an oil-fired boiler in a school setting,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 107, pp. 254-260, 2017.
- [9] A. S. Tariq et M. Purvis, «Nox emissions and thermal efficiencies of small scale biomass-fuelled combustion plant with reference to process industries in a developing country,» *International Journal of Energy Research*, vol. 20, pp. 41-55, 1996.
- [10] G. Caposciutti et M. Antonelli, «Experimental investigation on air displacement and air excess effect on CO, CO₂ and Nox emissions of a small size fixed bed biomass boiler,» *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 795-805, 2018.
- [11] R. J. Olave, E. Forbes, C. R. Johnston et J. Relf, «Particulate and gaseous emissions from different wood fuels during combustion in a small-scale biomass heating system,» *Atmospheric Environment*, vol. 157, pp. 49-58, 2017.
- [12] O. Sippula, J. Hokkinen, P. Yli-Pirilä et J. Jokiniemi, «Particle Emissions from Small Wood-fired District Heating Units,» *Energy & Fuel*, vol. 23, pp. 2974-2982, 2009.
- [13] H. Sefidari, N. Razmjoo et M. Strand, «An experimental study of combustion and emissions of two types of woody biomass in a 12-MW reciprocating-grate boiler,» *Fuel*, vol. 135, pp. 120-129, 2014.
- [14] N. Allemand, «Estimation des émissions de polluants liées à la combustion du bois en France,» Citepa, 2003.
- [15] ADEME, LECES, «Evaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse – Campagne de mesure 2016,» 2018.
- [16] A. Pieper, H. Wichmann, M. Bahadir, M. Strecker et R. Marutzky, «Pollutants and their reduction in small-scale wood incinerators,» *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 11, pp. 854-862, 2002.
- [17] E. D. Lavric, A. A. Konnov et D. J. Ruyck, «Dioxin levels in wood combustion—a review,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, pp. 115-145, 2004.
- [18] T. Nussbaumer et P. Hasler, «Formation and reduction of polychlorinated dioxins and furans in biomass combustion,» *Developments in thermochemical biomass conversion*, pp. 1492-1506, 1996.

- [19] I. Obernberger, T. Brunner et M. Jöller, «Characterisation and formation of aerosols and fly-ashes from fixed-bed biomass combustion,» chez *Aerosols from biomass combustion – International Seminar at 27 June 2001 in Zurich organised on behalf of International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 32 : Biomass Combustion and Cofiring and the Swiss Federal Office of Energy*, Zurich, 2001.
- [20] C. Gaegauf, U. Wieser et Y. Macquat, «Field investigation of nanoparticle emissions from various biomass combustion systems,» chez *Aerosols from biomass combustion. International seminar at 27 June 2001 in Zurich by IEA Bioenergy Task 32 and Swiss Federal Office of Energy*, Zurich, 2001.
- [21] T. Valmari, E. I. Kauppinen, J. Kurkela, J. K. Jokiniemi, G. Sfiris et H. Revitzer, «Fly ash formation and deposition during fluidized bed combustion of willow,» *Journal of Aerosol Science*, vol. 29, pp. 445-459, 1998.
- [22] L. Lillieblad, A. Szpila, M. Strand, J. Pagels, K. Rupaar-Gadd, A. Gudmundsson, E. Swietlicki, M. Bohgard et M. Sanati, «Boiler operation influence on the emissions of submicrometer-sized particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass-fired grate boilers,» *Energy & Fuels*, vol. 18, pp. 410-417, 2004.
- [23] M. Díaz-Ramírez, F. Sebastián, J. Royo et A. Rezeau, «Influencing factors on NOX emission level during grate conversion of three pelletized energy crops,» *Applied Energy*, vol. 115, pp. 360-373, 2014.
- [24] K. Sartor, Y. Restivo, P. Ngendakumana et P. Dewallef, «Prediction of Sox and Nox emissions from a medium size biomass boiler,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 65, pp. 91-100, 2014.
- [25] Y. Li, Y. Lin, J. Zhao, B. Liu, T. Wang, P. Wang et H. Mao, «Control of Nox emissions by air staging in small- and medium-scale biomass pellet boilers,» *Environmental Science and Pollution Research*, 2019.
- [26] O. Sippula, H. Lamberg, J. Leskinen, J. Tissari et J. Jokiniemi, «Emissions and ash behavior in a 500 kW pellet boiler operated with various blends of woody biomass and peat,» *Fuel*, vol. 202, pp. 144-153, 2017.
- [27] M. Omara, P. K. Hopke, S. Raja et T. M. Holsen, «Performance Evaluation of a Model Electrostatic Precipitator for an Advanced Wood Combustion System,» *Energy Fuels*, vol. 24, pp. 6301-6306, 2010.
- [28] A. Wierzbicka, L. Lillieblad, J. Pagels, M. Strand, A. Gudmundsson, A. Gharibi, E. Swietlicki, M. Sanati et M. Bohgard, «Particle emissions from district heating units operating on three commonly used biofuels,» *Atmospheric Environment*, vol. 39, pp. 139-150, 2005.
- [29] C. Boström, E. Flodström et D. Cooper, «Emissionsfaktorer för stationär förbränning,» SMED – Svenska Miljö Emissions Data, 2004.
- [30] J. Pagels, M. Strand, J. Rissler, A. Szpila, A. Gudmundsson, M. Bohgard, L. Lillieblad, M. Sanati et E. Swietlicki, «Characteristics of aerosol particles formed during grate combustion of moist forest residue,» *Journal of Aerosol Science*, vol. 34, pp. 1043-1059, 2003.
- [31] K. Kubica, M. Jewiarz, R. Kubica et A. Szlęk, «Straw Combustion: Pilot and Laboratory Studies on a Straw-Fired Grate Boiler,» *Energy & Fuels*, vol. 30, pp. 4405-4410, 2016.
- [32] D. Graham, H. Harnevie, R. van Beek et F. Blank, «Validated methods for flue gas flow rate calculation with reference to EN 12952-15,» VGB European Working Group Emissions Monitoring, 2012.
- [33] AEA, «Conversion of biomass boiler emission concentration data for comparison with Renewable Heat Incentive emission criteria – Annex B,» 2012.
- [34] EEA, «1a4 Small combustion – EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019.
- [35] S. Ghafghazi, T. Sowlati, S. Sokhansanj, X. Bi et S. Melin, «Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3019-3028, 2011.
- [36] EEA, «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,» 2019.

- [37] P. Hasler et T. Nussbaumer, «Particle size distribution of the fly ash from biomass combustion,» chez *Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition*, Würzburg, 1998.
- [38] T. Nussbaumer, «Combustion and Co-combustion of Biomass : Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction,» *Energy & Fuels*, vol. 17, pp. 1510-1521, 2003.
- [39] P. Maas et Grennfelt, «Towards Cleaner Air. Scientific Assessment Report 2016. EMEP Steering Body and Working Group on Effects of the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution,» Oslo, 2016.
- [40] J.-L. Besombes, M. Carteret, B. Golly, G. Brulfert, S. Collet, C. Rogaume et Y. Rogaume, «Evaluation des impacts sur la qualité de l'air des actions de modernisation du parc d'appareils de chauffage au bois à Lanslebourg – Rapport final,» ADEME, 2014.
- [41] J. Tissari, K. Hytönen, J. Lyyräinen et J. Jokiniemi, «A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion,» *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 8330-8344, December 2007.
- [42] NYSERDA, «Biomass Combustion in Europe: Overview on Technologies and Regulations,» New York State Energy Research and Development Authority, 2008.
- [43] O. Sippula, T. Lind et J. Jokiniemi, «Effects of chlorine and sulphur on particle formation in wood combustion performed in a laboratory scale reactor,» *Fuel*, vol. 87, pp. 2425-2436, 2008.
- [44] Rapport INERIS DRC-15-106432-04722A, «Programme européen EN_PME_TEST relatif à la validation d'une méthode commune au niveau européen de détermination des émissions de particules des appareils de chauffage domestique à combustibles solides,» 2015.
- [45] E. Dzelzitis, A. Jegeris, A. Lickrastina et N. Talcis, «Solid Particle Emission Abatement from Biomass-Fired Boilers at District Heating Plants,» *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 10, pp. 173-182, 2016.
- [46] Hasler, P; Nussbaumer, Th, «Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 16, pp. 385-395, 1999.
- [47] M. Strand, J. Pagels, A. Szpila, A. Gudmundsson, E. Swietlicki, M. Bohgard et M. Sanati, «Fly ash penetration through electrostatic precipitator and flue gas condenser in a 6 MW biomass fired boiler,» *Energy & Fuels*, vol. 16, pp. 1499-1506, 2002.
- [48] C. Raventos et INERIS, «Caractérisation au rejet d'installations, des émissions atmosphériques de Black Carbon – Facteurs d'émissions de sources de combustion – Synthèse,» 2018.
- [49] US EPA – Department of the Interior, Environment and Related Agencies Appropriations ACT, 2010, «Report to Congress on black carbon,» 2012.
- [50] RNO 2001, «Surveillance du milieu marin – Travaux du RNO,» Ifremer et Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Edition 2001.
- [51] L. Lillieblad, M. Strand, J. Pagels, A. Szpila, E. Swietlicki, M. Sanati et M. Bohgard, «Investigation of aerosol formation and cleaning efficiency in commercially operated biomass fired boilers,» chez *Aerosols from biomass combustion – International Seminar at 27 June 2001 in Zurich organised on behalf of International Energy Agency (IEA) BioenergyTask 32 : Biomass Combustion and Cofiring and the Swiss Federal Office of Energy*, 2001.
- [52] J. R. C. (. D. B, «Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Surface Treatment Using Organic Solvents including Preservation of Wood and Wood Products with Chemicals – Final Draft,» 2019.
- [53] G. Skodras, P. Grammelis, P. Samaras, P. Vourliotis, E. Kakaras et G. Sakellariopoulos, «Emissions monitoring during coal waste wood co-combustion in an industrial steam boiler,» *Fuel*, vol. 81, pp. 547-554, 2002.

- [54] O. Schleicher, A. A. Jensen, P. Blinksbjerg, E. Thomsen et B. Schilling, «Dioxin emissions from biomass fired energy plants and other sources in Denmark,» *Organohalogen Compounds*, vol. 56, pp. 147-150, 2002.
- [55] B. Schatowitz, G. Brandt, F. Gafner, E. Schlumpf, R. Bühler, P. Hasler et T. Nussbaumer, «Dioxin emissions from wood combustion,» *Chemosphere*, vol. 29, pp. 2005-2013, 1994.
- [56] GIEC, «Chapter 2: Stationary Combustion – 206 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,» 2006.
- [57] ADEME, IRH Ingénieur Conseil, «Chaufferies biomasse et émissions atmosphériques – Collecte des rapports d'émissions des chaufferies biomasse du Fonds Chaleur,» 2018.
- [58] P. Carbofor, «Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles,» 2004.
- [59] AEAT, «Determination of atmospheric pollutant emission factors at a small industrial wood burning furnace,» March 2001.
- [60] E. M. East, «Technical note 6/2000, p.47,» 2000.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Facteurs d'émission du CO pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion.....	13
Tableau 2 : Facteurs d'émission des NO _x pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	20
Tableau 3 : Facteurs d'émission du SO ₂ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	27
Tableau 4 : Facteurs d'émission du NH ₃ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	30
Tableau 5 : Facteurs d'émission des COVT pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	34
Tableau 6 : Proportions respectives du CH ₄ et du C ₂ H ₄ dans les COVT mesurés issues de [1], chaudière de 1,75 MW alimentée aux granulés de bois.....	36
Tableau 7 : Facteurs d'émission du CH ₄ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	37
Tableau 8 : Facteurs d'émission des TSP obtenus avec différentes méthodes de mesures, pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	47
Tableau 9 : Parties condensables identifiées dans l'étude de Rector et al. (2017) [8]	50
Tableau 10 : Facteurs d'émission des PM ₁₀ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	53
Tableau 11 : Facteurs d'émission des PM _{2,5} pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	57
Tableau 12 : Facteurs d'émission des PM ₁ pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	62
Tableau 13 : Proportions des PM ₁ au sein des TSP dans les études de Sippula et al. (2009) [12] et Strand et al. (2002) [47].....	66
Tableau 14 : Facteurs d'émission du Black Carbon (BC) ou Elemental Carbon (EC) pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	70
Tableau 15 : Facteurs d'émission des ML pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	75

Tableau 16 : Facteurs d'émission des HAP pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	90
Tableau 17 : Facteurs d'émission des PCDD/F pour différents appareils de combustion, différents combustibles et différentes conditions de combustion	99
Tableau 18 : Calendrier des campagnes d'essais.....	109
Tableau 19 : Extrait du rapport d'analyse des fumées de la chaufferie hiver 2017	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 20 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH6)	113
Tableau 21 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH6)	113
Tableau 22 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH6).....	113
Tableau 23 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH6).....	113
Tableau 24 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation.....	114
Tableau 25 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH5)	120
Tableau 26 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH5)	120
Tableau 27 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH5).....	121
Tableau 28 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH5).....	121
Tableau 29 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation et à l'engagement constructeur (CH5).....	122
Tableau 30 : Mesures des bureaux de contrôle, commandées par le Syndicat Départemental sur la chaudière bois (CH5).....	123
Tableau 31 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH4)	127
Tableau 32 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH4)	128
Tableau 33 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH4).....	129
Tableau 34 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH4).....	129
Tableau 35 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation (CH4).....	129
Tableau 36 : Analyses de combustion réalisées en décembre 2020 par le Syndicat, avec un combustible de type copeaux de bois (CH4).....	130
Tableau 37 : Mesures des bureaux de contrôle commandées par le Syndicat Départemental sur la chaudière bois (CH4).....	131
Tableau 38 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH1).....	136
Tableau 39 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH1).....	136
Tableau 40 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH1)	137
Tableau 41 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH1)	137
Tableau 42 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation (CH1)	138
Tableau 43 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH2)	144
Tableau 44 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH2)	145
Tableau 45 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH2).....	145
Tableau 46 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH2).....	145
Tableau 47 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences réglementaires et à l'engagement constructeur (fiche technique) (CH2).....	146
Tableau 48 : Résultats des essais en usine pour les chaudières de cette gamme.....	147
Tableau 49 : Concentrations moyennes du débit, de l'humidité et de la température des fumées mesurés durant la campagne d'essais (CH3)	152

Tableau 50 : Concentrations moyennes des gaz de combustion mesurés durant la campagne d'essais (CH3)	152
Tableau 51 : Concentrations moyennes des particules solides et condensables mesurées durant la campagne d'essais (CH3).....	153
Tableau 52 : Concentrations moyennes des métaux, HAP, du Carbone suie et des condensables par classe de volatilité mesurées durant la campagne d'essais (CH3).....	153
Tableau 53 : Comparaison des résultats d'analyse aux exigences de la réglementation (CH3).....	154

FIGURES

Figure 1 : Gammes des facteurs d'émission de CO par catégorie de combustible.....	14
Figure 2 : Gammes des facteurs d'émission de CO par gamme de puissance d'appareil	14
Figure 3 : Gammes des facteurs d'émission des NO _x par catégorie de combustible	21
Figure 4 : Gammes des facteurs d'émission des NO _x par gamme de puissance d'appareils.....	21
Figure 5 : Évolution de la température adiabatiques de flamme à différents degrés d'humidité (u=100% correspond à une humidité de 50%) lors de la combustion de bois [38]	23
Figure 6 : Gammes des facteurs d'émission de SO ₂ par catégorie de combustible	28
Figure 7 : Gammes des facteurs d'émission de SO ₂ par gamme de puissance d'appareils.....	28
Figure 8 : Gammes des facteurs d'émission de NH ₃ par catégorie de combustible	31
Figure 9 : Gammes des facteurs d'émission de COVT par catégorie de combustible.....	35
Figure 10 : Gammes des facteurs d'émission de COVT par gamme de puissance d'appareil	35
Figure 11 : Gammes des facteurs d'émission de CH ₄ par catégorie de combustible	38
Figure 12 : Gammes des facteurs d'émission de CH ₄ par gamme de puissance d'appareil	38
Figure 13 : Comparaison des différentes méthodes d'échantillonnages des TSP avec l'air ambiant [42]	40
Figure 14 : Gammes des facteurs d'émission de TSP par catégorie de combustible	48
Figure 15 : Gammes des facteurs d'émission de TSP par gamme de puissance d'appareil.....	48
Figure 16 : Gammes des facteurs d'émission de TSP par système de traitement de fumée	49
Figure 17 : Efficacité des systèmes de traitement de fumée conventionnels [46].....	49
Figure 18 : Gammes des facteurs d'émission de PM ₁₀ par catégorie de combustible.....	54
Figure 19 : Gammes des facteurs d'émission de PM ₁₀ par gamme de puissance d'appareil.....	54
Figure 20 : Gammes des facteurs d'émission de PM ₁₀ par système de traitement de fumée	55
Figure 21 : Gammes des facteurs d'émission de PM _{2,5} par catégorie de combustible.....	58
Figure 22 : Gammes des facteurs d'émission de PM _{2,5} par gamme de puissance d'appareil	58
Figure 23 : Gammes des facteurs d'émission de PM ₁ par catégorie de combustible	63
Figure 24 : Gammes des facteurs d'émission de PM ₁ par gamme de puissance d'appareil	63
Figure 25 : Gammes des facteurs d'émission de PM ₁ par système de traitement de fumée.....	64
Figure 26 : Classification du carbone selon méthode optique (gauche) ou thermo-optique (droite) [49]	67
Figure 27 : Gammes des facteurs d'émission de BC/EC par catégorie de combustible	72
Figure 28 : Gammes des facteurs d'émission de BC/EC par gamme de puissance d'appareil	72
Figure 29 : Gammes des facteurs d'émission de BC/EC par système de traitement de fumée	73
Figure 30 : Gammes des facteurs d'émission de plomb par catégorie de combustible.....	76
Figure 31 : Gammes des facteurs d'émission de plomb par gamme de puissance d'appareil.....	76
Figure 32 : Gammes des facteurs d'émission de cadmium par catégorie de combustible.....	77
Figure 33 : Gammes des facteurs d'émission de cadmium par gamme de puissance d'appareil	78
Figure 34 : Gammes des facteurs d'émission d'arsenic par type de combustible.....	78
Figure 35 : Gammes des facteurs d'émission d'arsenic par gamme de puissance d'appareil	79
Figure 36 : Gammes des facteurs d'émission de nickel par catégorie de combustible.....	79
Figure 37 : Gammes des facteurs d'émission de nickel par gamme de puissance d'appareil	80
Figure 38 : Gammes des facteurs d'émission de cuivre par catégorie de combustible.....	81
Figure 39 : Gammes des facteurs d'émission de cuivre par gamme de puissance d'appareil.....	81
Figure 40 : Gammes des facteurs d'émission de zinc par catégorie de combustible	81
Figure 41 : Gammes des facteurs d'émission de zinc par gamme de puissance d'appareil	82
Figure 42 : Gammes des facteurs d'émission de chrome par catégorie de combustible.....	83
Figure 43 : Gammes des facteurs d'émission de chrome par gamme de puissance d'appareil.....	83
Figure 44 : Gammes des facteurs d'émission de V par catégorie de combustible.....	85
Figure 45 : Gammes des facteurs d'émission de V par gamme de puissance d'appareil	85
Figure 46 : Gammes des facteurs d'émission de Mn par catégorie de combustible	86
Figure 47 : Gammes des facteurs d'émission de Mn par gamme de puissance d'appareil	87
Figure 48 : Gammes des facteurs d'émission des 4 HAP par catégorie de combustible.....	91
Figure 49 : Gammes des facteurs d'émission des 4 HAP par gamme de puissance d'appareil.....	91
Figure 50 : Gammes des facteurs d'émission des 8 HAP par catégorie de combustible.....	92
Figure 51 : Gammes des facteurs d'émission des 8 HAP par gamme de puissance d'appareil.....	92

Figure 52 : Gammes des facteurs d'émission des 8 HAP par système de traitement de fumée.....	93
Figure 53 : Gammes des facteurs d'émission des HAP totaux par catégorie de combustible.....	93
Figure 54 : Gammes des facteurs d'émission des HAP totaux par gamme de puissance d'appareil.....	94
Figure 55 : Gammes des facteurs d'émission des PCDD/F par catégorie de combustibles.....	100
Figure 56 : Gammes des facteurs d'émission des PCDD/F par gamme de puissance d'appareil.....	100
Figure 57 : Carte des installations auditées.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 58 : Plan d'implantation de la chaufferie CH7	Erreur ! Signet non défini.
Figure 59 : plan de la chaufferie Thegra.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 60 : Plan de la chaufferie CH9 (non à jour pour la puissance de la deuxième chaudière bois)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 61 : Plan de la chaufferie CH6.....	111
Figure 62 : Bilan énergétique sur le site CH6	112
Figure 63 : Courbe O ₂ et CO ₂ pour les essais du 8 juillet 2020	114
Figure 64 : Plan d'implantation de la chaufferie CH5	118
Figure 65 : Courbe O ₂ et CO ₂ pour les essais du 10 mars 2021 (CH5).....	122
Figure 66 : Plan chaufferie CH4.....	126
Figure 67 : Courbe O ₂ et CO ₂ pour les essais du 15 février 2021 (CH4)	130
Figure 68 : Plan de la chaufferie CH1.....	134
Figure 69 : Courbe O ₂ et CO ₂ pour les essais du 17 février 2021 (CH1).....	138
Figure 70 : Plan de la chaufferie CH2	143
Figure 71 : Maison du Parc	Erreur ! Signet non défini.
Figure 72 : Courbe O ₂ et CO ₂ pour les essais du 23 février 2021.....	147
Figure 73 : Schéma principe chaufferie CH3	Erreur ! Signet non défini.
Figure 75 : Courbe O ₂ et CO ₂ pour les essais du 14 avril 2021 (CH3).....	154

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, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., 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 150 KW à 1,6 MW ont fait l'objet d'une campagne inédite de mesures des polluants atmosphériques.

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

