



Mesures à l'émission de petites chaufferies biomasse (< 500 kW) en conditions réelles d'exploitation

RAPPORT COMPLET

REMERCIEMENTS

Airparif tient à remercier les communes propriétaires des installations ainsi que leurs exploitants d'avoir permis la réalisation de cette étude sur leurs installations. En effet, grâce à leurs contributions actives, les installations des matériels, les interventions des différents acteurs ont été réalisés suivant les règles de l'art et en toute sécurité pendant toute la période de chauffe. Ils se sont montrés très réactifs quant aux prélèvements des combustibles pour analyses de leurs compositions ainsi que lors des dysfonctionnements de leurs installations.

Airparif tient à les remercier pour ces contributions, pour leur confiance et pour améliorer les connaissances de ces émissions de petites chaufferies biomasse dans l'intérêt général.

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
1. INTRODUCTION.....	7
2. CONTEXTE.....	9
2.1. QUALITE DE L' AIR ET CHAUFFAGE AU BOIS EN ILE-DE- FRANCE	9
2.2. PETITES CHAUFFERIES BIOMASSE EN ILE-DE- FRANCE	11
2.3. LE PROCESSUS DE COMBUSTION DU BOIS.....	12
3. MESURES A L'EMISSION.....	12
3.1. POLLUANTS ET GAZ A EFFET DE SERRE (GES) MESURES	12
3.2. DISPOSITIF DE MESURE	14
3.2.1. Préparation des chaufferies pour la mesure	15
3.2.2. Appareils de mesure utilisés	16
3.2.3. Modalités de mesure.....	18
3.2.4. Mesure des composés condensables	19
4. CHAUDIERES INSTRUMENTEES	19
4.1. CAMPAGNES DE MESURES	19
4.2. FONCTIONNEMENT DES CHAUDIERES	21
4.2.1. Des périodes de chauffe continues.....	22
4.2.2. Des périodes de chauffe brèves et dynamiques.....	24
4.2.3. Méthodologie de classification des phases de combustion	26
4.2.4. Qualité de combustion.....	26
4.2.5. Analyse des combustibles.....	30
5. RESULTATS	37
5.1. DISPONIBILITE DES DONNEES.....	37
5.2. CONCENTRATIONS EN SORTIE DE CHEMINEE.....	38
5.2.1. Concentrations en oxydes d'azote (NOx)	39
5.2.2. Concentrations en particules (en masse)	43
5.2.3. Taille des particules : Profils granulométriques et gravimétriques	48
5.2.4. Concentrations en monoxyde de carbone (CO)	52
5.3. EMISSIONS REJETEES PAR LES CHAUDIERES	56
5.4. EMISSIONS DE PARTICULES CONDENSABLES	59
5.5. FACTEURS D'EMISSION.....	61
5.5.1. Détermination des facteurs d'émission	61
5.5.2. Facteurs d'émission de NOx	63
5.5.3. Facteurs d'émission de particules (en masse)	64
5.5.4. Particules en Nombre.....	66
5.5.5. Résultats des Facteurs d'émission de CO	67

5.5.6. Comparaison des facteurs d'émission des petites chaufferies biomasse au regard des autres moyens de chauffage.....	69
6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	70
ANNEXE 1 - TAUX DE DONNEES DISPONIBLES.....	73
ANNEXE 2 : MODELE STATISTIQUE D'ANALYSE DES FACTEURS D'INFLUENCE.....	76
ANNEXE 3 : CONCENTRATIONS EN NOX.....	79
ANNEXE 4 : CONCENTRATIONS EN CO.....	81
ANNEXE 5 : CONCENTRATIONS EN PARTICULES TOTALES.....	83

1. Introduction

Le bois-énergie est actuellement reconnu comme la première source d'énergie renouvelable produite et consommée en France¹. Pour faire face aux enjeux climatiques, la stratégie nationale bas carbone (SNBC) et la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) introduites par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 sont en cours de révision². Les documents en vigueur datent d'avril 2020. La PPE actuel portant sur la période 2019-2028, fixe comme objectif une réduction de la consommation énergétique finale de 20% en 2030 par rapport à l'année de référence 2012 avec une réduction de la consommation énergétique primaire des énergies fossiles de 40% en 2030 par rapport à l'année de référence 2012 et un part des énergies renouvelables (EnR) portée à 33% au moins en 2030 **dont 38% de la consommation finale de chaleur**. Dans ce cadre, l'usage de biomasse dans des chaufferies collectives est en forte expansion.

Cependant, cette source d'énergie soulève des questions importantes concernant sa neutralité carbone et son impact sur la qualité de l'air. Le chauffage au bois émet des polluants tels que les oxydes d'azote et les particules fines, ce qui pose des défis significatifs pour la qualité de l'air particulièrement dans les zones sensibles ou à forte densité de population. Les enjeux de qualité de l'air sont également à mettre au regard du cadre réglementaire, dans un contexte de contentieux avec le Conseil d'État et l'Union Européenne concernant le non-respect des valeurs limites de pollution de l'air pour le dioxyde d'azote et des seuils à 2030 fixés pour le dioxyde d'azote et les particules fines.

Ce combustible est notamment utilisé dans des chaudières de faible puissance qui ne sont généralement équipées d'aucun système de traitement des fumées et ne sont pas soumises à des valeurs limites à l'émission. Les performances énergétiques réelles et les émissions de polluants atmosphériques liées à l'utilisation de chaudières biomasse ont été peu étudiées in situ en condition réelle de fonctionnement et sur des périodes longues jusqu'à présent ; peu de données sont disponibles dans la littérature scientifique.

Dans ce contexte, Airparif a réalisé une vaste étude visant à documenter en conditions réelles d'exploitation les émissions de ces chaufferies biomasse de faible puissance. La mesure des émissions des principaux polluants de l'air réglementés (particules, oxydes d'azote, ...) et de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane) a ainsi été réalisée. L'étude a également évalué les émissions de particules ultrafines (moins de 100 nanomètres), non réglementées à ce jour, dont les sources d'émissions sont encore mal connues, bien que leur impact sanitaire fasse consensus dans un nombre croissant d'études.

¹<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2023/pdf/chiffres-cles-des-energies-renouvelable-2023.pdf>

² La PPE est en cours de révision (PPE 3), dans le cadre notamment de nouveaux objectifs climatiques fixés par directives européennes. Dans la dernière version soumise à consultation, la baisse de la consommation globale d'énergie serait abaissée à -29% entre 2012 et 2030 avec une réduction de la consommation d'énergies fossiles (hors usages non énergétiques) de -47% sur la même période et une hausse de la production de chaleur renouvelable de +60% entre 2023 et 2030 pour contribuer à atteindre ces objectifs. https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/02_projet_de_ppe_3.pdf

Les objectifs de l'étude sont les suivants :

Mesurer les émissions de polluants de l'air et GES des petites chaufferies biomasse en fonctionnement réel pendant toute la période de chauffe ;

Evaluer et documenter ces émissions selon le combustible utilisé et la puissance de l'installation ;

Identifier et hiérarchiser les facteurs d'influence expliquant l'évolution des émissions selon les chaudières instrumentées ;

Proposer des recommandations sur l'exploitation des chaudières ;

Contribuer à des travaux de recherche.

Huit chaudières ont été instrumentées en continu en l'Île-de-France, sur des périodes allant de 1 à 6 mois, pour prendre en compte les différentes phases d'exploitation et de chauffe.

Cette étude s'est concentrée sur ces chaufferies biomasse de faible puissance (< 500 kW), dont les émissions sont mal connues. Les chaudières étudiées utilisent des granulés ou des plaquettes forestières comme combustibles, permettant ainsi d'évaluer les émissions générées par ces sources d'énergie dans des conditions réelles d'exploitation.

L'étude a été financée par l'astreinte décidée par le Conseil d'État ainsi que par la Métropole du Grand Paris avec un soutien complémentaire d'Atmo Auvergne Rhône-Alpes. Des mesures complémentaires ont été financées par l'Ineris, l'Ademe et l'Anses.

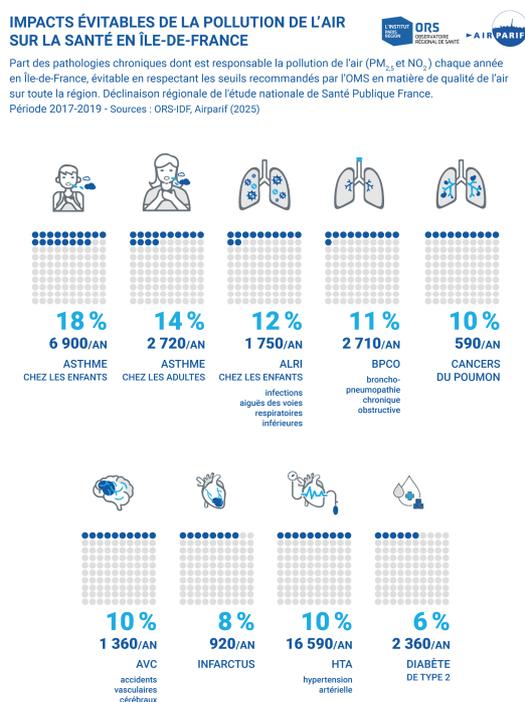
En effet, l'Ineris a dans le cadre de cette étude menée des mesures complémentaires ponctuelles des composés condensables sur les chaufferies instrumentées sur une longue période.

De plus des prélèvements ponctuels ont été réalisés par l'Ineris sur les mêmes chaudières dans le cadre du projet de recherche « Caractérisation des polluants émis par deux chaudières biomasses de faible puissance – CAPCHA » mené avec l'Institut des Géosciences de l'Environnement de Grenoble (IGE) et le laboratoire de recherche EDYTEM de l'Université Savoie Mont Blanc du CNRS dans le cadre d'un financement de l'Anses et de l'Ademe. Ce projet vise à mesurer les composés organiques volatils totaux (COVT) et à caractériser la composition chimique des particules (fractions solide et condensable) : Black Carbon (eBC), carbone élémentaire et organique (EC/OC), métaux, acides organiques, méthoxyphénols, sucres, hydrocarbures (alcanes), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et ions inorganiques. Ce projet vise également à évaluer le pouvoir oxydant des particules émises.

2. Contexte

2.1. Qualité de l'air et chauffage au bois en Ile-de-France

Si la qualité de l'air s'améliore, elle est encore à l'origine de nombreux impacts sur la santé. Notamment, les particules fines, émises sont à l'origine de 6 200 décès prématurés chaque année en Ile-de-France (étude ORS-Airparif³). De plus, chaque année, plusieurs dizaines de milliers de cas d'AVC, d'asthme, d'infections respiratoires, de cancer du poumon, de broncho-pneumopathie chronique obstructive, d'infarctus du myocarde, d'hypertension artérielle et de diabète de type 2 pourraient être évités en abaissant fortement les concentrations de polluants de l'air, au niveau des seuils recommandés par l'OMS sur toute la région. Ces maladies chroniques entraînent des pertes économiques estimées à 2,1 milliards d'euros chaque année⁴.



Malgré une amélioration importante de la qualité de l'air constatée en Île-de-France depuis au moins les 20 dernières années (-55 % de concentrations moyennes de particules fines entre 2003 et 2023), les seuils recommandés par l'OMS pour les particules fines sont encore dépassés sur l'ensemble de la région et le seront encore à moyen terme. La combustion du bois peut à certaines périodes de l'année contribuer de façon significative à la pollution de l'air extérieur. Cette contribution est illustrée par les teneurs en carbone suie, dont la mesure permet de distinguer le carbone suie issu de la combustion de biomasse et celui issu de combustible fossile. La contribution

³ Host, Sabine et al. Mortalité attribuable à la pollution atmosphérique en Île-de-France. ORS-IDF et Airparif

⁴ Host, Sabine et al. Maladies chroniques attribuables à la pollution de l'air en Île-de-France - synthèse. Observatoire national de santé-IDF, Aix-Marseille School of Economics et Airparif (2025)

Host, Sabine et al. Maladies chroniques attribuables à la pollution de l'air en Île-de-France. Observatoire national de santé-IDF, Aix-Marseille School of Economics et Airparif (2025)

de la combustion de biomasse aux concentrations de particules PM₁₀ en Ile-de-France est en moyenne annuelle de 13 % à 20 % selon les sites de mesure en situation de fond en 2023. A titre d'illustration, la Figure 1 montre que la contribution des particules issues de la biomasse aux concentrations de particules PM₁₀ lors de l'épisode de pollution hivernal des 9 et 10 février 2023 est de l'ordre de 40% sur la station de mesure permanente de Paris 1^{er}, située dans le jardin Nelson Mandela, alors que la contribution de la combustion de combustible fossile est globalement constante.

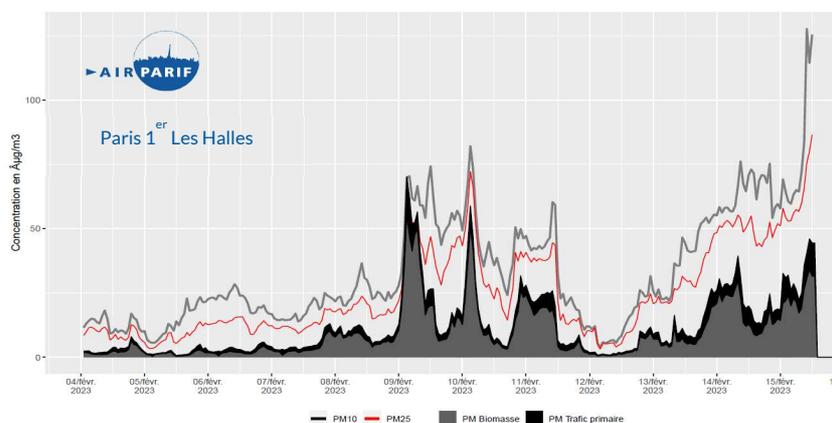


Figure 1 : Contribution du carbone suie issu de la biomasse et celle issue de la combustion de combustible fossile aux concentrations de particules PM₁₀ et PM_{2,5} sur la station Paris Les Halles d'Airparif pendant, avant et après l'épisode de combustion hivernal des 9 et 10 février 2023.

Concernant les émissions de particules PM_{2,5} primaires en Île-de-France, l'ensemble des moyens de chauffage au bois – chauffage individuel, petites et grandes chaufferies collectives – sont responsables à eux seuls d'environ 60 % des émissions totales. Si les chaufferies collectives ne contribuent que pour 1% environ aux émissions de particules PM_{2,5} en Ile-de-France, leur nombre est en forte progression. Les chaufferies collectives de puissance inférieure ou égale à 500 kW représentent moins de 0.1% des émissions totales de PM_{2,5} en Ile-de-France. Cette évaluation se base sur des FE non spécifiques à ces petites puissances, et l'étude vise à permettre d'affiner cette estimation. Bien que moins émettrices que les équipements individuels de chauffage au bois, elles émettent beaucoup plus de particules que les chaufferies au fioul domestique ou au gaz naturel, d'après les facteurs d'émission connus à ce jour (voir Figure 2).

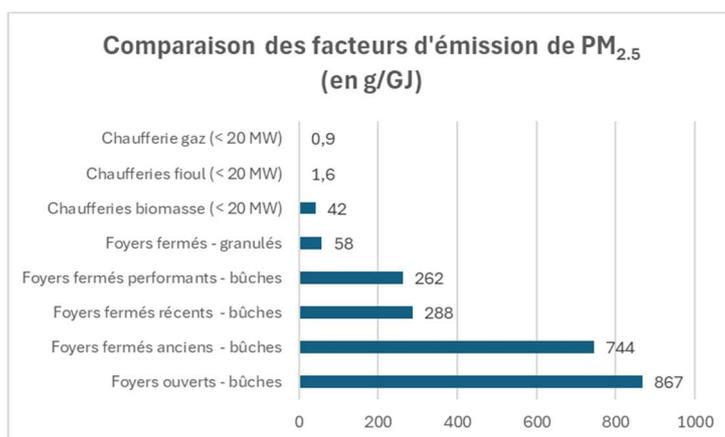


Figure 2 : Facteurs d'émissions de particules PM_{2,5} des installations de combustion, source CITEPA, illustration Airparif.

2.2. Petites chaufferies biomasse en Ile-de-France

En Île-de-France, le parc de chaufferies biomasse a connu une expansion, multipliant son nombre par quatre entre 2010 et 2020, tandis que la puissance installée a été multipliée par sept. Actuellement, sur la région Ile-de-France, les chaudières de puissance inférieure à 1 MW représentent 68% du nombre total, tandis que celles de puissance supérieure à 1 MW constituent 96% de la puissance installée.

A l'échelle de l'Ile-de-France, les combustibles principalement utilisés dans ces installations sont les plaquettes forestières (PFA), représentant 59%, suivies des granulés avec 21%. Le bois de fin de vie et de déchets de bois, ainsi que des sous-produits de l'industrie de première transformation du bois sont également utilisés à hauteur de 17%.

Les petites chaufferies biomasse sont majoritairement utilisées en Ile-de-France pour assurer le chauffage de certains bâtiments du secteur tertiaire : hôpitaux, EHPAD, écoles, mairies, etc.

La réglementation des chaufferies biomasse en France repose sur un ensemble de normes et de textes législatifs régissant leur conception, leur fonctionnement et les émissions de polluants. Elle varie en fonction de la puissance des installations. La réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) impose des valeurs limites d'émission (VLE) pour les installations de combustion de plus d'1MW. Les chaudières de moindre puissance de plus de 400 kW sont soumises à contrôle périodique et à des valeurs indicatives à l'émission (arrêté du 2 octobre 2009 relatif au contrôle des chaudières dont la puissance nominale est supérieure à 400 kW et inférieure à 20 MW). L'arrêté du 15 septembre 2009 relatif à l'entretien annuel des chaudières dont la puissance nominale est comprise entre 4 et 400 kW fournit des évaluations d'émissions pour les poussières et les composés organiques volatils (COV) des chaudières utilisant un combustible solide.

En Ile-de-France, l'article 16 de l'arrêté inter-préfectoral du 31 janvier 2018 relatif à l'approbation et à la mise en œuvre du Plan de Protection de l'Atmosphère pour l'Île-de-France⁵, a étendu l'application de l'arrêté du 2 octobre 2009 précité aux chaudières de moins de 400 kW. Le nouveau PPA francilien entré en vigueur en janvier 2025 confirme cette obligation⁶. Cet arrêté du 2 octobre 2009 précise, outre les modalités de surveillance périodique, des **valeurs indicatives de concentrations en conditions réelles d'exploitation pour les oxydes d'azote (NOx) et les particules (PM totales).**

Par ailleurs, **l'article 16 de l'arrêté inter-préfectoral du 31 janvier 2018** confirmé par l'article 17 de l'arrêté inter-préfectoral du 9 janvier 2025 relatif à l'approbation et à la mise en œuvre du Plan de Protection de l'Atmosphère pour l'Île-de-France définit une valeur limite de 375 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ pour le monoxyde de carbone (CO), applicable aux installations de puissance supérieure à 300 kW mises en service postérieurement au 1^{er} avril 2008 dans les départements d'Île-de-France, hors Paris lorsqu'elles utilisent de la biomasse comme combustible. L'article 12 de cet arrêté définit également des valeurs limites pour les installations neuves de puissance comprise entre 500 kW et 1MW (50

⁵ Arrêté inter-préfectoral n° IDF-2018-01-31-007 du 31 janvier 2018 relatif à l'approbation et à la mise en œuvre du Plan de Protection de l'Atmosphère pour l'Île-de-France

⁶ Arrêté inter-préfectoral DRIEAT-IDF n° 2025-0121 du 9 janvier 2025 relatif à l'approbation et à la mise en œuvre du Plan de Protection de l'Atmosphère pour l'Île-de-France

mg/Nm³ pour les particules et 350 mg/Nm³ pour les oxydes d'azote, à 6 % d'oxygène dans les fumées).

La réglementation d'écoconception de la Commission Européenne⁷, définit des exigences en matière d'efficacité énergétique et d'émissions polluantes. Elle impose des valeurs limites d'émissions (VLE) pour les poussières et les oxydes d'azote (NOx) pour toutes les chaudières mises sur le marché après le 1^{er} janvier 2020 de puissance inférieure ou égale à 500 kW. Le respect de ces VLE est contrôlé en laboratoire avant la mise sur le marché des chaudières. Bien que ces valeurs ne soient pas imposables aux chaudières instrumentées dans cette étude, puisqu'elles ont toutes été installées avant 2020, les résultats seront comparés à ces valeurs, qui correspondent aux attendus pour les installations récentes.

2.3. Le processus de combustion du bois

La combustion du bois est un processus chimique complexe qui se déroule en plusieurs étapes. Elle se produit généralement en trois phases distinctes :

Phase de séchage : cette première phase se produit lors du démarrage de la chaudière, où le bois est chauffé pour évaporer l'humidité qu'il contient et se produit à hauteur de 100°C à 200°C,

Phase de pyrolyse : durant cette phase, les différents composants du bois se décomposent, libérant progressivement des gaz volatils, tandis que le bois commence à se consumer sous l'effet de la chaleur,

Phase de combustion des gaz volatils : à ce stade, les gaz libérés pendant la pyrolyse réagissent avec l'oxygène de l'air, créant des flammes. Si l'apport en oxygène est optimal, la combustion est complète,

Phase de combustion du charbon résiduel : enfin, cette dernière phase intervient une fois que tous les gaz ont été consommés. Il ne reste alors que les résidus solides, qui se transforment en cendres.

Lors de ces différentes phases, les polluants émis varient. Les paramètres physico-chimiques, tels que la température et l'excès d'air, jouent un rôle clé dans ces émissions. L'étude présentée ici vise à différencier les émissions en fonction des différentes étapes du processus de combustion mais de manière simplifiée à travers les phases de fonctionnement des chaudières (cf. 4.2). Les polluants et paramètres physico-chimiques mesurés dans cette étude sont présentés ci-après.

3. Mesures à l'émission

3.1. Polluants et gaz à effet de serre (GES) mesurés

Dans cette étude les polluants atmosphériques mesurés à l'émission sont les polluants classiques issus de la combustion, à savoir :

⁷ Règlement 2015/1189 de la commission du 28 avril 2015 portant application de la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les exigences d'écoconception applicables aux chaudières à combustible solide

Les oxydes d'azote (NOx). Ils se forment principalement lors des processus de combustion à haute température, notamment dans les moteurs à combustion interne, les chaudières, les centrales thermiques, ainsi que dans les foyers domestiques. Ils jouent un rôle clé dans la formation photochimique de l'ozone troposphérique, dans la formation de particules secondaires, telles que les nitrates ou encore dans la formation d'acide nitrique qui acidifie les eaux de pluie. Le dioxyde d'azote (NO₂) a des effets néfastes sur la santé notamment en raison de son caractère irritant sur le système respiratoire et plus particulièrement sur les personnes plus vulnérables (les enfants, les personnes âgées et celles souffrant de maladies respiratoires).

En Île-de-France, les véhicules thermiques (essentiellement diesel) sont les principaux émetteurs d'oxydes d'azote (NOx). Les chaudières au gaz, au fioul et au bois représentent le second secteur d'émissions, suivi par les plateformes aéroportuaires.

Il existe des systèmes de limitation des NOx (dispositifs bas-NOx ou d'épuration, déNOx), principalement utilisés dans les secteurs du transport et de l'énergie, notamment dans les chaufferies biomasse, mais surtout sur les installations de grande puissance.

Le monoxyde de carbone (CO). Ce gaz se forme lors de combustions incomplètes, déficitaires en oxygène. Dans le cas des chaudières biomasse, l'évaluation des émissions de CO constitue un bon indicateur de la qualité de la combustion. Ce gaz est incolore, inodore et très toxique à forte concentration, notamment en milieu confiné, car il se fixe sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène. Cependant, dans l'air ambiant, les concentrations de CO sont généralement bien inférieures aux seuils réglementaires. Le monoxyde de carbone participe à la formation de l'ozone de basse altitude, un autre polluant de l'air et son oxydation dans l'atmosphère conduit à la formation de dioxyde de carbone (CO₂).

Les particules (PM pour « Particulate Matter »). Les PM désignent les particules de différentes tailles, précisées par des suffixes pour désigner leur taille en microns (µm) comme PM₁₀, PM_{2,5} et PM₁. Les particules de plus petite taille, Les particules sont composées d'un mélange de divers composés chimiques. Leur impact sur la santé varie en fonction de leur taille : les particules grossières (PM₁₀, inférieures à 10 µm) affectent principalement le système respiratoire, tandis que les particules fines (PM_{2,5}, de diamètre inférieur à 2,5 µm) ont des effets plus nocifs notamment sur le système cardiovasculaire, en augmentant le risque de maladies neurodégénératives et de faible poids à la naissance. Une exposition chronique à ces particules peut aussi favoriser l'apparition de maladies respiratoires et cardiovasculaires, et notamment des cancers du poumon et des AVC.

En Île-de-France, les principales sources de particules sont le chauffage au bois, le trafic routier et les activités de chantier. Des systèmes de filtration (filtres à manches, électrofiltres, multicyclones, etc.) existent pour les installations biomasse, bien qu'ils soient moins courants sur les installations de petite puissance.

Le dioxyde de soufre (SO₂). Il est émis lors de la combustion de matières fossiles, telles que le charbon, le pétrole et certains gaz contenant des impuretés en soufre, et lors de certains procédés industriels. En Île-de-France, il est rejeté essentiellement par les activités industrielles, dont celles liées à la production d'énergie comme les centrales thermiques, mais il est également émis par le chauffage au fioul, au gaz, et au bois. Les émissions de dioxyde de soufre dépendent de la teneur en soufre de ces combustibles. Toutefois, ses niveaux ont connu une baisse spectaculaire à partir des années 1950 (divisés par cent), en raison de la forte baisse de l'usage du charbon, de la diminution importante du taux de soufre des combustibles fossiles et de la désindustrialisation de l'Île-de-France. De plus, la

réglementation, en rendant obligatoire la désulfuration des carburants, a fait quasiment disparaître les émissions de dioxyde de soufre du transport routier.

Outre ces polluants atmosphériques, des gaz à effet de serre (GES) sont également mesurés, tels que :

Le dioxyde de carbone (CO₂). Il participe à l'effet de serre et au changement climatique. Ses principales sources sont les transports, les secteurs résidentiels et tertiaires ainsi que l'industrie. La combustion de combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, libère dans l'atmosphère le carbone stocké dans ces combustibles sous forme de CO₂. Ce processus contribue de manière significative au réchauffement climatique. Il en est de même pour la combustion de la biomasse, souvent qualifiée de neutre en carbone, sous-entendant que le CO₂ émis serait recapté par la biomasse vivante, à condition que la gestion de ses ressources soit optimale. Dans le cadre de cette étude, la mesure du CO₂ a permis d'estimer les consommations de biomasse et dans un second temps de définir les facteurs d'émission (Cf. 2 Détermination des facteurs d'émission).

Le méthane (CH₄). Il s'agit d'un GES incolore, indolore et non toxique. Il participe à l'effet de serre et possède un pouvoir réchauffant global (PRG) 28 fois supérieur à celui du CO₂⁸. Il est principalement émis lors du traitement des déchets (décharges et traitement des eaux usées), dans l'industrie et dans le secteur agricole. Dans le cas des chaudières biomasse, du CH₄ peut être produit lorsque la combustion est incomplète. Par exemple, si le taux d'oxygène est insuffisant pour oxyder complètement le carbone contenu dans le bois brûlé en CO₂, cela peut entraîner la formation de CO et de CH₄.

3.2. Dispositif de mesure

Les polluants atmosphériques, gaz à effet de serre et autres paramètres sont mesurés en continu dans des conditions réelles d'exploitation, sur des périodes, variant entre un et six mois en fonction des installations.

En parallèle de la mesure des polluants, plusieurs autres paramètres sont suivis afin de mieux comprendre le processus de combustion et leurs impacts sur les émissions dans lequel divers paramètres interagissent. Les données suivantes ont été mesurées au sein des cheminées de rejets des fumées.

La température des fumées joue un rôle important dans la formation des polluants et permet d'évaluer le fonctionnement des chaudières (cycles de chauffe). Il est essentiel d'atteindre une température minimale garantissant à la fois une énergie suffisante pour assurer une dégradation complète de la biomasse et l'oxydation des gaz produits.

Le taux d'oxygène permet d'évaluer l'efficacité de la combustion. Un niveau d'oxygène adéquat est nécessaire pour oxyder les gaz issus de la pyrolyse de la biomasse (cf. paragraphe « Le processus de combustion du bois »). Tous les appareils de combustion fonctionnent avec un apport d'air, permettant ainsi d'introduire une quantité d'air suffisante

⁸ Cinquième rapport du GIEC https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf

pour assurer l'oxydation complète des gaz émis lors de la pyrolyse. L'apport d'air joue un rôle crucial dans la qualité de la combustion de la biomasse, car il influence plusieurs paramètres importants du processus de combustion.

Le débit des fumées dépend non seulement du volume des gaz, mais aussi du tirage thermique (mouvement ascendant des gaz chauds en raison de la différence de pression entre l'air ambiant froid et les gaz chauds), ainsi que de facteurs mécaniques tels que la ventilation. Un débit élevé assure un bon tirage et permet l'évacuation des polluants. Ces paramètres sont analysés pour mieux identifier les cycles de chauffe des chaudières et établir des liens entre ces cycles et les niveaux d'émissions observés.

Des analyses des combustibles ont été réalisées. La composition du bois utilisé pour la combustion est un élément important pouvant jouer sur la variabilité des émissions. Les paramètres suivants ont été mesurés dans les échantillons de combustibles utilisés par chaque chaudière instrumentée :

Paramètres physiques du combustible : humidité, taux de cendres, Pouvoir calorifique inférieur et supérieur (PCI et PCS),

Minéraux : calcium, potassium, sodium, silicium, métaux (cuivre, nickel, zinc, plomb...),

Taux de carbone, azote, soufre, hydrogène, chlore, oxygène.

3.2.1. Préparation des chaufferies pour la mesure

Pour réaliser les mesures, il a fallu installer des trappes de prélèvement dans les conduits de cheminée et pour cela plusieurs prérequis techniques ont dû être vérifiés avant l'installation :

Une place suffisante dans la chaufferie pour placer l'ensemble du matériel de mesure.

L'accessibilité pour installer la trappe de prélèvement dans la chaufferie.

Des distances entre les trappes de prélèvement et les conduits amont et aval suffisantes.

Pour garantir un bon prélèvement dans un conduit, la longueur droite en amont doit être d'au moins 5 fois le diamètre nominal, tandis qu'en aval, elle doit être d'au moins 3 fois le diamètre afin d'éviter les perturbations de flux dans le conduit.

Deux trappes de prélèvement ont été installées sur le conduit de cheminée pour chaque chaudière instrumentée sur une période d'un mois, et trois pour celles instrumentées sur une période plus longue. Pour les chaudières instrumentées sur un mois, une trappe était dédiée aux mesures des particules, tandis que l'autre servait à mesurer les polluants gazeux et les paramètres physiques, tels que la température des fumées et la pression. Le débit a également été mesuré à l'aide d'une sonde pitot⁹. Pour les chaudières instrumentées plus longtemps, une trappe supplémentaire a été installée afin de permettre la réalisation des mesures ponctuelles dans le cadre du projet de recherche CAPCHA et la mesure définissant la part de condensable des particules.

Les segments des conduits, destinés aux prélèvements ont été entièrement modifiés. Les segments de conduit existants ont été remplacés par de nouveaux, adaptés à l'intégration des trappes selon les normes en vigueur. Des piquages ont été réalisés dans ces trappes afin d'assurer la connexion avec les dispositifs de mesure permettant les prélèvements.

L'ensemble des trappes installées sont conformes à la norme NF X44-052.

⁹ La sonde pitot permet de mesurer la vitesse des fluides dans un conduit.

La Figure 3 présente des photos illustrant l'installation des trappes de prélèvement intégrées aux conduits de cheminée, ainsi que les piquages des appareils de mesure dans ces trappes.

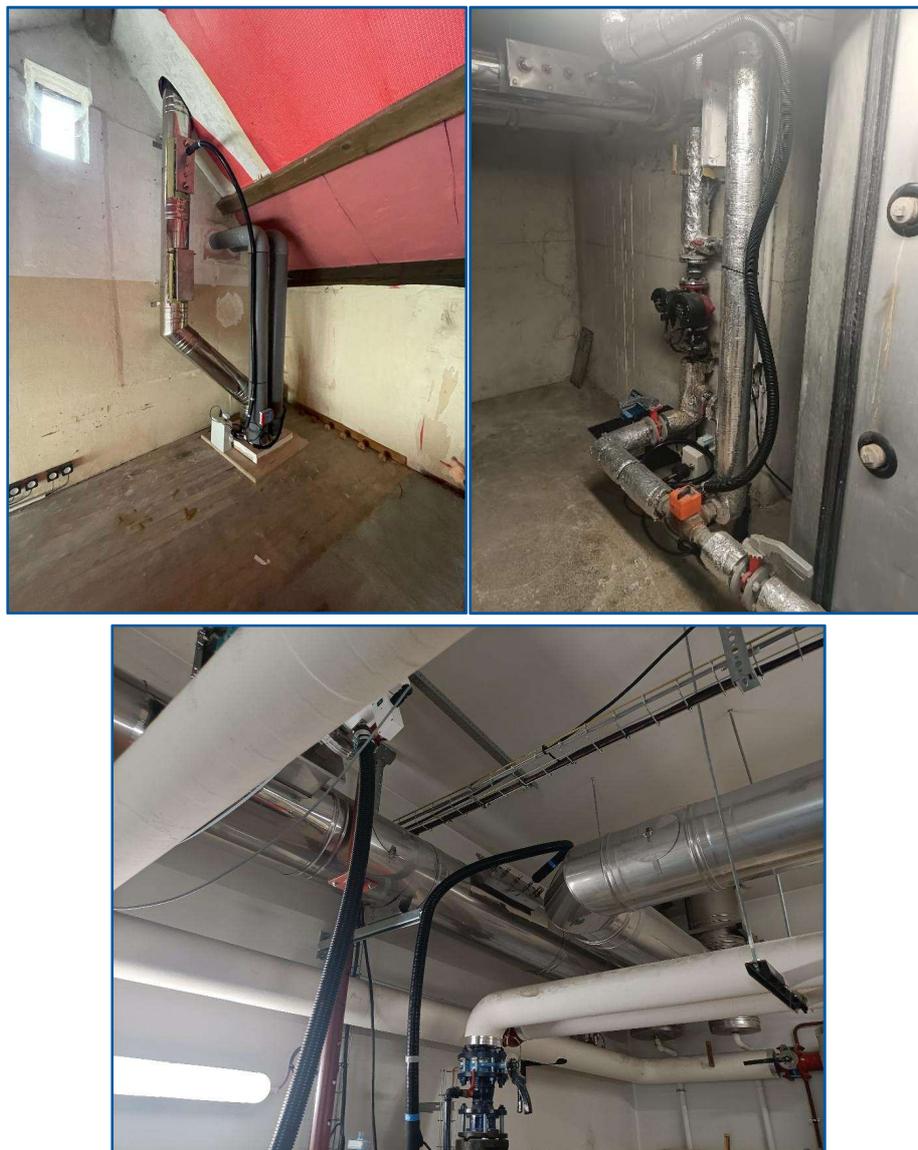


Figure 3 : Illustrations des trappes de prélèvements et des piquages réalisés au niveau des conduits de cheminée de installations sélectionnées.

3.2.2. Appareils de mesure utilisés

Pour réaliser l'intégralité des mesures au niveau des installations sélectionnées plusieurs analyseurs ont été utilisés, à savoir :

- des MIR 9000 P pour la mesure des gaz (CO_2 , CH_4 , NO_x , CO) en continu

- des PPS pour la mesure des particules en continu

- un ELPI+ pour les mesures granulométriques et gravimétriques ponctuelles

Ces différents analyseurs sont détaillés ci-dessous.

Le MIR 9000P est un analyseur capable de mesurer simultanément huit gaz différents grâce à la technologie infrarouge non dispersive avec corrélation de filtre gazeux (NDIR-GFC). Cette

technologie permet de mesurer en continu les différents gaz. L'O₂ est mesuré à l'aide d'une sonde paramagnétique intégrée.



Figure 4 : Illustration de l'analyseur MIR 9000P.

L'analyseur PPS est un dispositif de mesure en temps réel conçu pour analyser la concentration en nombre et en masse des particules émises par différents types de combustion. Il permet également de mesurer le diamètre médian des particules présentes dans les émissions. Ce système est capable de mesurer une large gamme de particules, allant de 0,005 à 10 µm.

Cet analyseur permet une mesure simultanée de la concentration en nombre et en masse des particules, avec une fréquence de mesure allant jusqu'à 10 Hz. Il peut quantifier la concentration en masse dans une plage allant de moins de 1 µg/m³ à 5 g/m³, et la concentration en nombre jusqu'à 10⁹ particules par cm³.

Une caractéristique notable de cet appareil est sa capacité à effectuer des mesures indépendamment des conditions environnementales, telles que la pression, la température et l'humidité, garantissant ainsi des résultats fiables dans diverses conditions d'exploitation.

La technologie de l'analyseur PPS est basée sur la mesure de charges électriques portées par les particules.



Figure 5 : Illustrations de l'analyseur PPS.

L'analyseur ELPI+ réalise des mesures gravimétriques et granulométriques simultanément. Il mesure en temps réel la concentration et la distribution granulométrique des particules dans une plage de 0,006 µm à 10 µm à une fréquence ajustable jusqu'à 10 Hz. Il donne ainsi la taille précise des particules grâce à sa capacité de mesure sur 14, 100 ou 500 canaux. La méthode gravimétrique de mesure permet également d'obtenir des concentrations massiques de particules PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀ conformément à la norme ISO 23210 et de déterminer un coefficient de conversion entre les mesures en nombre et en masse. Cet appareil est également utilisé pour ajuster les résultats fournis

par les compteurs de particules PPS, décrit précédemment, et les concentrations massiques délivrées par ce dernier.

Le principe de fonctionnement du ELPI+ se divise en 3 phases : les particules présentes dans l'air sont d'abord chargées électriquement, une fois chargées, elles passent à travers un impacteur à basse pression, qui les classe selon leur taille. Après la classification, les particules de différentes tailles sont détectées électriquement. Chaque étage est isolé électriquement l'un de l'autre. Les particules sont collectées sur des plateaux de collections suivant leur diamètre aérodynamique. La charge totale portée par les particules est mesurée sur chaque plateau avec des électromètres haute sensibilité. Le courant mesuré est directement proportionnel à la concentration en particules par classe de taille.



Figure 6 : Illustration de l'appareil ELPI+.

3.2.3. Modalités de mesure

Les mesures suivantes ont été réalisées **en continu** sur toute la durée de chaque campagne (6 mois ou 1 mois en fonction des chaufferies) :

Mesures de gaz : CO, NO_x, SO₂, CH₄, CO₂, H₂O, O₂ avec des MIR 9000 P

Mesures des particules (10 nm à 10 µm) : nombre total de particules avec des PPS

Des **mesures ponctuelles de particules** de quelques heures ont été réalisées, une fois pour les chaudières instrumentées 1 mois et lors de 3 journées différentes sur la période de mesure pour celles instrumentées 6 mois (début, milieu et fin de période de chauffe). Ces mesures réalisées avec des ELPI+ pour les mesures granulométriques et gravimétriques ont permis à la fois de calibrer les données en nombre et de définir la concentration massique des PPS de particules totales ainsi que les concentrations PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁.

3.2.4. Mesure des composés condensables

L'Ineris a réalisé des mesures ponctuelles des particules condensables sur les chaudières instrumentées sur de longues durées. Ces mesures ont été effectuées en début de période de chauffe, au milieu de la période et en fin de saison de chauffe. Elles ont été réalisées sur une durée d'environ 6 heures.

Pour réaliser ces mesures, l'Ineris a utilisé une méthode développée en interne à barboteurs d'isopropanol (IPA), qui comprend :

Un prélèvement non isocinétique de la fraction solide sur un filtre, réalisé à une température de 160°C, mesurée et maintenue dans le flux ;

Un prélèvement de la fraction condensable par barbotage dans trois barboteurs remplis de 150 ml d'isopropanol (IPA) et disposés en série dans une unité de refroidissement pour maintenir une température d'échantillonnage inférieure à 20°C permettant la condensation des gaz.

La concentration en fraction solide (mg/Nm³) est obtenue en divisant la masse collectée sur le filtre, déterminée par gravimétrie, par le volume prélevé, ajusté aux conditions normales de pression et de température ainsi qu'à la teneur en oxygène de référence.

La concentration en fraction condensable (mg/Nm³) est calculée en rapportant la masse collectée dans les barboteurs, déterminée par gravimétrie après évaporation de l'isopropanol, au volume prélevé, également ramené aux conditions normales de pression et de température (273 K, 1013 Pa) et à la teneur en oxygène de référence.

La concentration en particules totales est obtenue en additionnant les concentrations des fractions solide et condensable.

Cette méthode est également détaillée dans le rapport du projet ACIBIOQA financé par l'ADEME¹⁰.

4. Chaudières instrumentées

4.1. Campagnes de mesures

Huit chaudières ont été sélectionnées en l'Île-de-France en fonction de critères précis liés aux combustibles utilisés, à la puissance nominale de l'installation et à la faisabilité des mesures. Au total, dix-huit visites d'installations d'une puissance inférieure à 500 kW ont été réalisées afin de déterminer les sites les plus adaptés aux objectifs de l'étude.

Ainsi, quatre chaudières de différentes puissances dans une gamme de 100 à 500 kW, utilisant des granulés et quatre chaudières utilisant des plaquettes forestières, ont été retenues. Ce choix permet l'étude de leurs émissions notamment selon l'utilisation de ces deux combustibles et de la puissance des chaudières.

¹⁰ Emissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieures à 1 MW - Campagnes de mesures sur site et proposition d'évolution des facteurs d'émission – Projet ACIBIOQA – ADEME – Mai 2023.

Les mesures ont été réalisées en continu entre un et six mois selon les installations. Sur les huit chaudières sélectionnées, deux étaient prévues pour être instrumentées sur six mois et six chaudières sur une période plus courte d'un mois. En raison de problèmes techniques liés à l'une des chaudières instrumentées (« 130 kW – Granulés ») pour l'ensemble de la saison de chauffe (six mois), il a été nécessaire de prolonger l'instrumentation d'une autre chaudière, initialement équipée pour un mois. Ainsi, la chaudière « 250-1 kW » utilisant des granulés a été instrumentée sur une période de plus de quatre mois en remplacement de la chaudière « 130 kW – Granulés ».

Les données clés des sites sélectionnés sont présentées dans le Tableau 1. Dans le présent rapport, les sites instrumentés sont désignés par leur puissance et leur type de combustible.

Les chaufferies instrumentées ont été mises en service entre 2013 pour les plus anciennes et 2018 pour les plus récentes. La réglementation européenne d'écoconception s'applique aux chaudières mises en service à partir de janvier 2020. Ainsi, les chaudières instrumentées dans cette étude ne sont pas concernées par cette réglementation ; leurs émissions seront néanmoins comparées aux valeurs limites d'émission (VLE) définie dans ce cadre à titre indicatif.

Puissance (kW)	Combustibles	Durée des mesures	Secteurs desservis	Année de mise en service
100	Granulés	6/11 au 11/12/23	Tertiaire	2013
130	Granulés	6/11/23 au 22/01/24	Tertiaire	2018
250-1	Granulés	12/12/23 au 24/04/24	Résidentiel	2013
250-2	Granulés	12/12/23 au 21/01/24	Résidentiel	2013
110	PFA	19/10 au 11/12/23	Tertiaire	2018
150	PFA	16/10/23 au 24/04/24	Tertiaire	2017
300	PFA	23/01 au 19/03/24	Privé	2008
500	PFA	22/01 au 29/03/24	Résidentiel	2015

Tableau 1 : Données clés des chaudières sélectionnées pour la mesure des émissions de polluants atmosphériques et de GES.

Concernant les configurations spécifiques des chaudières pouvant jouer sur leur fonctionnement et leurs émissions, il est à noter qu'aucune des installations sélectionnées dans l'étude ne possède de système de filtration et que toutes les chaudières sélectionnées dans l'étude sont équipées d'au moins un ballon tampon. Un ballon tampon est un réservoir d'eau destiné à stocker l'énergie produite par la chaudière et présente plusieurs avantages. En effet, il joue un rôle d'intermédiaire entre l'énergie produite et celle consommée en permettant de stocker l'excédent d'énergie lorsque la production dépasse les besoins. De plus, il optimise le fonctionnement de la chaudière en lui permettant de fonctionner à sa puissance nominale, en réduisant les démarrages et arrêts fréquents. Il est essentiel de bien dimensionner le ballon tampon par rapport à la chaudière afin d'assurer une performance optimale du système.

4.2. Fonctionnement des chaudières

Les modes de fonctionnements des chaudières instrumentées pendant l'étude ont été différents. Chaque chaudière présente des cycles plus ou moins variables et dynamiques alternant entre 3 principaux régimes : « démarrage/montée en charge », « charge nominale » et « arrêt/baisse de charge ».

Les cycles de fonctionnement des chaudières peuvent être définis à l'aide du taux d'oxygène (O₂), du débit de fumée et de la température de fumée qui ont été mesurés lors des campagnes de mesure. L'évolution de ces paramètres permettent l'identification du régime dans lequel se trouve la chaudière et ainsi caractériser les différentes périodes de fonctionnement. Au-delà de la connaissance des cycles de fonctionnement, cela permet l'étude des concentrations et des émissions des polluants mesurés lors de ces différentes phases pour lesquelles la combustion de la biomasse est différente.

L'évolution de la **température des fumées** au niveau de chaque chaudière instrumentée permet d'analyser leurs cycles de chauffe. La période de chauffe où les températures de fumée sont les plus élevées s'accompagne de débits de fumées élevés. Lors de la période de combustion, **le débit de fumée** augmente, compte-tenu du volume de fumées plus important mais également à la fois sous l'effet du tirage thermique (mouvement ascendant des gaz chauds en raison de la différence de pression entre l'air ambiant froid et les gaz chauds) et de manière mécanique (ventilation). La phase de combustion entraîne également une baisse de **l'oxygène**, celui-ci étant utilisé comme comburant dans le cycle de la combustion.

A l'aide de ces paramètres, le fonctionnement des chaudières peut être caractérisé. Si les chaudières ayant accueillies des mesures sur une période d'un mois présentent des conditions de fonctionnement relativement similaires sur leur période instrumentée, les chaudières instrumentées plus longtemps ont pu observer des fonctionnements plus variables.

Les figures des paragraphes suivants illustrent le fonctionnement des chaudières à travers le taux d'oxygène (en rouge), le débit de fumée (en vert) et la température de fumée (en bleu) mesurés dans le conduit de cheminée.

Les périodes sélectionnées sur une période de 3 jours sont choisies pour illustrer le fonctionnement des différentes chaudières. Ces périodes sont représentatives des fonctionnements des chaudières lors des mesures réalisées.

Pour les chaudières ayant été instrumentées sur une période longue, les cycles de chauffe sont variables avec des modes de fonctionnement continus sur certaines périodes et des modes très cycliques et brefs de chauffe. De même, les autres chaudières présentent des modes de fonctionnement soit continus (entrecoupés ou non de cycles d'évacuation des cendres pouvant ponctuellement limiter la chauffe) soit des modes cycliques et brefs de chauffe. Ces deux modes de fonctionnement sont détaillés dans les paragraphes ci-après.

4.2.1. Des périodes de chauffe continues

Des périodes de chauffe continues sur les chaudières instrumentées sur plusieurs mois (« 250 kW – 1 – Granulés » et « 150 kW – PFA » ont été observées.

Le fonctionnement de la chaudière « 250 kW – 1 – Granulés » peut être continu, comme cela est le cas sur la période hivernale (

Figure 7 a). Durant cette période, le fonctionnement de cette chaudière est toutefois variable en lien avec le besoin de puissance à délivrer. Cette différence est illustrée à la fois par un taux d'oxygène légèrement plus faible et une température de fumée plus importante pour des périodes de fortes charges. Le débit de fumée augmente également lorsque la combustion est plus importante. A l'inverse, lorsque la combustion est moins importante, la température de fumée et le débit sont plus faibles alors que le taux d'oxygène est légèrement plus élevé. Ces périodes de chauffe continue sont toutefois interrompues de manière régulière et cyclique. Ces interruptions brèves de chauffe, d'un peu plus d'une heure, permettent une évacuation des cendres. Lors de ces périodes, l'oxygène revient à un taux caractéristique de l'air ambiant (environ 20%) accompagné d'une baisse de la température des fumées.

De la même manière, la chaudière « 150 kW – PFA », instrumentée sur six mois, connaît des fonctionnements différents selon la période de la saison de chauffe. Les périodes de chauffe longues et continues hivernales sont illustrées par la période de décembre (Figure 7 b).

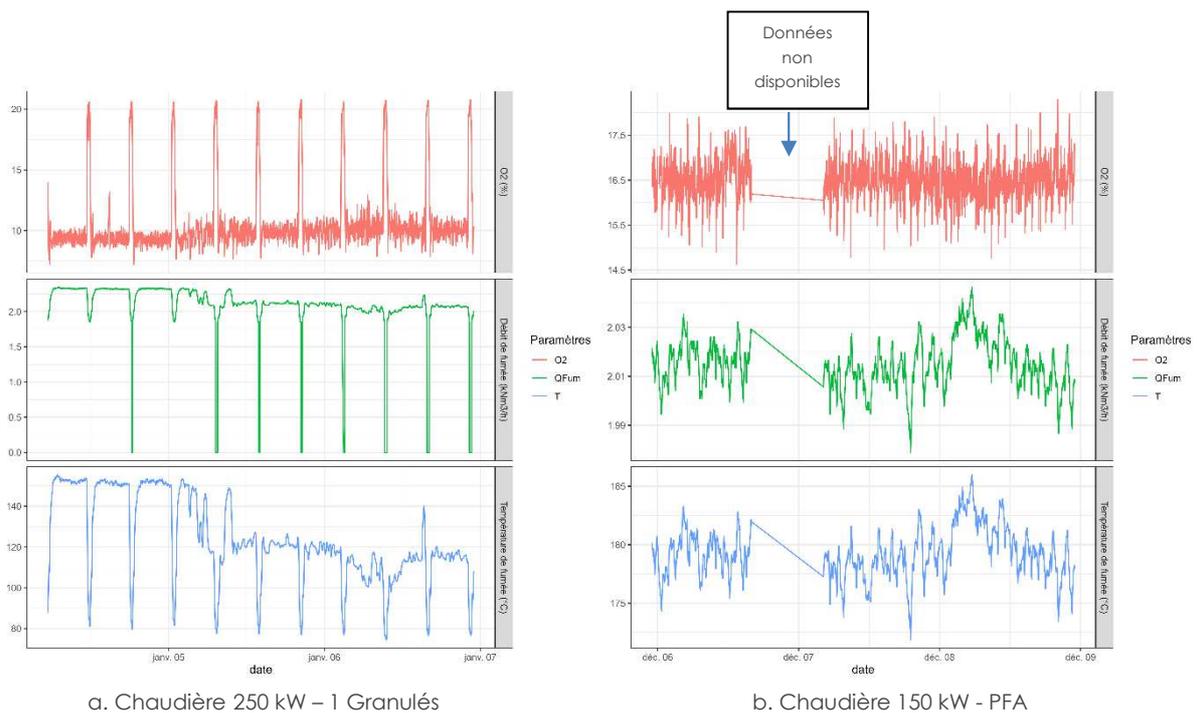


Figure 7 : Données d'oxygène, du débit de fumée et de température de fumée illustrant les périodes de chauffe continues de la chaudière 250 kW – 1 Granulés en janvier (à gauche) et de la chaudière 150 W – PFA en décembre (à droite).

Parmi les chaudières instrumentées 1 mois, trois chaudières ont eu, durant les mesures, des périodes de chauffe continues.

La Figure 8 illustre le fonctionnement de la chaudière « 250 kW – 2 Granulés » et de la chaudière « 100 kW Granulés ». Pour ces deux équipements, le taux d'oxygène oscille autour d'environ 12,5% avec des températures élevées au sein de la cheminée.

Comme pour la chaudière « 250 kW – 1 – Granulés » lors de son fonctionnement continu, des phases ponctuelles et régulières d'évacuation des cendres émaillent les périodes de chauffe. Le débit de fumée dans le cadre du fonctionnement de ces 2 chaudières est différent puisque la chaudière « 250 kW – 2 Granulés » ne présente, lors de cette phase d'évacuation des cendres, aucun débit alors que la chaudière « 100 kW Granulés » a un débit relativement constant entre la phase de chauffe et celle d'évacuation des cendres.

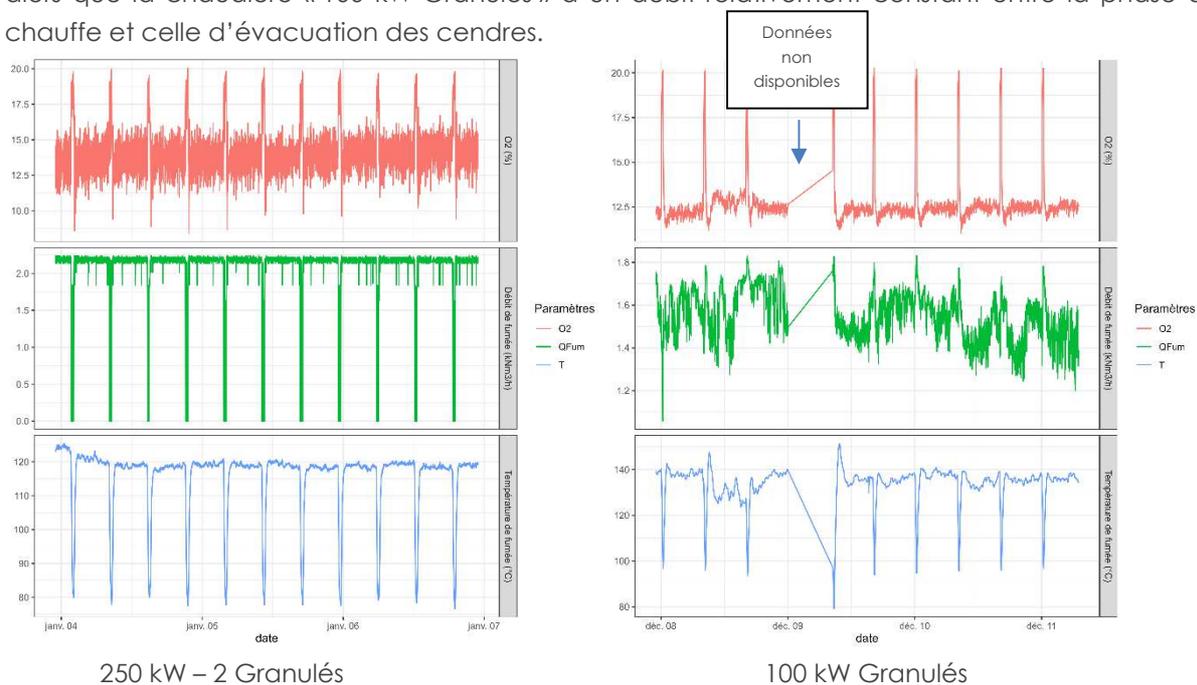


Figure 8 : Données d'oxygène, du débit de fumée et de température de fumée illustrant le fonctionnement des chaudières « 250 kW – 2 Granulés » et « 100 kW Granulés » lors des mesures réalisées

La chaudière « 500 kW – PFA », instrumentée 1 mois, observe durant les mesures réalisées une période de chauffe continue mais sans les mêmes phases cycliques d'évacuation des cendres (voir Figure 9). La fluctuation des paramètres mesurés montre des conditions de chauffe plus ou moins fortes mais celle-ci reste permanente.

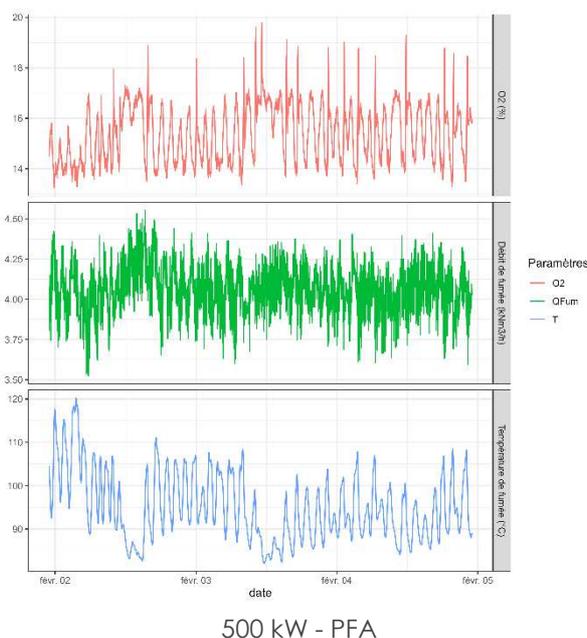
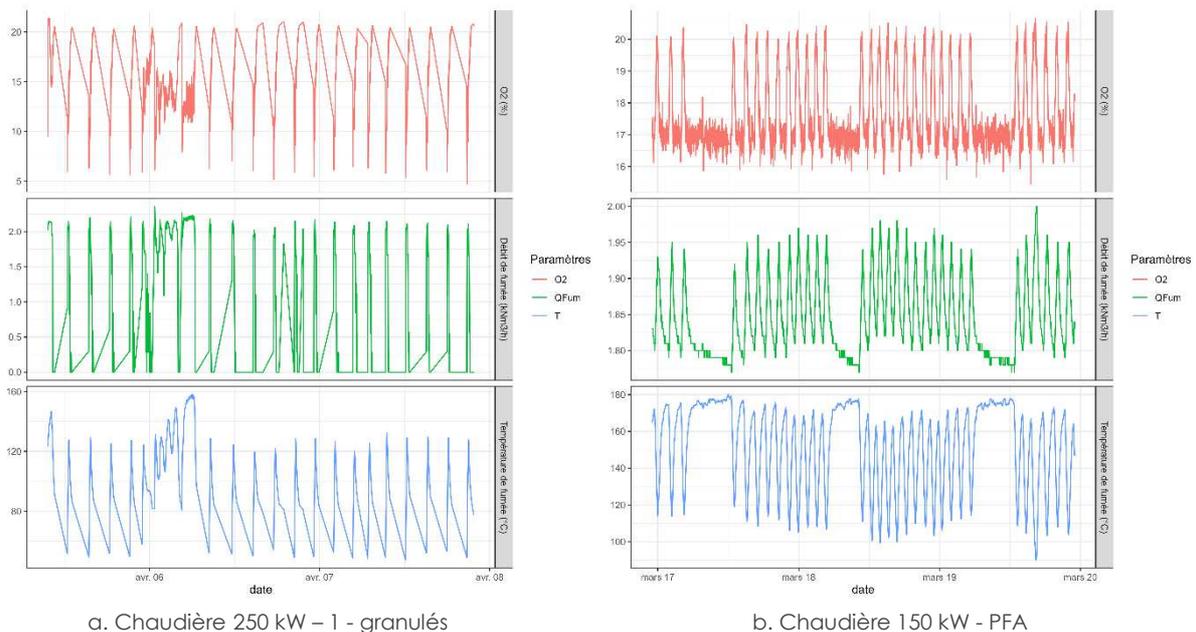


Figure 9 : Données d'oxygène, du débit de fumée et de température de fumée illustrant le fonctionnement de la chaudière 500 kW – PFA lors des mesures réalisées

4.2.2. Des périodes de chauffe brèves et dynamiques

Si des périodes de chauffe continues sur les chaudières instrumentées sur plusieurs mois (« 250 kW – 1 – Granulés ») et « 150 kW – PFA » ont été observées, des cycles de chauffe plus brefs et dynamiques ont également été rencontrés.

Le fonctionnement de la chaudière « 250 kW – 1 – Granulés » est beaucoup plus dynamique avec des cycles de chauffe brefs (Figure 10 a) sur la fin de période de chauffe où les besoins de production de chaleur peuvent être moindres. Cela est ainsi observé début avril lorsque les températures extérieures sont supérieures à 20°C au cours de la journée. De la même manière, la chaudière « 150 kW – PFA » connaît des cycles de chauffe dynamiques et brefs observés en mars (Figure 10 b).



a. Chaudière 250 kW – 1 - granulés

b. Chaudière 150 kW - PFA

Figure 10 : Données d'oxygène, du débit de fumée et de température de fumée illustrant le fonctionnement de la chaudière 250 kW – 1- Granulés lors des mesures réalisées en avril (à gauche) et celui de la chaudière 150 kW – PFA en mars (à droite).

Le fonctionnement de certaines chaudières instrumentées 1 mois présente également des cycles de chauffe relativement brefs (voir Figure 11).

La chaudière « 110 kW – PFA » présente une activité de chauffe très cyclique et d'une durée brève composée d'une montée en charge très rapide directement suivie par un cycle de baisse de charge. L'ensemble du cycle dure environ 5h. Cette chaudière ne présente ainsi pas de période de chauffe continue.

Ce constat est également observé sur la chaudière « 130 kW - Granulés » avec des cycles encore plus marqués entre les périodes de chauffe et d'arrêts. Cependant, ponctuellement et pour une durée relativement faible (quelques heures), la chauffe peut être plus continue (paramètres plus stables et caractéristiques de la période de chauffe : taux d'oxygène faible accompagné d'une température de fumée chaude).

Le fonctionnement de la chaudière « 300 kW – PFA » présente également des périodes brèves de chauffe interrompues par plusieurs heures de non-fonctionnement (taux d'oxygène d'environ 20% représentant le taux ambiant).

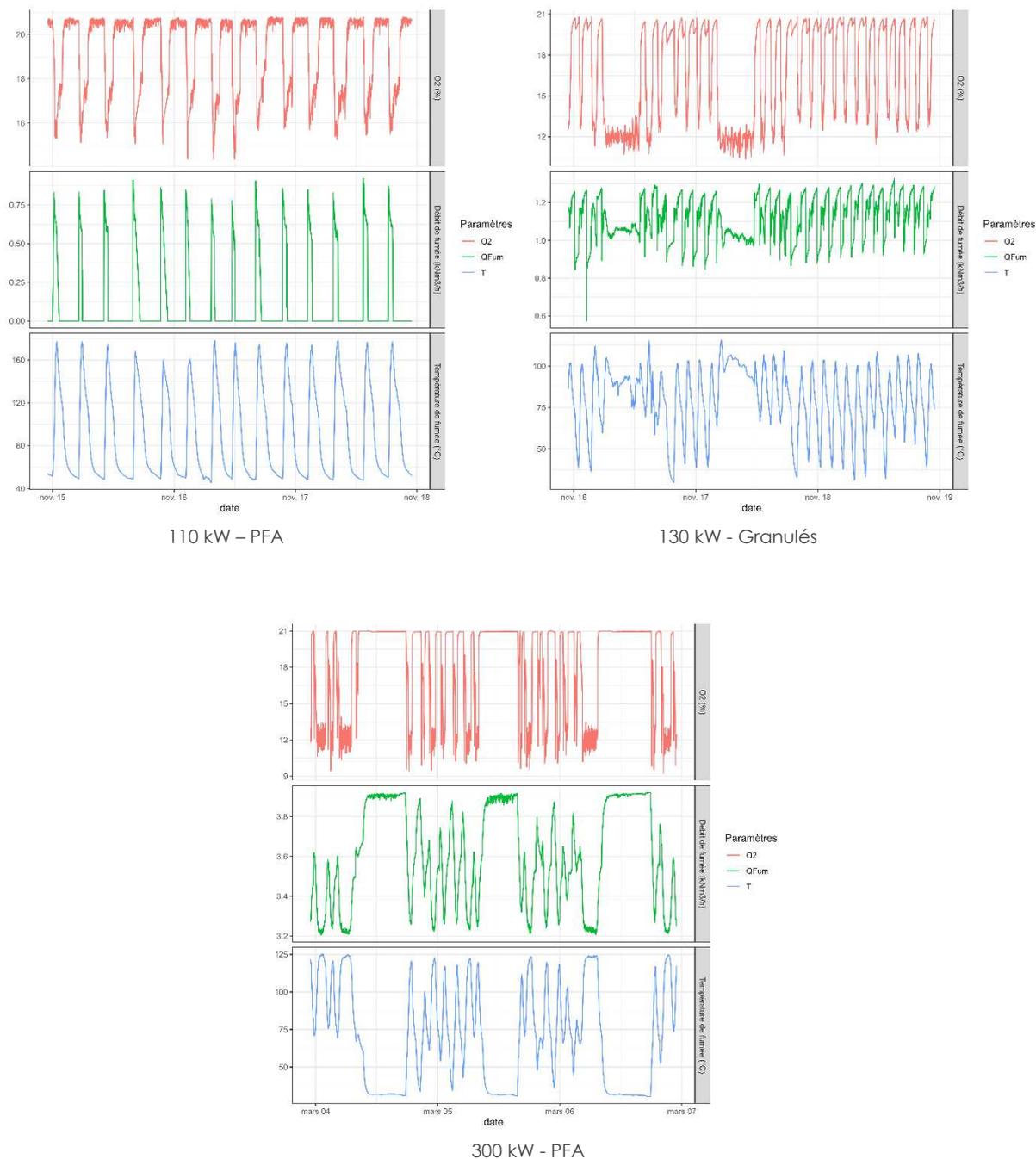


Figure 11 : Données d'oxygène, du débit de fumée et de température de fumée illustrant le fonctionnement des chaudières 110 kW – PFA et 130 kW Granulés lors des mesures réalisées.

Ces modes de fonctionnement très cycliques, oscillants entre les phases de « démarrage/montée en charge », « charge nominale » et « arrêt/baisse de charge » et les émissions de polluants qui en découlent sont étudiées de manière spécifique afin de mettre en relief les phases les plus favorables à une meilleure combustion et à l'inverse les phases les plus défavorables occasionnant plus d'émissions de polluants (cf. chapitre Résultats).

4.2.3. Méthodologie de classification des phases de combustion

Afin d'étudier de manière distincte les différentes phases de combustion décrites dans le chapitre « Fonctionnement des chaudières », un algorithme de classification des données est utilisé. Il s'appuie sur les variations de températures observées, avec des conditions permettant d'identifier les baisses/hausse de températures « importantes », révélatrices d'un changement de régime des chaudières.

Cet algorithme permet d'avoir, pour chaque chaudière et chaque mesure, une information sur le mode de fonctionnement de la chaudière, selon qu'elle soit en phase de « démarrage/montée en charge », en « charge nominale » ou en « arrêt/baisse de charge ».

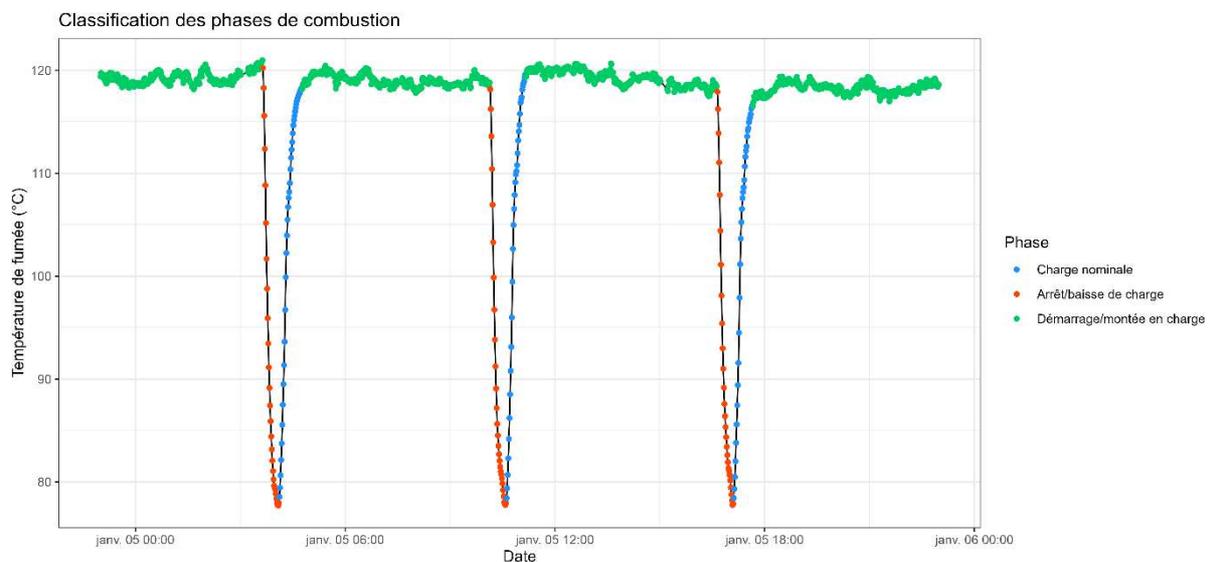


Figure 12 : Exemple de visualisation de la classification des 3 phases de combustion d'une chaudière.

Cette classification a été complétée par une discrimination des phases sans combustion. En effet, si les mesures sont réalisées en continu, certaines périodes correspondent à des périodes où la chaudière est à l'arrêt. Ce filtre a été construit à partir des mesures d'O₂ et de débit des fumées, deux indicateurs de la combustion.

Les données utilisées dans cette étude sont uniquement celles correspondant aux phases de combustion. L'ensemble des taux de fonctionnement et des répartitions des données par phases sont disponibles dans le chapitre « Disponibilité des données ».

4.2.4. Qualité de combustion

La combustion est un processus complexe qui se déroule en plusieurs phases. Lors de cette réaction chimique, les composants organiques du combustible (bois par exemple) réagissent avec l'oxygène de l'air pour produire de la chaleur, du dioxyde de carbone (CO₂), de l'eau (H₂O) et, dans certains cas, du monoxyde de carbone (CO). Cette combustion peut être influencée par des facteurs tels que la température, l'humidité du bois, la quantité d'oxygène disponible et l'efficacité du système de combustion.

La qualité de la combustion influence directement les émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Lorsque la combustion est complète, le carbone du bois réagit avec l'oxygène pour former du dioxyde de carbone. **L'oxygène joue un rôle crucial** dans ce processus ; au fur et à mesure que la combustion progresse, il est consommé. Lorsque l'oxygène est insuffisant, la combustion est incomplète entraînant la formation de **monoxyde de carbone** (CO). Cette formation de CO est particulièrement marquée dans les systèmes de combustion mal ventilés ou lorsque la température est insuffisante pour favoriser une combustion complète. L'efficacité de la combustion dépend donc de l'apport en oxygène : plus l'oxygène est disponible et bien réparti, plus la combustion est complète, réduisant ainsi la formation de CO et maximisant la production de CO₂. Pour garantir une combustion optimale, tous les dispositifs de combustion utilisent un **excès d'air**, afin d'assurer l'oxydation totale des gaz issus de la pyrolyse. Cependant, cet apport doit être contrôlé : un excès d'air trop important peut provoquer un refroidissement de la chambre de combustion, ralentissant ainsi la réaction de combustion et entraînant la formation de CO, au lieu de CO₂¹¹. À l'inverse, un manque d'air peut conduire à une combustion incomplète, générant également des émissions polluantes. Par conséquent, la gestion de l'apport en air est cruciale pour maintenir un équilibre, garantir une combustion efficace et limiter les émissions nuisibles.

Le graphique suivant illustre l'évolution de ces trois paramètres (O₂, CO₂ et CO) au cours des cycles de chauffe de la chaudière « 250-1 kW granulés », du 17 au 18 décembre 2023. La Figure 13 présente en haut l'évolution du taux d'oxygène, au milieu du dioxyde de carbone et en bas celle du monoxyde de carbone. Comme mentionné précédemment, lors de la combustion, le carbone contenu dans le combustible consomme de l'oxygène pour former du dioxyde de carbone. L'encadré bleu met en évidence les évolutions de ces paramètres lors d'une combustion complète ainsi que la faible émission de monoxyde de carbone dans ce cas. Lors des phases d'arrêt ou de démarrage spécifiques à chaque cycle de chauffe, identifiées en rouge sur la Figure 13, des émissions ponctuelles de CO sont observées, ce qui indique une combustion incomplète.

¹¹ Caposciutti, G., et al. (2018). Étude expérimentale de l'influence de l'excès d'air et du déplacement d'air sur les émissions gazeuses de la phase initiale et de la combustion complète d'une petite chaudière biomasse à lit fixe. *Applied Energy*, 216, 576-587.

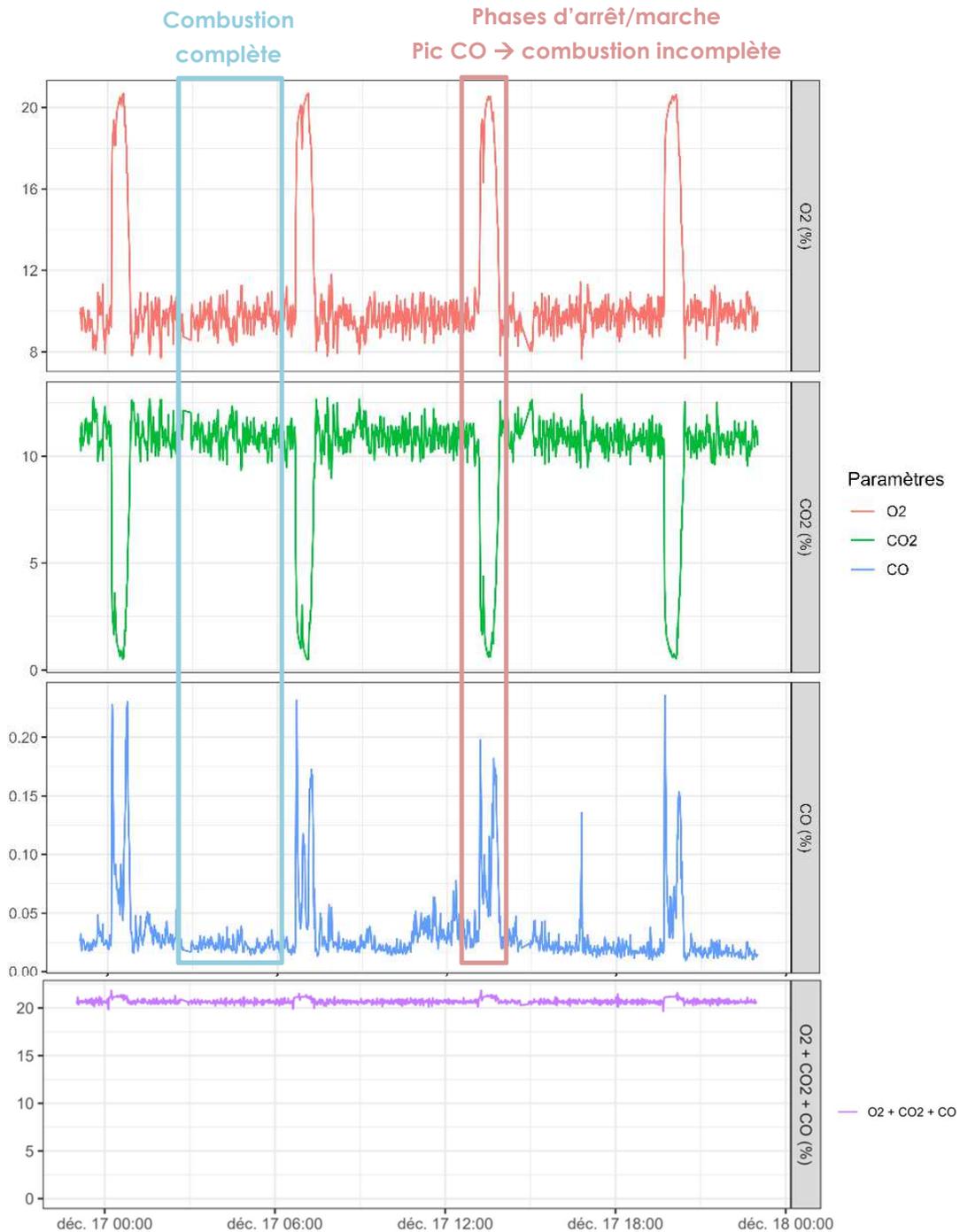


Figure 13 : Evolution des paramètres de CO_2 , O_2 et CO sur la période du 17 au 18 décembre 2023 au niveau de la chaudière « 250-1 kW granulés ».

L'équilibre de l'oxygène dans un système de combustion peut être décrite selon l'équilibre des trois composés contenant de l'oxygène : CO , CO_2 et O_2 .

Il y a un équilibre d'oxygène disponible sous ses différentes formes selon les phases de chauffe engendrant finalement un même taux d'un peu plus de 20%. Cet équilibre est principalement imputable au taux d' O_2 et de CO_2 .

Le monoxyde de carbone est le principal gaz produit lors de la combustion incomplète. Cependant, dans des conditions de combustion particulièrement dégradées, d'autres substances,

telles que le **méthane (CH₄)**, peuvent également être émises. Le méthane se forme lorsque la combustion est incomplète, généralement en raison de températures trop basses ou d'un apport insuffisant en oxygène. Dans ces conditions, la biomasse ne se décompose pas entièrement en dioxyde de carbone (CO₂) et en vapeur d'eau (H₂O), ce qui entraîne la production de CH₄. Le CH₄ est un gaz à effet de serre contribuant par ailleurs à la formation de l'ozone par transformation chimique en présence d'oxydes d'azote (NOx), sous l'effet d'un fort ensoleillement et de températures ambiantes élevées. De plus, contrairement au dioxyde de carbone, il n'est pas compensé par le carbone capté par la plante pendant sa croissance. Ainsi, les émissions de CH₄ lors de la combustion de biomasse viennent se rajouter à celles déjà présentes dans l'atmosphère et ne sont pas compensées même dans l'hypothèse de neutralité carbone du bois énergie.

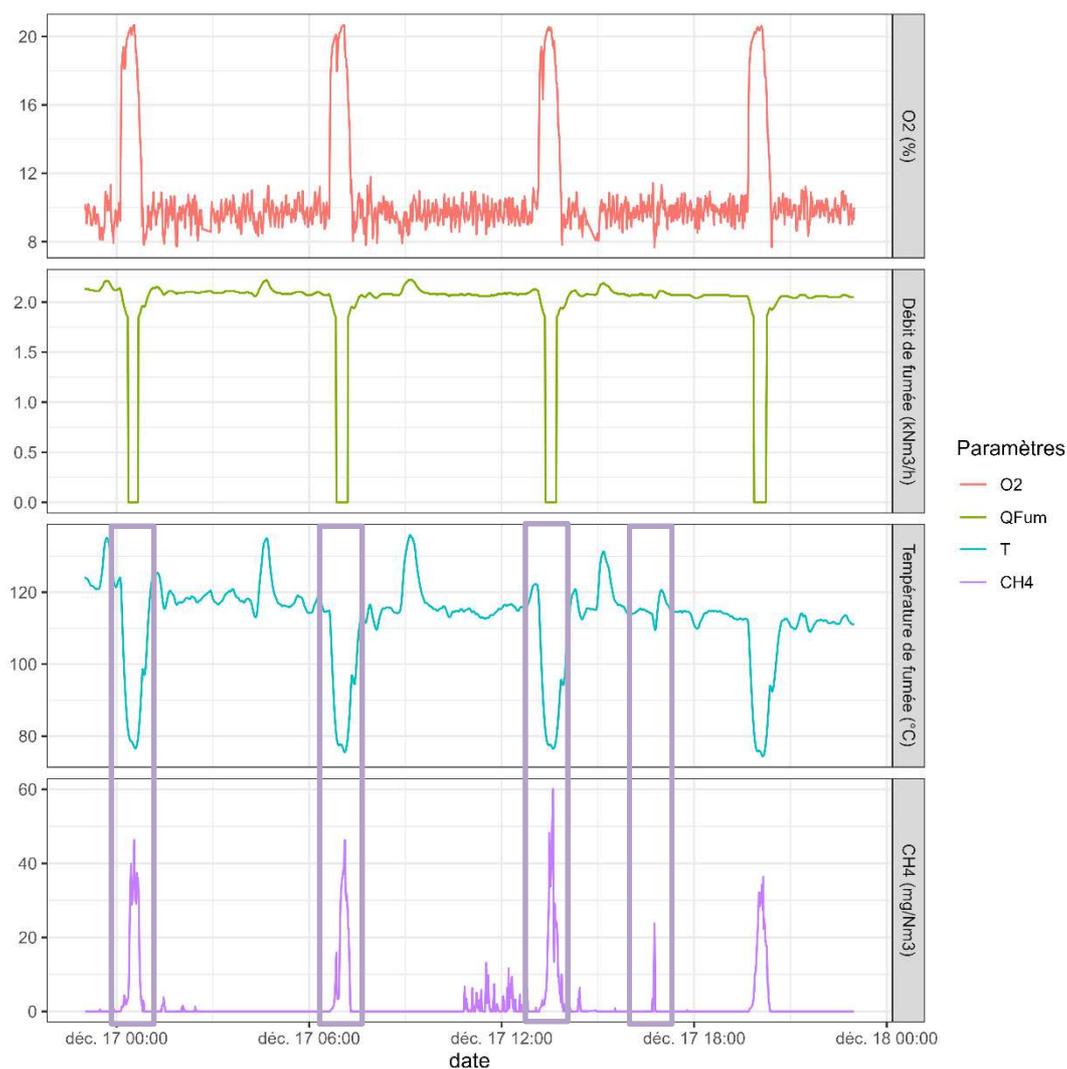


Figure 14 : Evolution des paramètres O₂ et CH₄ sur la période du 17 au 18 décembre 2023 au niveau de la chaudière « 250-1 kW granulés » en fonction du débit et de la température de fumée.

Les concentrations de méthane sont observées lors des phases où la combustion n'est pas optimale à savoir lors des phases de « Démarrage/montée en charge » et « Arrêt/baisse de charge ». Au regard des combustibles utilisés par les chaudières, celles utilisant des granulés ont des concentrations nulles ou très faibles (75% des données inférieures à 1 mg/Nm³) alors que celles utilisant des PFA présentent des concentrations plus élevées (le percentile 75 est compris entre 7 et 74 mg/Nm³).

4.2.5. Analyse des combustibles

Les combustibles utilisés dans le cadre de cette étude sont de deux natures : Granulés ou Plaquettes forestières ou assimilées (PFA).

Afin de caractériser les combustibles utilisés lors des campagnes de mesure, l'analyse des combustibles¹² a été réalisée au début de la période des mesures et lors de la réception de nouveaux lots alimentant les chaudières. Les échantillons de combustible représentent une quantité de 15 kg par prélèvement, soit environ 20 litres pour les PFA. Le nombre d'échantillons dépend à la fois de la durée des mesures et de la capacité de stockage des chaufferies.

L'analyse des combustibles permet de caractériser différents paramètres de composition du bois et ainsi qualifier notamment la qualité du combustible et son influence sur les émissions de polluants. Les analyses concernent les paramètres physiques des combustibles tels que l'humidité, la densité et le taux de cendres, et leurs pouvoirs calorifiques inférieur (PCI) et supérieur (PCS). Ces paramètres permettent de mettre en relief la qualité de la combustion et de l'efficacité énergétique.

Des analyses sur la composition des combustibles sont également réalisées afin de quantifier les éléments chimiques du bois (teneurs en carbone, azote et en éléments minéraux : calcium, potassium, soufre, silice, sodium). De plus, pour au moins un lot par chaufferie des analyses de métaux spécifiques (cuivre, plomb, cadmium, chrome, nickel, zinc, mercure et arsenic) ont été effectuées.

Paramètres physiques des combustibles

Les combustibles à plus haute densité permettent de maximiser le stockage de la biomasse. La densité des combustibles, dite « densité tassée » est la plus importante pour les granulés (plus de 600 kg par mètre cube) alors qu'elle est la plupart du temps trois fois moindre pour les PFA (environ 200 kg/m³). **Les granulés permettent ainsi de concentrer un volume de combustibles plus important dans un volume donné.**

L'humidité contenue dans le bois engendre une augmentation de la consommation de bois pour une même énergie produite. Elle peut également engendrer une combustion incomplète entraînant des émissions de polluants plus importantes. L'humidité contenue dans les granulés est comprise entre 6 et 8% pour l'ensemble des lots analysés. **Celle des plaquettes forestières est beaucoup plus élevée et variable en fonction des lots analysés.** Le taux d'humidité le plus faible pour les PFA est d'environ 17% alors que certains lots présentent des taux d'humidité élevés de 45%. Cette variabilité est à noter pour les différentes chaufferies mais également selon les lots d'une même chaufferie. La chaufferie « 300 kW – PFA » illustre cette variabilité en fonction des lots livrés avec une variabilité du taux d'humidité importante allant de 17% pour le lot le moins humide à 44% pour le plus humide.

Le PCI des combustibles analysés (pouvoir calorifique inférieur) est présenté pour les combustibles « bruts » mais également « secs ». Il représente la quantité d'énergie utile contenue dans les combustibles en joules par gramme (j/g). **Plus le PCI est élevé, plus l'énergie utile délivrée pour une masse définie est importante.**

Compte-tenu de l'humidité plus importante au sein des PFA, l'énergie utile délivrée par quantité de bois brut peut être relativement faible. En effet, un bois humide libère moins d'énergie en brûlant, une partie de la l'énergie étant utilisée pour évaporer l'eau contenue dans le bois. Les lots de

¹² Analyses des combustibles réalisées en laboratoire par SOCOR. L'ensemble des paramètres analysés est accrédité COFRAC hormis pour le Calcium, le Potassium et le Sodium.

combustibles présentant les taux d'humidité les plus élevés, supérieurs à 40%, observe de ce fait les PCI brut les plus faibles compris entre 9 000 à 10 000 j/g.

A l'inverse les granulés ont un taux d'humidité faible et présentent une énergie utile délivrée en moyenne de 17 200 j/g.

En considérant le PCI du combustible sec (PCI sec), les granulés présentent une énergie utile délivrée légèrement supérieures à celle des PFA avec respectivement en moyenne 18 700 j/g contre 18 200 j/g, soit une différence de 3%. Cette différence peut être liée par exemple aux essences d'arbre utilisées. Les différentes essences de bois ont des PCI variables en fonction de la densité du bois, avec des essences « dures » tels que le chêne ou le hêtre dont le PCI est important et à l'inverse des essences plus « tendres » tels que l'épicéa ou le peuplier dont les PCI sont faibles.



Figure 15 : Paramètres physiques des échantillons de combustibles (Granulés en bleu et PFA en orange) analysés pour chaque chaudière selon les lots livrés lors des mesures.

La qualité du bois peut également s'apprécier à travers le **taux de cendres** recueillies après combustion. Les analyses des échantillons de combustibles mettent en évidence globalement des différences de taux de cendres (combustion à 850°C) entre les granulés et les PFA.

Ces cendres sont composées de minéraux (comme le calcium, le potassium, le silicium).

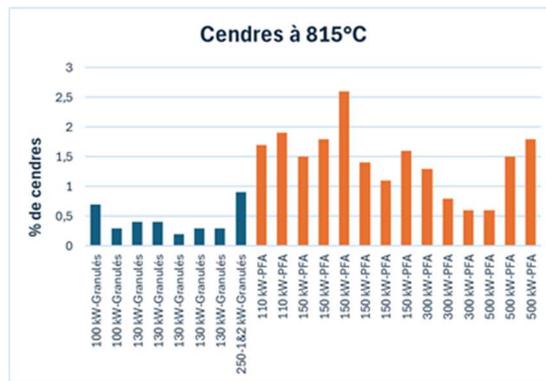


Figure 16 : Taux de cendres à 850°C des combustibles (Granulés en bleu et PFA en orange) analysés pour chaque chaudière selon les lots livrés lors des mesures.

Le taux de cendres permet de qualifier la production énergétique du combustible. En effet, un combustible avec un taux de cendres élevé produit moins d'énergie car la matière minérale n'engendre pas de production d'énergie lors de la combustion.

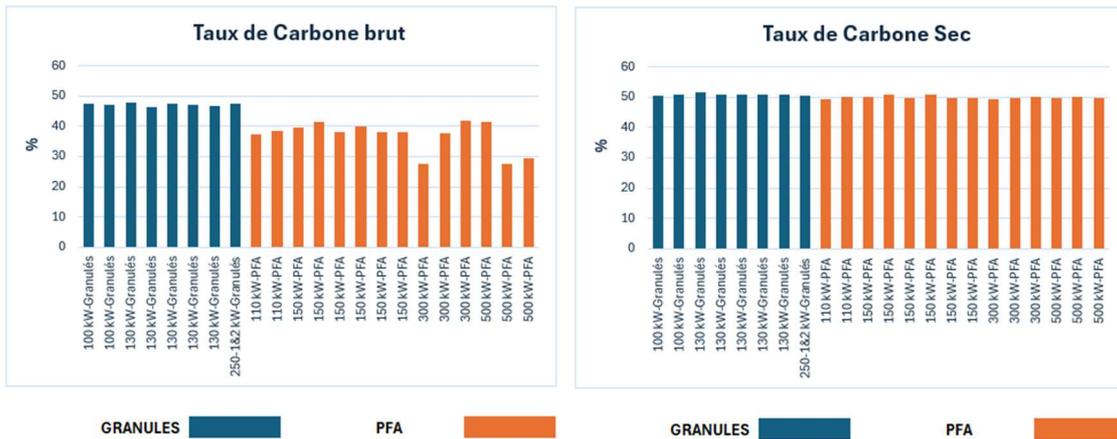
Un taux de cendres élevé peut indiquer que le bois est de qualité inférieure, contenant plus de matières incombustibles. Cela pourrait provenir de la variété de l'arbre, de sa croissance dans un sol riche en minéraux, ou de la présence d'écorce, de saletés, ou d'impuretés dans le bois.

Taux de carbone contenu dans les combustibles

Le taux de carbone contenu dans les combustibles est un paramètre important dans le cadre de la combustion et la production d'énergie. En effet, plus le taux de carbone est élevé et plus la combustion génère de la chaleur. **Ce paramètre est essentiel pour déterminer les facteurs d'émission des polluants mesurés lors de cette étude, en permettant d'estimer la quantité de biomasse consommée à partir des émissions de CO₂.**

Le taux de carbone brut (a) contenu dans les différents lots de combustibles analysés est en moyenne de 47% pour les granulés et de compris entre 27 et 42% pour les PFA (Figure 17). Cette différence s'explique principalement par un taux d'humidité dans les PFA plus important et variable en fonction des lots de combustibles utilisés.

Dans la matière sèche (b), le taux de carbone est relativement similaire pour l'ensemble des lots de combustibles. Il est à noter une très légère différence du taux de carbone dans la matière sèche de granulés et de PFA. En effet, les granulés ont un taux de 51% contre 50% pour les PFA. Cette différence, certes faible, peut être due aux essences d'arbre utilisés mais également à la présence de minéraux plus importants dans les PFA (présence plus importante d'écorce notamment), réduisant ainsi proportionnellement le taux de carbone dans la matière sèche (cf. chapitre « Eléments minéraux contenus dans les combustibles »).



a) Taux de Carbone brut

b) Taux de Carbone dans la matière sèche

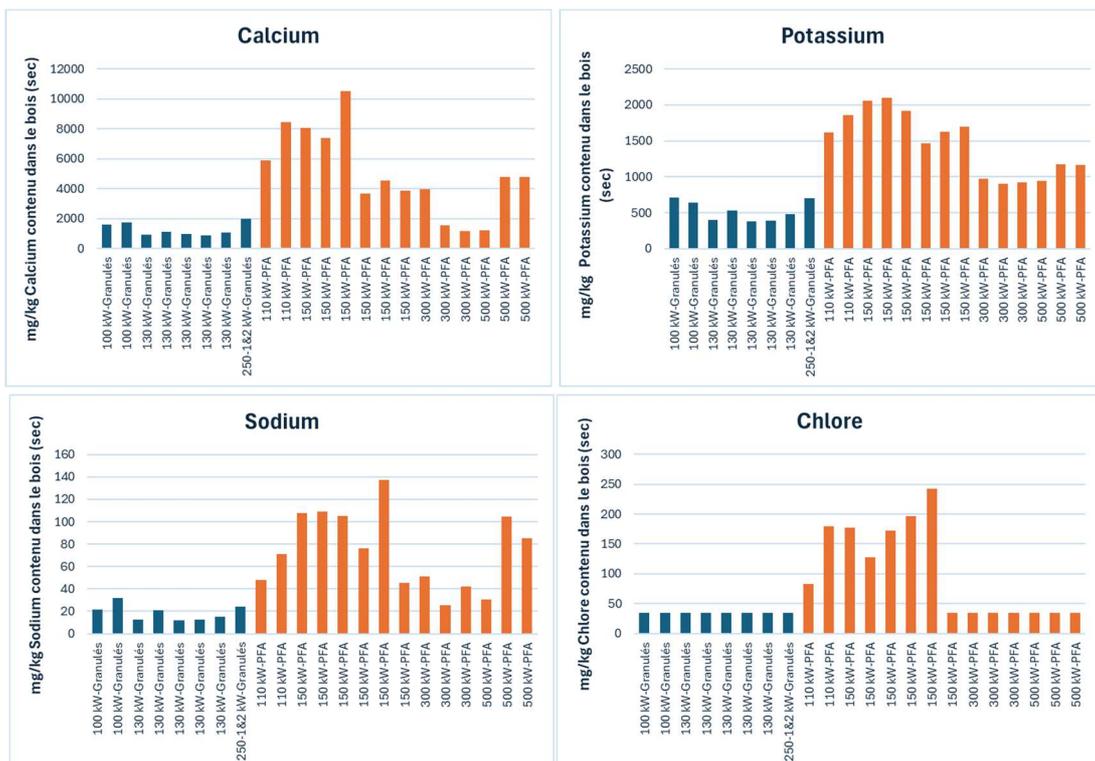
Figure 17 : Taux de carbone brut (a) et taux de carbone dans la matière sèche (b) des combustibles (Granulés en bleu et PFA en orange) analysés pour chaque chaudière selon les lots livrés lors des mesures.

Le taux de carbone plus important dans les granulés, à la fois pour le carbone brut (car moins humide) et le carbone dans la matière sèche, entraîne une moindre consommation de combustible par rapport à l'utilisation de PFA.

Éléments minéraux contenus dans les combustibles

Les éléments minéraux se retrouvent en plus grande quantité dans le combustible PFA engendrant à la fois un taux de cendres supérieur aux granulés et un taux de carbone dans la matière sèche plus faible.

Ces différences entre granulés et PFA peuvent également conduire à des émissions différentes. Par exemple, le potassium et le sodium influencent grandement les concentrations de particules comme cela est présenté dans le chapitre 5.2.2 Concentrations en particules.



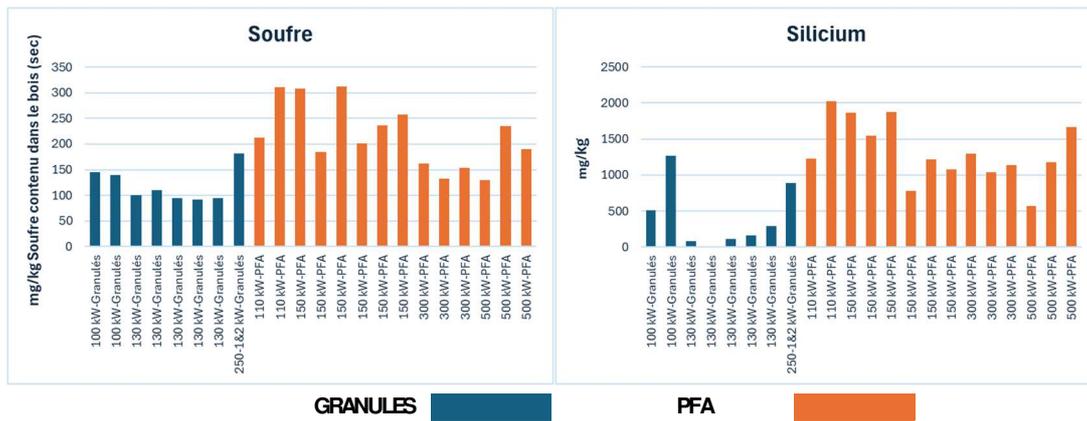


Figure 18 : Quantité de minéraux dans la matière sèche des combustibles (Granulés en bleu et PFA en orange) analysés pour chaque chaudière selon les lots livrés lors des mesures.

Les analyses de chlore dans les échantillons de granulés sont toutes inférieures à la limite de quantification (<70 mg/kg « sec ») : les valeurs retenues sont ainsi « limite de quantification divisée par 2 ». La quantité de chlore sur les PFA est pour certaines chaudières et certains lots également très faible. Les PFA utilisés pour les chaudières 110 kW et 150 kW présentent toutefois une quantité de chlore plus importante comprise entre 80 et 240 mg/kg. Ce chlore dans les combustibles peut engendrer des émissions de dioxines surtout lors de mauvaises conditions de combustion. Ce polluant n'a cependant pas été mesuré lors de cette étude.

Azote contenu dans les combustibles

L'azote contenu dans le combustible engendre des émissions d'oxydes d'azote lors de la combustion du bois.

Si les émissions de NOx lors de la combustion de la biomasse résultent principalement de deux mécanismes, avec les émissions de NOx thermiques et les NOx liés aux combustibles, la majorité des émissions de NOx est liée aux combustibles et à l'azote contenu dans le bois. Elles représentent entre 65 à 95% environ des émissions de NOx des chaufferies biomasse¹³.

Les NOx thermiques sont formés par la réaction de l'azote de l'air à haute température. Plus la température de combustion est élevée, plus la formation de NOx thermiques est importante.

¹³ « Emissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1MW – Campagnes de mesures sur site et proposition d'évolution des facteurs d'émission ». Projet ACIBIOQA. Rapport. 68 pages - Mai 2023

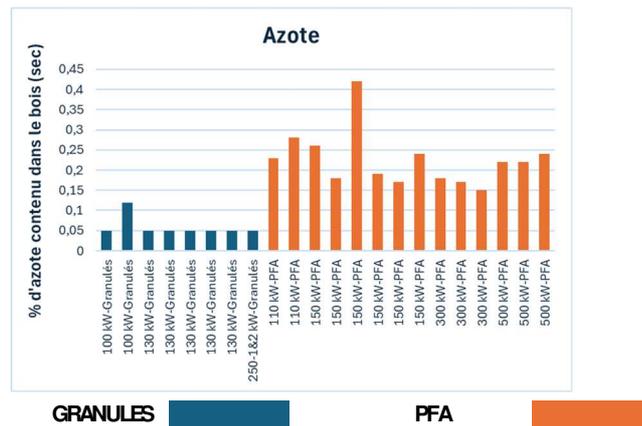


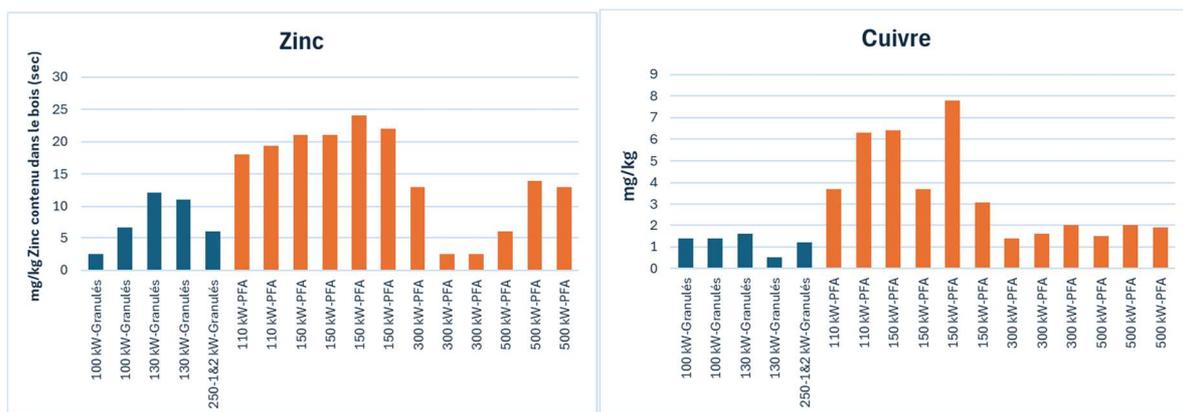
Figure 19 : Taux d'azote contenu dans la matière sèche des combustibles (Granulés en bleu et PFA en orange) analysés pour chaque chaudière selon les lots livrés lors des mesures.

Les granulés utilisés dans le cadre des chaufferies étudiées ont un taux d'azote très faible généralement en dessous de la limite de quantification fixée à 0.1%¹⁴, hormis pour un lot pour lequel ce taux est de 1.2%. Pour les PFA, l'azote contenu dans ce combustible est plus élevé et variable avec des taux allant de 0.15% pour le taux le plus faible à plus de 0.4% pour le lot le plus fort. La variabilité du taux d'azote des combustibles utilisés est très importante même selon les lots pour une même chaudière comme cela est le cas pour la chaudière « 150 kW-PFA » où ce taux est de 0.17% à 0.42%

Métaux contenus dans les combustibles

De manière générale, les teneurs en métaux dans les combustibles utilisés dans le cadre de cette étude sont très faibles.

Les combustibles PFA utilisés par les chaufferies « 110 kW – PFA » et « 150 kW – PFA » concentrent toutefois des quantités de zinc, de cuivre et de plomb un peu plus importantes.



¹⁴ Afin de définir une valeur lorsque l'analyse d'un composé est inférieure à la limite de quantification, il est d'usage de fournir la valeur de la limite de quantification divisée par 2.

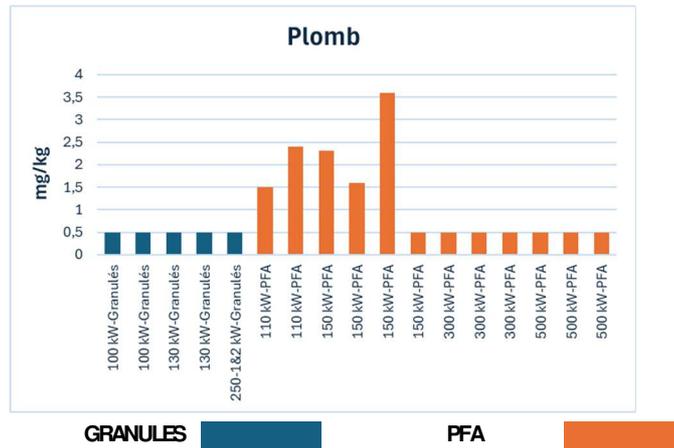


Figure 20 : Quantité de métaux contenu dans la matière sèche des combustibles (Granulés en bleu et PFA en orange) analysés pour chaque chaudière selon les lots livrés lors des mesures.

Pour les autres métaux, les quantités sont inférieures à la limite de quantification. Les quantités¹⁴ contenues dans tous les lots de combustibles selon les métaux analysés sont de 0.5 mg/kg pour l'arsenic, de 0.2 mg/kg pour le cadmium, de 0.5 mg/kg pour le chrome (hormis 1 valeur à 1 mg/kg sur un lot des chaudières 250 kW – Granulés), de 0.05 mg/kg de mercure et de 0.5 de nickel.

Il est à noter les difficultés de connaître avec précision la période d'utilisation des lots de combustibles analysés. Les combustibles brûlés par les chaudières n'ont pu être clairement identifiés.

5. Résultats

5.1. Disponibilité des données

L'analyse des données issues des mesures à l'émission des chaudières est présentée dans les paragraphes suivants. Il est important de noter que les interprétations sont réalisées à partir d'un nombre de données disponible différent pour chaque chaudière. Cela est dû à la durée d'instrumentation, à la récurrence des périodes de chauffe différente selon les campagnes de mesure et à d'éventuels problèmes techniques rencontrés (appareils de mesure ou chaudière) etc.

Le taux de données disponibles correspond au **taux de fonctionnement des appareils de mesure** quel que soit le mode de fonctionnement des chaudières, y compris à l'arrêt.

Les taux de fonctionnement ont été calculés à partir des données enregistrées à la minute auprès des huit chaudières. Le taux de disponibilité est compris selon les chaudières entre 43% et 85% pour les polluants gazeux et entre 12% et 77% pour les données particulières (voir détails en Annexe 1).

Comme les besoins en chauffage des bâtiments alimentés peuvent être différents selon la période de l'année, **les périodes de chauffe pendant les mesures sont plus ou moins importantes en fonction des chaudières**. Ainsi le taux de données recueillies lors du fonctionnement des chaudières (période de chauffe) est très variable. Il est compris entre 31% et 90% pour l'instrumentation des appareils permettant la mesure des gaz et de 32 à 93% pour la mesure des particules (voir détails en Annexe 1). Par exemple, les chaudières « 250 kW – 1 Granulés » et « 150 kW – PFA » connaissent un fonctionnement important puisque 90% du temps où les mesures de gaz sont disponibles, il y a eu une production de chaleur. A l'inverse, lors des périodes étudiées, ce besoin de production de chaleur est assez peu important pour certaines chaudières (chaudières « 110 kW – PFA » et « 300 kW – PFA ») avec une période de chauffe durant environ 2/3 du temps.

De plus, comme illustré au chapitre « 4.2 Fonctionnement des chaudières », les cycles en périodes de chauffe des chaudières sont différents avec des périodes de « démarrage/ montée en charge », « phase nominale de chauffe » et de « baisse de charge » plus ou moins récurrentes. Notamment, compte tenu de son caractère de chauffe très bref, la chaufferie « 110 kW – PFA » ne présente pas de temps de chauffe en période nominale. Le cycle de chauffe est uniquement marqué par des périodes de « montée en charge » puis à partir du point de chauffe arrivée à son apogée, une période de baisse de charge. Du fait de ce mode de fonctionnement, les données disponibles sont uniquement lors de la « montée en charge », pour un peu moins de 40% du temps et pour un peu plus de 60% du temps pour la phase de « baisse de charge », celle-ci étant plus longue que la montée en charge qui est brève et rapide. Le fonctionnement également très dynamique de la chaudière « 300 kW – PFA » entraîne des temps de fonctionnement en phases de « montée en charge » les plus représentés (près de 60%).

Pour les autres chaudières, **la chauffe en « phase nominale » est la plus représentée. Lors de la période de chauffe, les phases de « montée en charge » sont généralement plus longues que celles de « baisse de charge ».**

L'interprétation et les conclusions apportées selon les cycles de chauffe sont ainsi généralement plus robustes en « phase nominale » lors de laquelle le nombre de données est plus important.

5.2. Concentrations en sortie de cheminée

L'interprétation des concentrations mesurées au sein des cheminées est relative à des valeurs indicatives définies et un zoom permettant de mettre en relief les concentrations en fonction des phases de fonctionnement des chaudières. De plus, des analyses ont été effectuées afin d'évaluer le comportement des émissions des différents polluants selon divers facteurs potentiellement influents.

Comme précisé dans la partie contexte de ce rapport, des réglementations s'appliquent aux chaudières de faible puissance telles qu'instrumentées dans cette étude. Elles permettent notamment de comparer les mesures à l'émissions à des valeurs de de référence :

Les valeurs indicatives de l'arrêté du 2 octobre 2009

- o **750 mg / Nm³ à 6%** d'oxygène (550 mg / Nm³ à 11% d'oxygène) **pour les NOx en équivalent NO₂**
- o **225 mg / Nm³ à 6%** d'oxygène (150 mg / Nm³ à 11% d'oxygène) **pour les particules (particules totales)**

La valeur limite pour le **monoxyde de carbone** définie par l'article 17 de l'arrêté interpréfectoral du 9 janvier 2025 relatif à l'approbation et à la mise en œuvre du Plan de Protection de l'Atmosphère pour l'Île-de-France, applicable aux installations de combustion de biomasse de puissance supérieure à 300 kW mis en service postérieurement au 1^{er} avril 2008 dans les départements d'Ile-de-France, hors Paris (**375 mg/Nm³ à 6% d'O₂**)

La **réglementation européenne d'écoconception** concernant les chaudières de puissances inférieures ou égales à 500 kW, qui impose des valeurs limites d'émission avant la mise sur le marché des installations. Cette réglementation s'applique aux chaudières installées à partir de janvier 2020.

Le Tableau 2 récapitule ces valeurs de référence.

Réglementation	Puissance	NOx (mg/Nm ³)	Poussières (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)
Arrêté du 2/10/2009 relatif au contrôle des chaudières - Article 12 du PPA 2025	< 20 MW	750 (6% d'O ₂) (valeur indicative)	225 (6% d'O ₂) (valeur indicative)	-
Article 17 du PPA 2025	< 20 MW	-	-	375 (6% d'O ₂)
Règlement européen 2015/1189 de la Commission – 28 avril 2015	<= 500 kW	273 (6% d'O ₂) (chaudières mises en service à partir de janvier 2020)	55 (6% d'O ₂) (chaudières mises en service à partir de janvier 2020)	750 (6% d'O ₂) – pas prise en compte dans l'étude

Tableau 2 : Synthèse des valeurs de référence mises au regard des résultats de l'étude.

Des mesures de dioxyde de soufre (SO₂) ont également été réalisées mais les concentrations obtenues sont inférieures à la limite de quantification des appareils et aucune dynamique rencontrée n'est exploitable.

L'analyse des facteurs d'influence est réalisée à l'aide d'un modèle statistique. L'objectif de ce modèle est d'analyser l'influence (favorable ou défavorable) d'un ensemble de variables explicatives sur les concentrations des différentes chaudières et pour les différents polluants étudiés. Il permet également de les hiérarchiser par ordre d'importance. Le jeu de données pris pour ce modèle est celui au pas de temps minute, donc un ensemble d'environ 12 800 données (en prenant en compte seulement les données disponibles durant le temps de chauffe effectif). Cette hiérarchisation permet une visualisation globale de l'influence de certains paramètres sur les concentrations mesurées de chaque polluant, appuyée par des statistiques robustes sur un grand nombre de données. Les paramètres liés au fonctionnement des chaudières selon les phases de chauffe et selon l'excès d'air, la puissance des chaudières, les combustibles utilisés ainsi que leur composition (taux d'azote, éléments minéraux etc...) sont pris en compte pour établir ce modèle. L'Annexe 2 explique plus en détails les étapes d'élaboration de ce modèle.

5.2.1. Concentrations en oxydes d'azote (NOx)

La Figure 21 présente, à l'aide de boîtes à moustaches, **la distribution de l'ensemble des concentrations de NOx émises par minute, toutes phases confondues et pour chaque chaudière instrumentée**. Ces concentrations sont comparées à la valeur indicative de 750 mg/Nm³ à 6% d'O₂, définie par l'arrêté du 2 octobre 2009, ainsi qu'à la valeur de 273 mg/Nm³ à 6% d'O₂ imposée par la réglementation européenne sur l'écoconception, comme précisé dans le Tableau 2.

Les chaudières fonctionnant aux granulés sont représentées par des boîtes bleues, tandis que celles utilisant du PFA sont représentées par des boîtes orange. La valeur indicative issue de l'arrêté est indiquée par une ligne rouge et celle concernant la réglementation écoconception en pointillés rouges.

En considérant l'ensemble des données recueillies durant la période de chauffe, sans distinction de phase, **les concentrations en NOx sont plus élevées pour les chaudières à PFA, particulièrement pour les puissances les plus faibles**, à savoir « 110 kW – PFA » et « 150 kW – PFA ». Les valeurs médianes de ces dernières sont respectivement de 410 et 420 mg/Nm³.

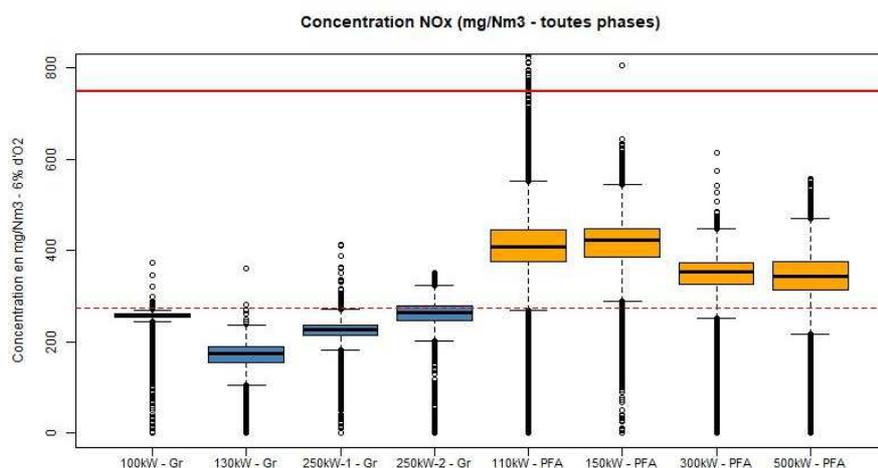


Figure 21 : Distribution des concentrations d'oxydes d'azote des huit chaudières sur l'ensemble du cycle de chauffe mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulés en bleu ; chaudière à PFA en orange).

Les chaudières à granulés présentent à la fois des concentrations en NOx inférieures à celles observées pour les chaudières à PFA mais également enregistrent des niveaux plus homogènes.

Il est à noter que les combustibles granulés contiennent un taux d'azote très faible (0.05%) alors que les taux de PFA sont en moyenne de 0.2%. Cela peut ainsi entraîner des concentrations de NOx plus importantes avec l'utilisation de PFA.

L'ensemble des données mesurées en période de chauffe pour les chaudières utilisant les granulés présentent des concentrations inférieures à la valeur indicative de 750 mg/Nm³ (6% d'O₂). Concernant les chaufferies utilisant du PFA, seule la chaudière de petite puissance (110 kW - PFA) présente très ponctuellement des concentrations de NOx plus élevées que cette valeur indicative avec moins de 0.3% du temps. Les chaufferies « 150 kW – PFA » et « 300 kW – PFA » enregistre 1 seule donnée supérieure à 750 mg/Nm³ ce qui est très faible au regard du nombre de données collectées de 210 000 dont plus de 19 000 en période de chauffe.

Par rapport à la valeur de référence issue de la réglementation sur l'écoconception, fixée à 273 mg/Nm³ à 6%, non directement applicable, les chaudières instrumentées étant antérieures à son application, toutes les chaudières utilisant des PFA présentent des dépassements très récurrents variant entre 86% et 99% du temps.

Les chaudières à granulés montrent des dépassements beaucoup plus ponctuels, généralement inférieurs à 1% du temps. La chaudière « 250 kW – Granulés » enregistre plus de dépassements, de faibles intensité (33% du temps).

Les concentrations de NOx selon les différentes phases de chauffe sont en revanche différentes. Le graphique Figure 22 illustre, à l'aide d'histogrammes, le pourcentage de valeurs au-dessus du seuil de 273 mg/Nm³, utilisé en référence, pour chaque chaudière durant les différentes phases : « Démarrage/montée en charge » (en jaune), « charge nominale » (en rouge) et « Arrêt/baisse de charge » (en rose). De manière générale, les teneurs les plus élevées et supérieures à 273 mg/Nm³ surviennent de manière plus récurrente lors de phases de charge nominale. Ces « dépassements » sont donc plus significatifs lors des phases où la température du foyer est la plus élevée, favorisant ainsi la formation de NOx thermiques résultant de la réaction entre l'azote de l'air et l'oxygène à des températures élevées.

Les phases de baisse de charge affichent au contraire des teneurs plus faibles et ainsi une fréquence de valeurs au-dessus du seuil de 273 mg/Nm³ moins importante pour l'ensemble des chaudières. Lors de ces phases de chauffe, l'excès d'air sur les chaudières est important réduisant la température au sein du foyer et ainsi limitant la formation de NOx. Si cet excès d'air paraît intéressant pour limiter les émissions d'oxydes d'azote, il engendre au contraire des teneurs de particules et de monoxyde de carbone plus élevées (cf. chapitres suivants). Il est à noter que, sur la période des mesures, la chaudière de « 110 kW – PFA », ne présente pas de phase de stabilité de chauffe (charge nominale) ; elle suit un cycle de montée en charge, suivi d'une phase de descente lorsque la température maximale de chauffe est atteinte.

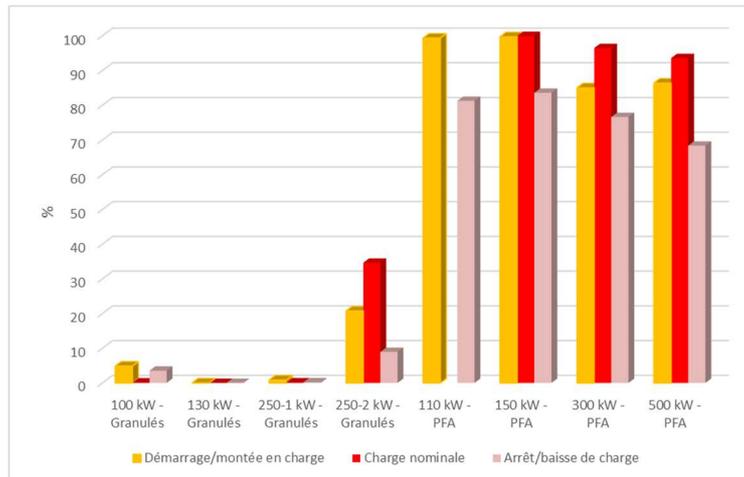


Figure 22 : Histogramme présentant le pourcentage de dépassement de la valeur de référence 273 mg/Nm³ (6% d'O₂) pour chaque chaudière selon les phases du cycle de chauffe : montée en charge (en rouge), charge nominale (en jaune) et baisse de charge (en rose).

Compte tenu du nombre très faible de données dont les concentrations sont au-delà de 750 mg/Nm³, l'interprétation par phase de chauffe n'est pas significative.

Les distributions des concentrations en NO_x au niveau de chaque chaudière à l'aide de boîte à moustache selon chaque phase sont présentées en Annexe 3.

Le modèle statistique élaboré pour étudier ces données permet d'établir une **hiérarchisation des facteurs d'influence des concentrations d'oxydes d'azote** pour les chaudières biomasse.

Le modèle atteint un R² de 0.85 pour les NO_x, ce qui traduit que les paramètres considérés expliquent 85% de la variabilité des données.

La Figure 23 présente les résultats du modèle statistique. Les premiers paramètres représentent ceux exerçant les influences les plus importantes (ordre décroissant d'importance) sur les concentrations de NO_x. Les couleurs sont en bleu lorsque la valeur du paramètre d'influence est faible et en rouge lorsque la valeur du paramètre d'influence est élevée.

Les facteurs d'influence principaux expliquant la variabilité des concentrations de NO_x sont par ordre d'importance :

Le type de combustible : Le type de combustible ressort comme étant le premier paramètre d'influence sur les concentrations de NO_x. Ainsi, les chaudières utilisant comme combustible les PFA (« 0 » pour les PFA en bleu) engendrent des concentrations plus élevées de NO_x que celles utilisant des granulés (« 1 » pour les granulés en rouge).

La puissance de la chaudière : Les chaudières dont les puissances sont les plus petites observent des concentrations de NO_x plus importantes que celles de plus grande puissance.

L'excès d'air : Un excès d'air important contribue à mesurer des concentrations de NO_x plus faibles, limitant la température du foyer et ainsi limitant la formation de NO_x.

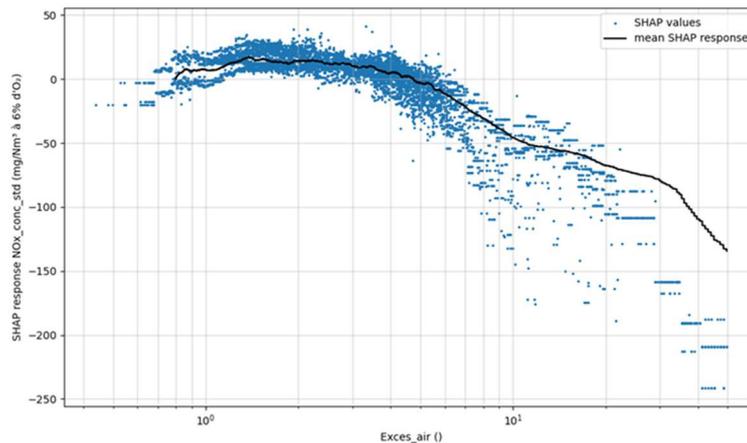


Figure 23 : Courbes de réponse du modèle : influence sur les concentrations de NOx (SHAP values) en fonction de l'excès d'air (une valeur SHAP négative indique une réduction des concentrations, une valeur SHAP positive indique une augmentation des concentrations)

Le modèle statistique note l'influence de l'excès d'air sur les teneurs de NOx. Ainsi, à partir d'un excès d'air de 4 à 5, les teneurs de NOx diminuent. Cet excès d'air est trop important pour une combustion optimale et complète (engendrant des concentrations les plus importantes de particules et de CO importantes) mais compte tenu de la baisse de température du foyer lors de ces conditions dégradées, la formation de NOx est limitée.

Le taux d'azote contenu dans les combustibles : Plus le taux d'azote contenu dans le combustible utilisé est important plus les concentrations en NOx peuvent être élevées. Le taux d'azote est en lien avec le type de combustible puisque les granulés contiennent un taux d'azote très faible (0.05%) alors que les taux de PFA sont en moyenne de 0.2%.

La phase de chauffe : Le cycle de chauffe est également un paramètre ressortant comme étant un paramètre d'influence même si celui-ci semble plus faible que ceux précédemment mentionnés. La phase de « démarrage/montée en charge » (en rouge) occasionne les concentrations de NOx les plus élevées alors qu'au contraire la phase « d'arrêt/baisse de charge » observe les teneurs les plus faibles (en violet).

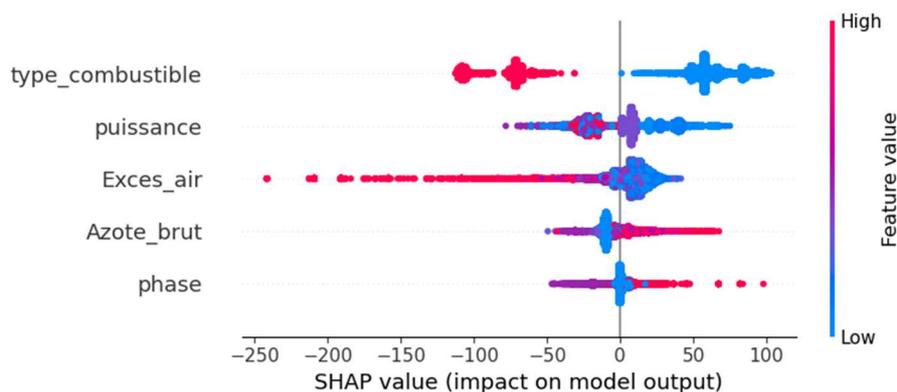


Figure 24 : Influence des facteurs pris en compte dans le modèle statistique sur les concentrations de NOx en fonction de leur valeur, et hiérarchisation des facteurs entre eux.

Au-delà de la hiérarchie des paramètres d'influence définie par le modèle, **le poids des facteurs d'influence pris en compte pour expliquer la variabilité des concentrations de NOx des chaudières biomasse** est très variable. Ainsi, le type de combustible, 1^{er} facteur d'influence, explique à lui seul plus de la moitié (57%) de la variabilité des concentrations de NOx déterminée par les paramètres

pris en compte. Le poids des autres facteurs d'influence pour expliquer la variabilité des concentrations est plus faible avec 17% pour la puissance des chaudières, 13% pour l'excès d'air, 8% pour l'azote contenu dans le bois et enfin 4% pour la phase de chauffe.

5.2.2. Concentrations en particules (en masse)

Les concentrations de particules dans les rejets des chaudières de petites puissances instrumentées dans le cadre de l'étude sont comparées au **seuil indicatif de l'arrêté du 2 octobre 2009 de 225 mg/Nm³ à 6% d'O₂**, et à la valeur limite d'émission de la réglementation **écoconception de 55 mg/Nm³ à 6% d'O₂**. Cette dernière, bien que non applicable aux chaudières instrumentées, permet de relativiser les émissions de particules par rapport à des chaudières mises sur le marché plus récemment.

La Figure 25 présente la distribution des concentrations de particules totales pour les huit chaudières instrumentées, intégrant l'ensemble des données mesurées en période de chauffe (quelle que soit la phase de chauffe) sous la forme de boîtes à moustaches.

Les concentrations de particules mesurées dans les rejets des chaudières sont très variables. A l'aide de la médiane des concentrations, cette variabilité peut être illustrée avec les teneurs les plus importantes mesurées sur la chaudière de « 150 kW – PFA » et les plus faibles de 100 kW Granulés » avec respectivement des médianes de 250 et 32 mg/Nm³. **Les chaudières dont les concentrations de particules sont les plus élevées présentent également une plus grande variabilité de leurs concentrations.** Cette variabilité sur la chaudière de « 110 kW – PFA » est liée à son fonctionnement sur la période de mesure qui est caractérisé par des phases de chauffe uniquement composées de « démarrage/montée en charge » et « d'arrêt/baisse de charge ». Cette chaudière n'a pas de période de chauffe nominale à allure stable. La chaufferie de « 150 kW – PFA », dont les teneurs sont les plus élevées, compte au contraire une période de chauffe en phase nominale la plupart du temps (environ 85% du temps). Cette variabilité n'est ainsi pas liée à une phase spécifique même si la phase « d'arrêt/baisse de charge » recueille une variabilité encore plus importante. A l'inverse, les chaudières dont les concentrations sont les plus faibles présentent des concentrations de particules stables même si généralement les concentrations en phase « d'arrêt/baisse de charge » sont plus fluctuantes.

Au regard du seuil indicatif de l'arrêté du 2 octobre 2009 de **225 mg/Nm³ à 6% d'O₂** (ligne rouge de la Figure 25), les chaudières utilisant des granulés voient leurs concentrations inférieures à ce seuil, hormis très ponctuellement. Les concentrations supérieures à 225 mg/Nm³ représentent entre 1% et 4% des données recueillies lors de la campagne de mesure, respectivement pour les chaudières de « 130 kW Granulés » et « 250 kW – 1 Granulés ».

Au même titre que les chaudières à granulés, la chaudière à PFA de plus grande puissance (500 kW - PFA), n'observe des valeurs supérieures au seuil que durant 3% du temps de chauffe. Le dépassement de ce seuil indicatif pour les autres chaudières à PFA, de plus petite puissance, est plus régulièrement mesuré sur les chaudières « 110 kW – PFA » et « 150 kW - PFA » avec une occurrence respective de près de 30% et 60% du temps.

La variabilité des durées avec des valeurs supérieures au seuil de 225 mg/Nm³ à 6% d'O₂ est très importante selon les chaudières PFA instrumentées alors que les dépassements de ce seuil pour les chaudières granulés sont relativement faibles pour chacune d'elle.

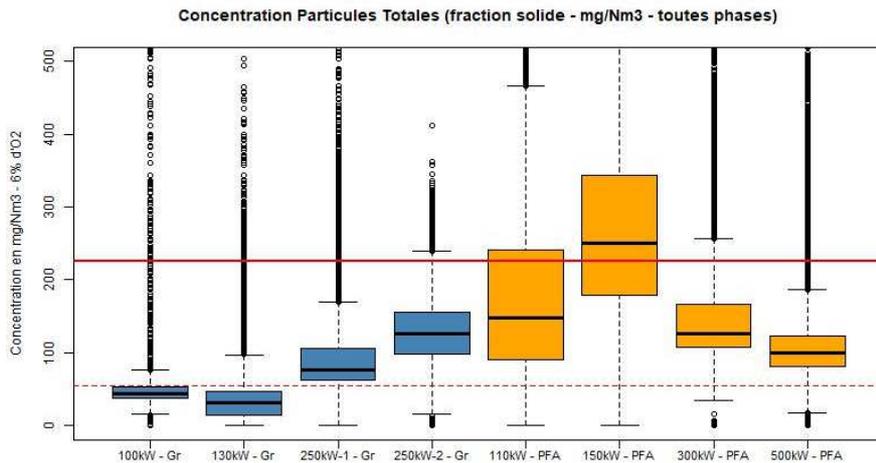


Figure 25 : Distribution des concentrations de particules totales pour les huit chaudières mise au regard du seuil de référence défini par le PPA (trait plein rouge) et la réglementation écoconception (trait pointillé rouge) - (chaudière à granulés en bleu ; chaudière à PFA en orange).

La récurrence des concentrations supérieures à 225 mg/Nm³ à 6% d'O₂ est à mettre en lien avec les différentes phases de chauffe.

La Figure 26 présente ainsi le pourcentage de dépassement selon les trois phases de chauffe des chaufferies. Pour les chaudières à granulés, c'est durant la phase « d'arrêt /montée en charge » que les teneurs les plus élevées sont mesurées. La chaudière de « 100 kW – Granulés » enregistre plus de 40% des données recueillies durant cette phase comme étant supérieures au seuil de 225 mg/Nm³. Pour les autres chaudières à granulés, l'occurrence de valeurs supérieures à ce seuil est inférieure à 10% du temps lors de cette phase de chauffe.

Ce constat est également vrai pour deux chaudières à PFA (« 150 kW – PFA ») et « 500 kW – PFA ») dont la phase « d'arrêt /montée en charge » entraîne des teneurs plus élevées de particules. Toutefois, une spécificité est à noter pour les chaudières à PFA de puissance 110 kW et 300 kW qui enregistrent également des niveaux élevés de particules durant les phases de « Démarrage/montée en charge » avec une occurrence de valeurs supérieures à 225 mg/Nm³ supérieure à la phase de « d'arrêt /montée en charge ». Le point commun entre ces deux chaudières est leur type de fonctionnement dont les périodes de chauffe sont très dynamiques et brèves (cf. 4.2.2 Des périodes de chauffe brèves et dynamiques). Ce type de fonctionnement oscille entre ces phases durant laquelle la combustion n'est pas la plus optimale. De plus, durant ces phases de chauffes, l'excès d'air dans le foyer pour ces chaudières est important ne favorisant pas une efficacité de la combustion avec un refroidissement de la chambre de combustion. Cela est ainsi propice à des émissions de particules plus élevées.

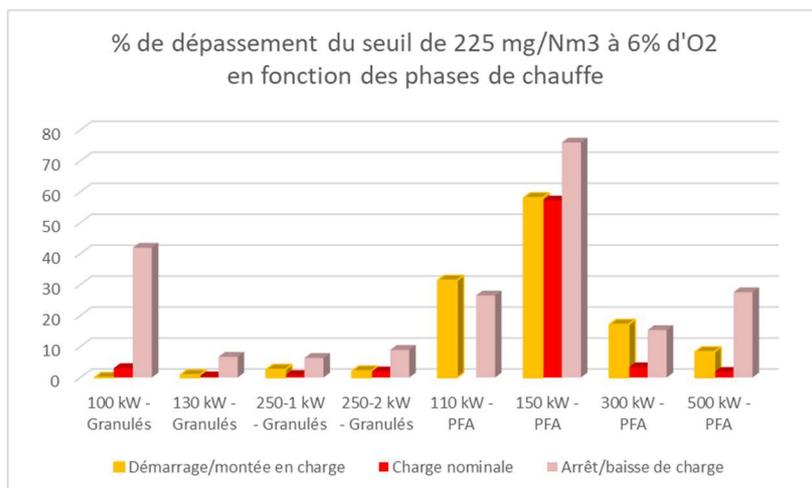


Figure 26 : Pourcentage de concentration dépassant le seuil de 225 mg/Nm³ à 6% d'O₂ selon les phases de chauffe des huit chaudières instrumentées durant la campagne de mesure.

Contrairement aux concentrations de NO_x (et de CO : cf. chapitre suivant), la phase « d'Arrêt/baisse de charge » observe les teneurs de particules les plus élevées avec une récurrence de valeurs supérieures à 225 mg/Nm³ à 6% d'O₂ plus importante lors de cette période où l'excès d'air entraîne des températures plus faibles et une combustion de moins bonne qualité.

Les phases de transition (« Démarrage/montée en charge » et « Arrêt/baisse de charge ») observent des concentrations de particules plus élevées que période de chauffe nominale (chauffe continue). Ainsi, afin de limiter ces périodes propices aux fortes concentrations, il est préférable de bien dimensionner les chaudières en lien avec l'énergie nécessaire à délivrer. Une chaudière surdimensionnée observera des phases de transition répétées et ainsi des concentrations de particules plus élevées.

Le **dépassement du seuil de l'écoconception**, fixé à 55 mg/Nm³, est très récurrent pour les chaudières PFA (de 87% à 98% du temps) au même titre que les chaudières Granulés de 250 kW (89% du temps). Seules les chaudières à granulés de petites puissances présentent des teneurs de particules plus faibles que ce seuil pendant 25% (100 kW Granulés) et 16% du temps (130 kW Granulés).

La Figure 27 illustre les fréquences de dépassement du seuil de 55 mg/Nm³ fixé par l'écoconception selon les trois phases de chauffe.

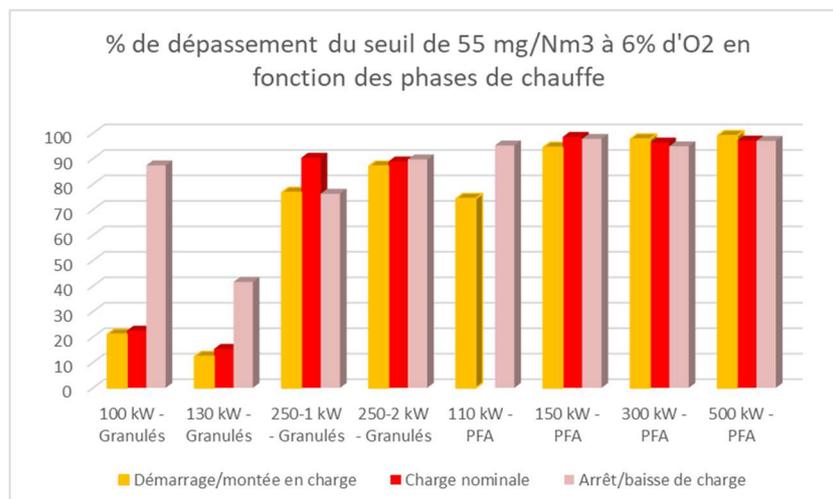


Figure 27 : Pourcentage de concentration dépassant le seuil de 55 mg/Nm³ à 6% d'O₂ selon les phases de chauffe des huit chaudières instrumentées durant la campagne de mesure.

Comme les concentrations de particules pour les chaudières à PFA sont largement supérieures à ce seuil pour toutes les phases de chauffe, la récurrence de dépassement est la même pour toutes les périodes.

Pour les chaudières de petites puissances utilisant des granulés, les teneurs les plus importantes sont mesurées lors de la phase « Arrêt/baisse de charge » durant laquelle les conditions de combustion sont les plus dégradées à cause d'un excès d'air très important engendrant des températures faibles au foyer.

L'Annexe 3 présente pour la distribution des concentrations pour les trois phases de chauffe.

La hiérarchisation des facteurs d'influence des concentrations de particules peut être établie à partir du modèle statistique.

Le modèle atteint un R² de 0.66 pour les particules. La variabilité des concentrations de particules est ainsi expliquée à hauteur de 66% par les paramètres pris en compte (puissance des chaudières, caractéristiques des combustibles utilisés (Granulés/PFA ; caractéristiques physiques : humidité ; minéraux). 34% de la variabilité des concentrations de particules mesurées lors de la combustion sont ainsi attribuables à d'autres facteurs d'influence.

La Figure 28 présente les résultats du modèle statistique. Les premiers paramètres représentent ceux exerçant les influences les plus importantes (ordre décroissant d'importance) sur les concentrations de particules. Lorsque la valeur du paramètre d'influence est faible (ou hors de la catégorie pour les variables catégorielles), il est présenté en bleu ; il est en rouge lorsque la valeur du paramètre d'influence est élevée.

Les facteurs d'influence principaux expliquant la variabilité des concentrations de particules sont par ordre d'importance :

Excès d'air : Un taux d'excès d'air trop important favorise l'augmentation des concentrations de particules. L'excès d'air, lorsqu'il correspond à un apport d'air trop important, entraîne une combustion incomplète du fait de la baisse de température du foyer, de la dilution et de la limitation du temps de résidence des gaz lors de la phase de combustion des gaz volatils, nécessaire à une combustion complète.

Le modèle statistique pointe le rôle important du paramètre excès d'air pour expliquer les concentrations de particules. De plus, la courbe de réponse du modèle (influence sur les

concentrations de particules par rapport à l'excès d'air), montre que la valeur d'excès d'air à partir de laquelle les concentrations de particules sont augmentées se situe entre 3 et 4.

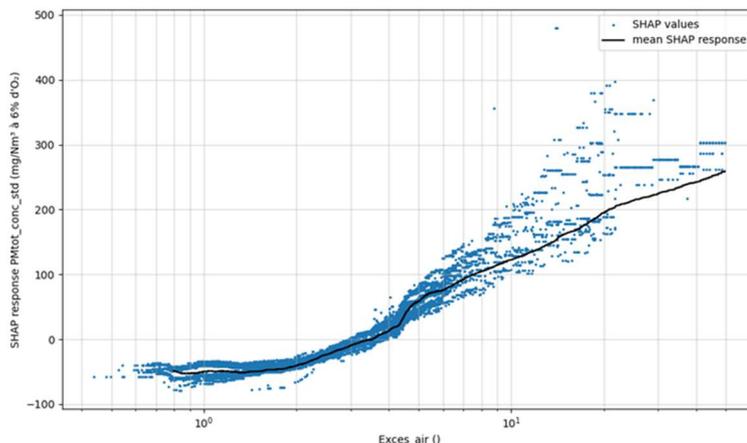


Figure 28 : Courbes de réponse du modèle : influence sur les concentrations de particules (SHAP values) en fonction de l'excès d'air (une valeur SHAP négative indique une réduction des concentrations, une valeur SHAP positive indique une augmentation des concentrations).

Quantité de minéraux contenu dans le combustible : la présence de sodium et de potassium dans le combustible favorise l'augmentation des concentrations de particules. La présence des sels de sodium et de potassium dans la composition des particules peut être importante. Les mesures complémentaires réalisées dans le cadre du projet CAPCHA montrent que la somme des sels de sodium et de potassium peut contribuer de 20% à plus de 50% de la composition des particules mesurées. Le silicium contenu dans le bois peut jouer également un rôle notamment en lien avec l'équilibre entre le sodium et potassium. Les mesures réalisées montrent un effet positif (augmentation des particules) pour une gamme de valeurs comprise entre 750 et 1850 mg/kg de matière sèche, et un effet négatif (réduction des particules) pour des valeurs en dehors de cette gamme.

Humidité du combustible : un taux d'humidité faible du combustible (estimé inférieur à 20%) permettrait de limiter les particules par rapport à un combustible plus humide. Il est à noter que tous les échantillons de granulés analysés présentent un taux d'humidité faible et inférieur à 10%.

Puissance des chaudières : Les puissances intermédiaires dans la gamme de 150 kW à 300 kW sont généralement associées à des concentrations plus fortes que celles de plus petite gamme (100 kW) et de plus grande puissance (500 kW). Il existe néanmoins une différence entre combustibles pour une même gamme de puissance (par exemple, une chaudière de puissance de « 100 kW – granulés » et « 110 kW – PFA » n'ont pas les mêmes gammes de concentrations de particules. L'influence du type de combustible rentre aussi en jeu.

La phase de chauffe : l'influence de la phase de chauffe sur les particules n'est pas clairement définie par le modèle selon les 3 modes (« démarrage/montée en charge », « phase nominale » et « arrêt/baisse de charge »).

Type de combustible : Comparé à la combustion des granulés, l'utilisation de PFA favorise l'augmentation des concentrations de particules (« 0 » pour les PFA et « 1 » pour les granulés).

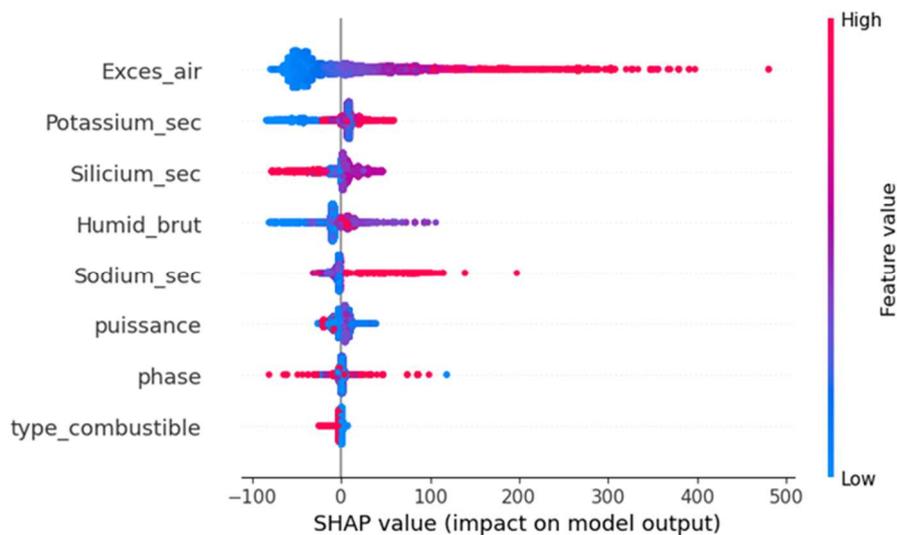


Figure 29 : Influence des facteurs pris en compte dans le modèle statistique sur les concentrations de particules en fonction de leur valeur, et hiérarchisation des facteurs entre eux.

Le poids des facteurs d'influence pris en compte pour expliquer la variabilité des concentrations de particules est très variable. L'excès d'air qui est le 1^{er} facteur d'influence, explique à lui seul 47% de la variabilité des concentrations de particules déterminée par les paramètres pris en compte. Le poids des facteurs d'influence représentant la composition des combustibles à travers leur taux de minéraux est également important avec près de 35% en cumulant les paramètres potassium, silicium et sodium. Le taux d'humidité du combustible explique environ 10% de la variabilité des teneurs de particules. A noter que le type de combustible a une influence beaucoup plus faible pour les concentrations de particules que pour les NOx, le type de combustible expliquant plus de la moitié de la variabilité des NOx contre seulement 2% pour celles des particules. Toutefois, les facteurs d'influence liées aux caractéristiques des combustibles (à travers les quantités de minéraux et l'humidité) sont relativement importants. Ces paramètres distinguent les compositions des PFA et Granulés.

5.2.3. Taille des particules : Profils granulométriques et gravimétriques

Lors de mesures ponctuelles, des mesures gravimétriques et granulométriques ont été réalisées sur l'ensemble des chaudières instrumentées. Ces mesures ont été réalisées à trois reprises pour les chaudières instrumentées sur toute la période de chauffe (au début, au milieu et en fin de la saison de chauffe) et une fois pour les chaudières instrumentées par campagne d'un mois.

Ces mesures ont été réalisées à plein régime, en situation de chauffe stabilisée.

Profil gravimétrique

Les mesures de **gravimétriques** permettent de connaître la masse des particules émise par une chaudière tout en caractérisant la contribution de ces émissions selon leur taille. Ainsi, la contribution des particules PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀ à la masse totale (fraction solide) de particules (TSP) peut être

étudiée. La gravimétrie est mesurée lors de chaque intervention à trois reprises sur une période d'environ 30 min.

Les résultats des mesures par gravimétrie pour chaque chaudière sont présentés Figure 30.

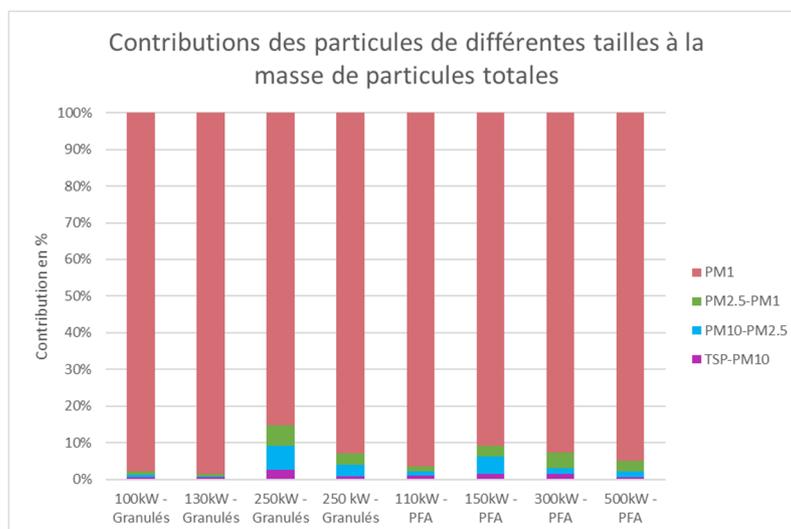


Figure 30 : Répartition par taille des particules à l'émission à la cheminée des chaudières.

Les mesures montrent que la contribution des PM₁ dans la masse totale des particules émises est très largement majoritaire. Cette contribution est comprise entre de 85% à 99% selon les chaudières.

Les différences de contributions des PM₁ à la masse totale de particules ne sont pas, au regard des mesures réalisées sur les 8 chaudières instrumentées, liées à l'utilisation du type de combustible, la part moyenne des PM₁ dans la masse totale est identique avec 94%. Les puissances des chaudières ne permettent pas de distinguer les différences de contributions des PM₁. Les chaudières de petites puissances peuvent aussi bien présenter de fortes contributions des PM₁ comme de plus faibles (de 91% à 99%). De plus, les deux chaudières de même puissance « 250 kW – Granulés » et implantées dans une même chaufferie présentent des profils de taille assez différents avec une contribution des PM₁ à hauteur de 85% pour l'une et de 93% pour l'autre.

Il est à noter que sur la chaudière « 150 kW – PFA » instrumentée 6 mois, trois interventions ponctuelles ont été réalisées. La moyenne des trois interventions présente un même constat d'environ 94% de PM₁ dans les TSP (plus ou moins 1% selon l'intervention).

Les chaudières dont les contributions des PM₁ à la masse de particules sont les plus faibles (« 150 kW – PFA ») et « 250 kW – 1 – Granulés »), observent de fait des contributions à la masse plus importantes pour les particules plus grosses. La fraction « coarse » des particules, correspondant aux particules entre les fractions PM₁₀ et PM_{2,5}, est la plus représentée pour ces chaudières (entre 5 et 7 % de la masse de particules), alors que la masse de particules des autres chaudières n'est que peu influencée par ces particules plus grosses. **Les particules PM₁₀ reflètent la quasi-totalité (99%) de la masse des particules (TSP).**

Il est difficile de conclure à une différence de gravimétrie selon les chaudières à la fois entre leur puissance et le combustible utilisé.

Profil granulométrique

Les mesures de granulométrie menées sur la masse des poussières totale TSP permettent de classer les particules en nombre selon 12 classes à partir de mesures au pas de temps seconde. Ces mesures sont menées sur une période comprise entre 1h30 et 2h lors de chaque intervention. Les résultats des classes les plus fines (inférieures à 17 nanomètres) correspondent à une estimation via un algorithme défini par l'appareil et non à de la mesure ; il est toutefois à noter que l'estimation du nombre de particules pour ces classes les plus fines ne remet pas en cause les conclusions des mesures illustrant les modes majeurs des différentes chaufferies.

La grande majorité des particules émises par les chaudières sont inférieures ou égales à 100 nm (PM_{0.1}) avec environ 90% des particules (entre 86 et 92% selon les chaudières) ; seule la chaudière « 130 kW-Granulés » présente une part plus faible (72%).

De plus, la part des particules les plus fines (inférieures à 28 nm) peut être importante et atteindre jusqu'à 25% comme cela est illustré Figure 31.

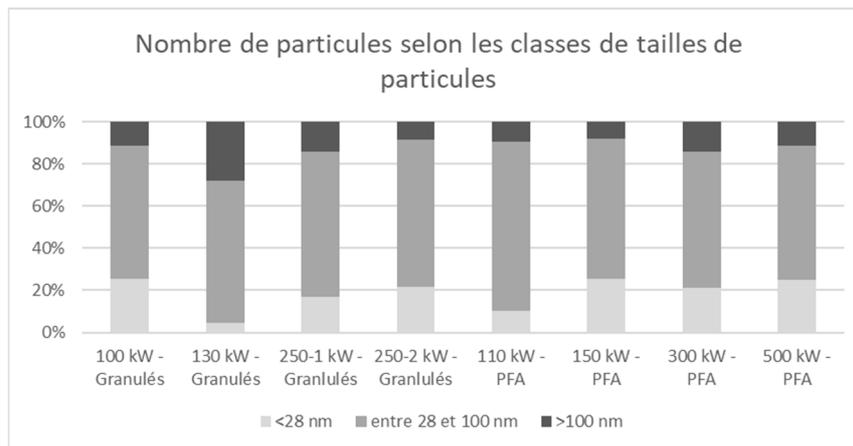


Figure 31 : Nombre de particules au sein des Particules Ultrafines (PUF) selon des classes de tailles de particules.

Les résultats des profils granulométriques obtenus sont présentés Figure 32. Les classes sont représentées par leur borne supérieure, c'est-à-dire que la classe 17 représente les particules de moins de 17 nm et la classe 28 celles de tailles comprises entre 17 et 28 nm, ...

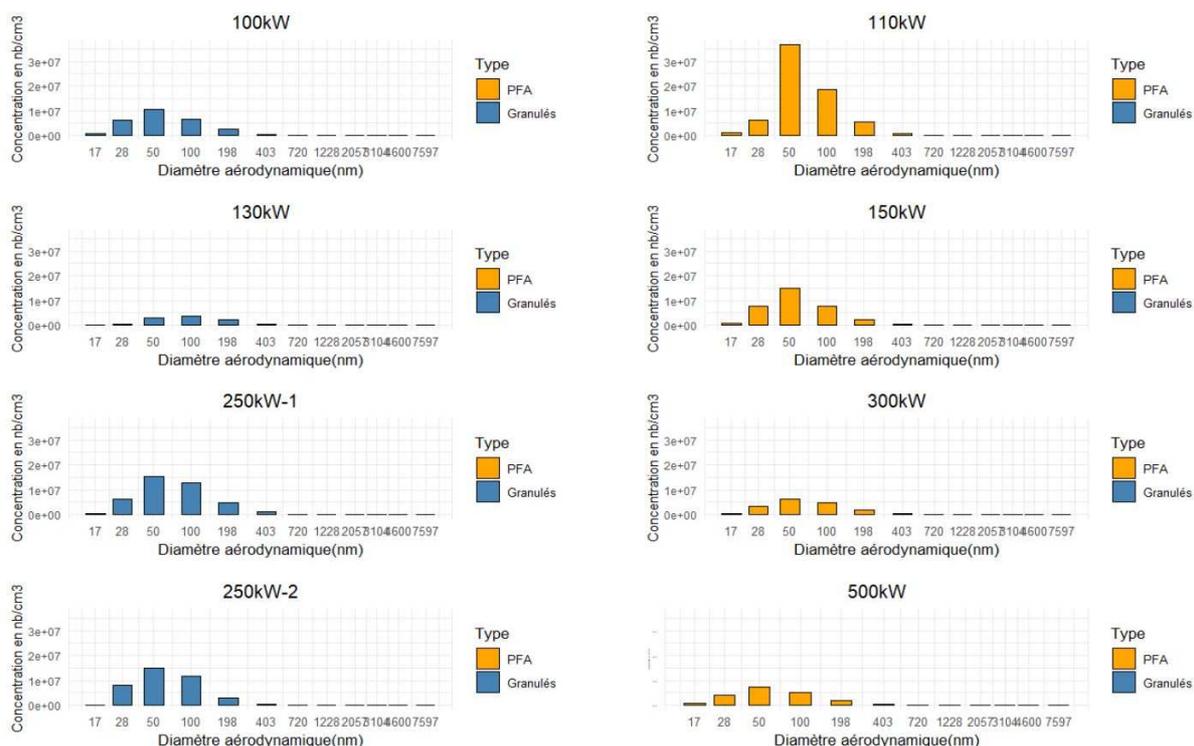


Figure 32 : Profil granulométrique des particules à l'émission à la cheminée des chaudières.

La classe de particules la plus représentée en nombre sur un profil granulométrique est appelée « mode majeur ». Les résultats de ces mesures montrent que le **mode majeur concerne les particules de tailles comprises entre 28 et 50 nm (classe 50) pour toutes les chaudières hormis celle de 130 kW-Granulés pour laquelle le mode majeur est une classe au-dessus, soit des tailles comprises entre 50 à 100 nm**. Cette chaudière de « 130 kW – Granulés », dont le mode majeur correspond à des tailles plus importantes présente le nombre de particules le plus faible sur la gamme 18 nm à 100 nm et comme vu précédemment le plus fort pourcentage de PM_{10} dans les concentrations.

Ces modes majeurs représentent pour les **trois chaudières à granulés présentant un mode majeur à 50 nm de 38 à 39% des particules émises**. Pour la chaudière présentant le mode majeur compris entre 50 et 100 nm, la contribution de cette classe est du même ordre avec 36%.

Pour les chaudières utilisant les PFA, le mode majeur représente une contribution plus variable comprise entre 36 et 53% du fait des deux chaudières de plus petite puissance pour lesquelles la contribution est de 44% (« 150 kW - PFA ») et 53% (« 110 kW – PFA »).

Il est à noter que sur la chaufferie « 150 kW – PFA » instrumentée durant toute la saison de chauffe, trois interventions ponctuelles ont été réalisées. Les résultats de ces mesures montrent **un même mode majeur lors de ces trois périodes avec une majorité de particules de tailles comprises entre 28 et 50 nm**. Néanmoins, il est à noter que le nombre de particules est très différent d'une intervention à l'autre.

Ces résultats montrent des tailles à l'émission inférieures à celles des résultats de mesure de particules ultrafines dans l'air ambiant, dont le mode correspondant à la source « combustion de biomasse » présente des tailles comprises entre 70 et 100 nm. Ces résultats illustrent le rôle/l'influence des phénomènes de coagulation, de condensation et d'accumulation dans l'augmentation de la taille des particules après leur émission.

5.2.4. Concentrations en monoxyde de carbone (CO)

La Figure 33 présente, à l'aide de boîtes à moustaches, la distribution de l'ensemble des concentrations de monoxyde de carbone (CO) émises par minute, toutes phases confondues et pour chaque chaudière instrumentée. Ces concentrations sont comparées à la valeur limite de 375 mg/Nm³ à 6% d'O₂, imposée par le Plan de Protection de l'Atmosphère 2025 dans son article 17, comme précisé dans le Tableau 2. Les chaudières fonctionnant aux granulés sont représentées par des boîtes bleues, tandis que celles utilisant du PFA sont représentées par des boîtes orange. La valeur limite issue du PPA est indiquée par une ligne rouge. Les résultats ne sont pas évalués au regard des attendus du règlement écoconception, la réglementation applicable en Ile-de-France étant plus sévère.

En période de chauffe et sans distinction de phase (montée en charge, nominale et baisse de charge), toutes les chaudières dépassent la valeur de référence de 375 mg/Nm³ (à 6% d'O₂). Ces dépassements sont plus fréquents pour les chaudières à PFA, variant entre 41% et 99,99%. La chaudière de « 150 kW – PFA » présente des dépassements quasi systématiques (99,99%). Pour les chaudières à granulés, ces dépassements surviennent entre 3% et 98% du temps. En moyenne, les concentrations en monoxyde de carbone sont plus élevées pour les chaudières à PFA que celles à granulés. Tout comme ce qui a été observé pour les NO_x, les chaudières à PFA de plus petites puissances (150 kW et 110 kW) présentent les concentrations moyennes les plus élevées. La distribution des données est la plus importante au niveau de la chaudière de 110 kW en PFA, qui, sur la période de mesure, ne présente pas de phase nominale, mais suit un cycle de montée en charge, suivi d'une phase de descente, favorable aux émissions de CO.

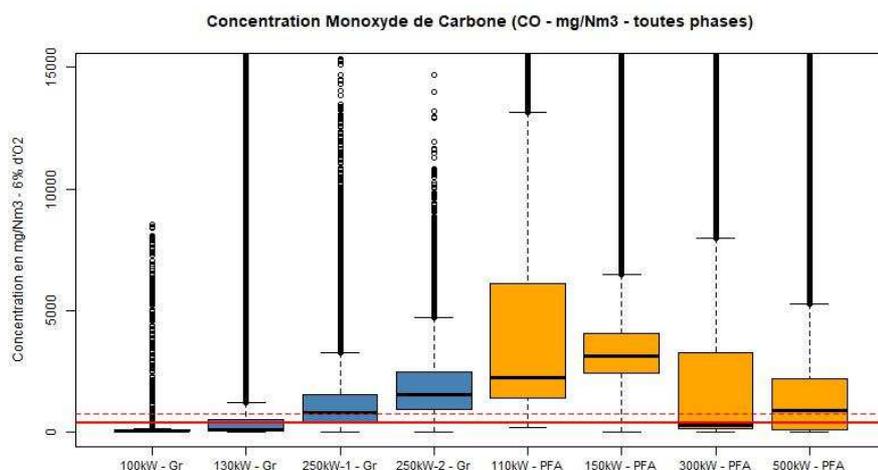


Figure 33 : Distribution des concentrations de monoxyde de carbone au niveau des huit chaudières mises au regard de la valeur prise comme référence (chaudière à granulés en bleu ; chaudière à PFA en orange).

La Figure 34 illustre, à l'aide d'histogrammes, le pourcentage de dépassements pour chaque chaudière durant les différentes phases : montée en charge (en jaune), charge nominale (en rouge) et baisse de charge (en rose). Pour toutes les chaudières, les phases de baisse de charge montrent un taux de dépassement de la valeur de référence plus élevé. La chaudière de 250-2 kW à granulés présente des dépassements lors des trois phases, avec un taux d'au moins 97%, tandis que la chaudière de 150 kW en PFA dépasse ce seuil 100% du temps. La chaudière de 110 kW (PFA), qui ne montre pas de phase de stabilité de chauffe, présente des dépassements à 99% du temps lors des phases de montée et de baisse de charge. Comme expliqué dans le paragraphe « Qualité de combustion », le monoxyde de carbone se forme lorsque la combustion est incomplète, soit dans des conditions de température plus faibles ne favorisant pas l'oxydation du CO, ce qui est typique lors des phases de baisse de charge.

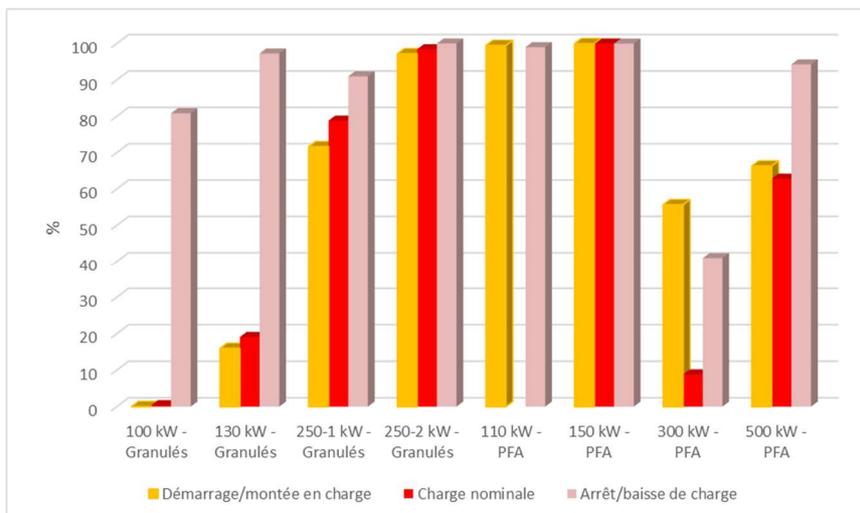


Figure 34 : Histogramme présentant le pourcentage de dépassement pour chaque chaudière selon les phases du cycle de chauffe : montée en charge (en rouge), charge nominale (en jaune) et baisse de charge (en rose).

Les distributions des concentrations en CO au niveau de chaque chaudière à l'aide de boîte à moustache selon chaque phase sont présentées en Annexe 4.

La **hiérarchisation des facteurs d'influence des concentrations de monoxyde de carbone** peut être établie à partir du modèle statistique.

Le modèle atteint un R^2 de 0.71 pour les concentrations de monoxyde de carbone. La variabilité des concentrations de CO est ainsi expliquée à hauteur de 71% par les paramètres pris en compte (puissance des chaudières, phases de chauffe, combustibles utilisés (Granulés/PFA) et excès d'air). 29% de la variabilité des concentrations de monoxyde de carbone mesurées lors de la combustion sont ainsi attribuables à d'autres facteurs d'influence.

La Figure 35Figure 38 présente les résultats du modèle statistique. Les premiers paramètres représentent ceux exerçant les influences les plus importantes (ordre décroissant d'importance) sur les concentrations de particules et les couleurs sont en bleu lorsque la valeur du paramètre d'influence est faible et en rouge lorsque la valeur du paramètre d'influence est élevée.

Les facteurs d'influence principaux expliquant la variabilité des concentrations de monoxyde de carbone sont par ordre d'importance :

Excès d'air : Comme pour les concentrations de particules totales, il existe un lien important entre les valeurs de concentrations de CO et ce paramètre. La courbe de réponse montre que la valeur seuil à partir de laquelle un excès d'air trop important fait augmenter les concentrations de CO est estimée à 4. A partir de ce seuil, plus l'excès d'air est important, plus les concentrations de CO augmentent.

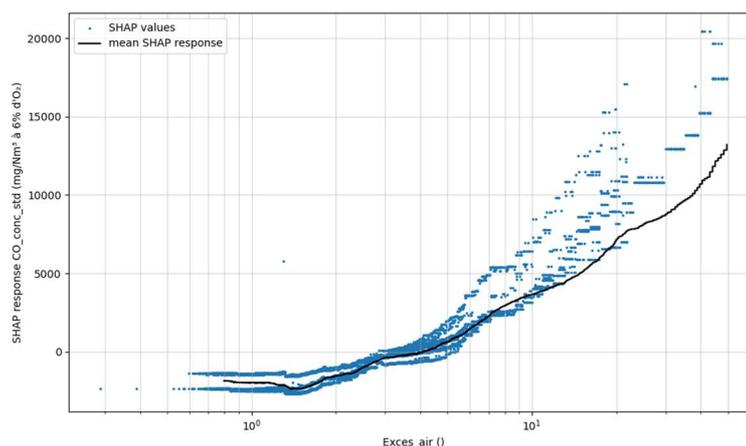


Figure 35 : Courbes de réponse du modèle : influence sur les concentrations de monoxyde de carbone (SHAP values) en fonction de l'excès d'air (une valeur SHAP négative indique une réduction des concentrations, une valeur SHAP positive indique une augmentation des concentrations).

Phase : le cycle de chauffe est également un paramètre ressortant comme étant un paramètre d'influence sur les concentrations de monoxyde de carbone. La courbe de réponse du modèle en fonction de la phase (0 : phase « stable », 1 : « d'arrêt/baisse de charge », 2 : « démarrage/montée en charge ») montre que la phase stable est associée à un impact globalement neutre, ou qui permettrait de diminuer les concentrations de CO ; la phase de « d'arrêt/baisse de charge » est plutôt associée à un impact d'augmentation des concentrations de CO ; tandis que la phase de « démarrage/montée en charge » n'est pas associée strictement à une augmentation des concentrations ou une réduction des concentrations). En effet, le modèle ne permet pas d'expliquer pourquoi la phase « démarrage/montée en charge » a une influence différente entre les chaudières utilisant des PFA.

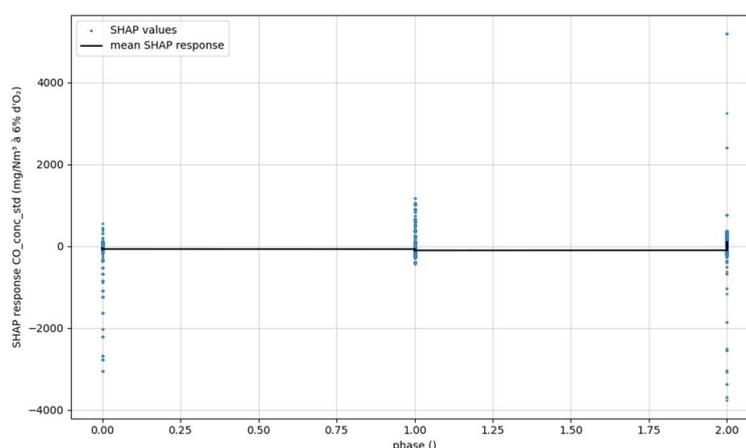


Figure 36 : Courbe de réponse du modèle : influence sur les concentrations de monoxyde de carbone (SHAP values) en fonction de la phase (0 : phase « stable », 1 : « d'arrêt/baisse de charge », 2 : « démarrage/montée en charge ») (une valeur SHAP négative indique une réduction des concentrations, une valeur SHAP positive indique une augmentation des concentrations).

Type de combustible : la courbe de réponse du modèle met en lumière l'influence sur les concentrations de monoxyde de carbone en fonction du type de combustible (« 0 » pour les PFA et « 1 » pour les granulés). L'utilisation de PFA a un impact sur l'augmentation des concentrations de CO, alors que l'utilisation de granulés est globalement affectée à un effet inverse de réduction des concentrations.

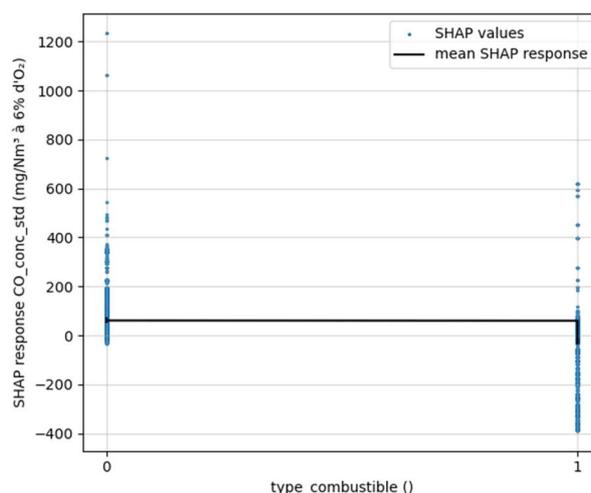


Figure 37 : Courbe de réponse du modèle : influence sur les concentrations de monoxyde de carbone (SHAP values) en fonction du type de combustible (« 0 » : PFA, « 1 » : granulés) (une valeur SHAP négative indique une réduction des concentrations, une valeur SHAP positive indique une augmentation des concentrations)

Puissance : concernant la puissance des chaudières, le modèle affecte une influence sur la réduction des concentrations de CO (influence négative pour les calculs) pour les chaudières de petite puissance. Néanmoins, il convient de rappeler que la méthode de hiérarchisation des facteurs d'influence vise à affecter une influence positive ou négative à chacun d'entre eux afin que la somme de ces influences permette d'obtenir la concentration en monoxyde de carbone mesurée à chaque instant et pour chacune des chaudières. Cette influence, dite « calculatoire », convient d'être validée par l'expertise métier, comme cela a été réalisé pour l'ensemble des facteurs d'influence décrits précédemment. En prenant en compte les analyses montrées précédemment concernant les concentrations de monoxyde de carbone des chaudières instrumentées dans l'étude, le résultat du modèle statistique sur l'influence de la puissance n'est pas interprétable physiquement et ne permet donc pas de conclure sur l'influence de la puissance des chaudières sur les concentrations de monoxyde de carbone.

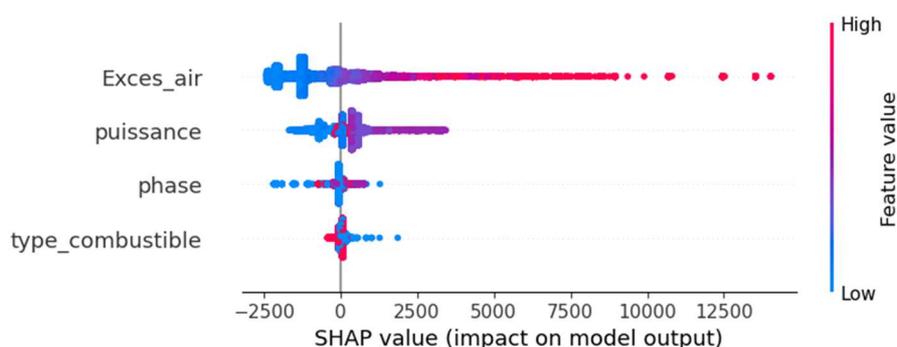
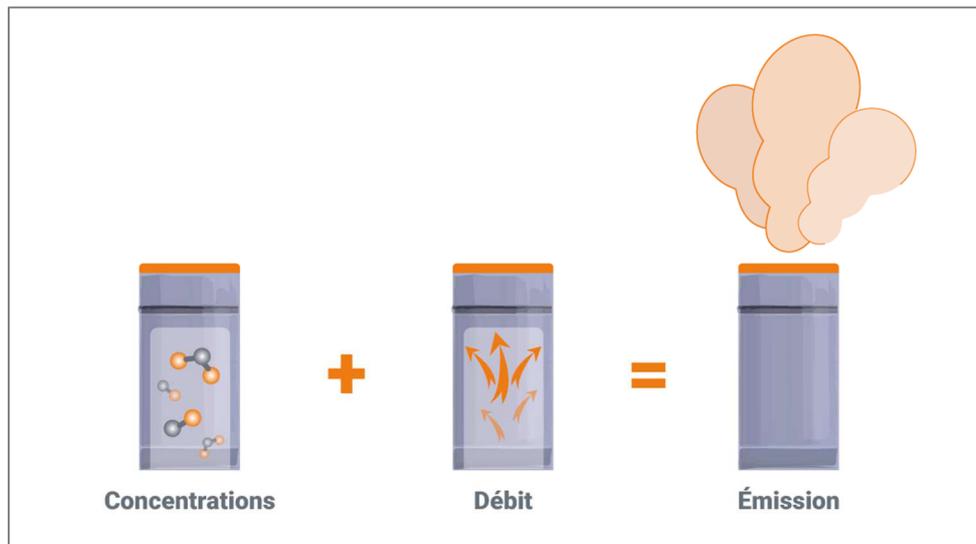


Figure 38 : Influence des facteurs pris en compte dans le modèle statistique sur les concentrations de monoxyde de carbone en fonction de leur valeur, et hiérarchisation des facteurs entre eux

Le poids des facteurs d'influence pris en compte pour expliquer la variabilité des concentrations de monoxyde de carbone est très variable. L'excès d'air qui est le 1^{er} facteur d'influence, explique près de 70% de la variabilité des concentrations de CO déterminée par les paramètres pris en compte. L'optimisation de ce paramètre est très importante afin de limiter les émissions de CO, dont les teneurs les plus élevées sont mesurées lors de combustions incomplètes.

5.3. Emissions rejetées par les chaudières

Les résultats présentés dans la partie « 5.2 Concentrations en sortie de cheminée », sont des concentrations instantanées par m³ d'air rejeté, mesurées au sein des cheminées des différentes chaudières instrumentées. Les concentrations ne permettent pas, à elles seules, de discriminer les chaudières selon les quantités de polluants émis dans l'atmosphère. En effet, la pollution issue des chaudières dépend, au-delà des concentrations de polluants mesurés dans les rejets des chaudières, du débit des fumées. En couplant les observations faites par chaudières sur les concentrations et les débits des rejets des cheminées, la quantité d'émissions de polluant peut être calculée (cf. Figure 39).



Concentration dans la cheminée X débit = Emissions de polluants rejetés dans l'atmosphère

Figure 39 : Illustration des concentrations couplées au débit permettant d'obtenir la quantité de polluant émis dans l'atmosphère.

Ainsi, un débit élevé associé à des concentrations mesurées également importantes engendrent une quantité d'émission de polluant plus importante qu'une situation inverse où les concentrations et le débit peuvent être faibles. C'est par exemple le cas des oxydes d'azote sur les chaudières « 250 kW – Granulés » pour lesquelles lors de la phase « d'arrêt/baisse de charge » les concentrations et le débit sont les plus faibles (cf. Figure 40), entraînant ainsi les quantités rejetées de NO_x dans l'atmosphère durant cette phase de chauffe les plus faibles.

La variabilité des débits d'air, présentée ci-dessous, permet d'étudier le lien entre la puissance et le débit des chaudières.

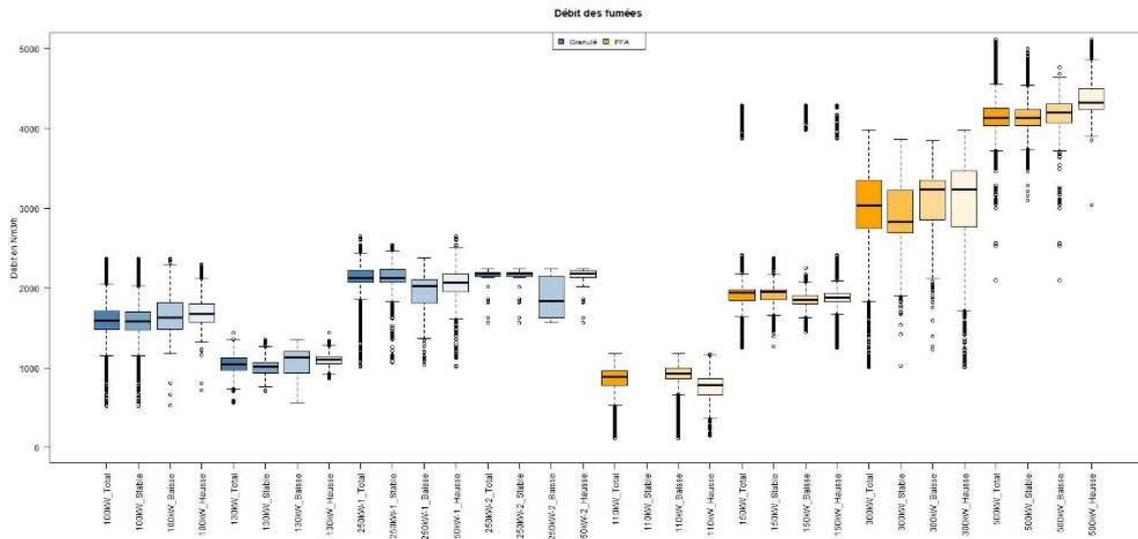


Figure 40 : Débit d'air mesuré sur les chaudières durant l'ensemble de la période instrumentée (« Tout » et en fonction des phases de chauffe : « démarrage/montée en charge » (hausse), « charge nominale » (stable) et « arrêt/baisse de charge » (baisse).

La puissance des chaudières correspond à la puissance théorique maximale. Les puissances instantanées réelles ne sont pas disponibles dans le cadre des mesures réalisées.

Les chaudières dont les puissances sont les plus élevées ont généralement un débit de fumée plus élevé en lien avec une plus grande quantité de bois brûlé générant ainsi un volume plus important de gaz, une plus grande quantité d'air nécessaire pour la combustion et potentiellement une température de combustion plus élevée.

Pour les chaudières utilisant des PFA une corrélation entre puissances et débits d'air est observée avec un débit d'air moyen environ 4 fois plus important pour la chaudière la plus puissante de 500 kW par rapport à la plus faible de 110 kW. Pour les chaudières à granulés, les différences de débits sont moins marquées. De plus, le lien entre puissances et débits d'air n'est pas vrai pour les chaudières de 100 kW et de 130 kW puisque la chaudière dont le débit moyen est le plus faible n'est pas la chaudière la moins puissante.

A partir des débits et des concentrations, les émissions moyennes sont calculées et exprimées en grammes/heure (g/h).

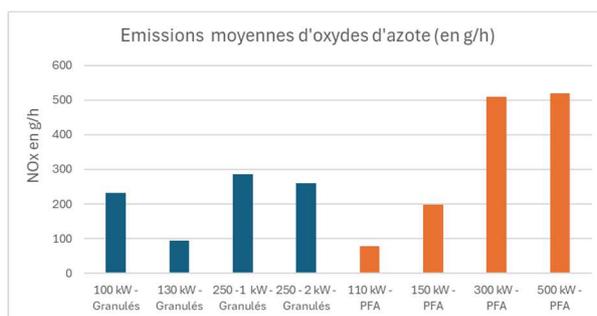
La Figure 41 présente pour les chaudières instrumentées les quantités moyennes d'émissions (en g/h) de NO_x, particules totales et monoxyde de carbone rejetées dans l'atmosphère.

De manière générale, les chaudières les plus puissantes émettent une quantité de polluant dans l'air plus importante. Toutefois, le lien entre la quantité d'émission et la puissance des chaudières peut être variable.

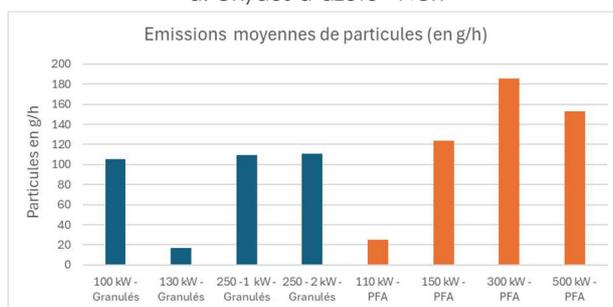
Pour **les oxydes d'azote** (a), la chaudière « 100 kW - Granulés » présente une hiérarchie différente avec des émissions moyennes proches des celles des chaudières « 250 kW – Granulés ». Il en est de même pour la chaudière « 300 kW – PFA » émettant en moyenne sur 1 heure autant de NO_x que la chaudière de puissance plus importante de « 500 kW – PFA ». Il est à noter que, pour ces deux chaudières, leurs émissions présentent une forte variabilité. Alors que la variabilité de la chaudière « 300 kW – PFA » est due au débit d'air, lui-même très variable, celle de la chaudière « 500 kW – PFA » est due à la variabilité des concentrations.

Pour **les particules totales**, la corrélation entre la puissance et la quantité d'émission n'est pas vraie avec des rejets les plus importants pour la chaudière « 300 kW – PFA ». Malgré un débit d'air plus faible sur cette chaudière par rapport à la chaudières « 500 kW – PFA », les émissions de particules sont plus élevées.

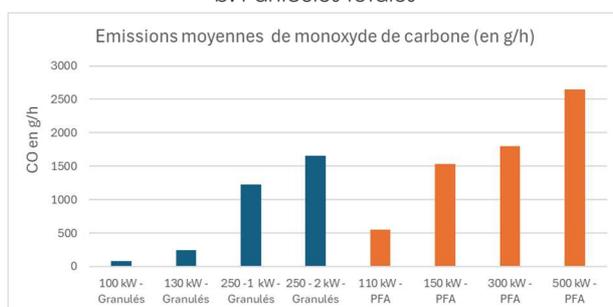
De la même manière, cette hiérarchie n'est pas respectée pour les chaudières de plus petites puissances. En effet, les quantités émises par les chaudières « 100 kW – Granulés » et « 150 kW – PFA » sont équivalentes aux chaudières de plus grandes puissances « 250 kW – Granulés ».



a. Oxydes d'azote - NOx



b. Particules totales



c. Monoxyde de carbone - CO

Figure 41 : Emissions moyennes d'oxydes d'azote (a), de particules totales (b) et de monoxyde de carbone (c) en g/h émis en par les chaudières instrumentées (en bleu les chaudières Granulés et orange les chaudières PFA).

Enfin, pour les **émissions moyenne de monoxyde de carbone**, les quantités moyennes émises de ce polluant sont en lien avec les puissances des chaudières. Toutefois, les variabilités des émissions peuvent être très importantes et non directement liées à la puissance des chaufferies mais plutôt à la qualité de la combustion, notamment rencontrée lors des phases « d'arrêt/baisse de charge ».

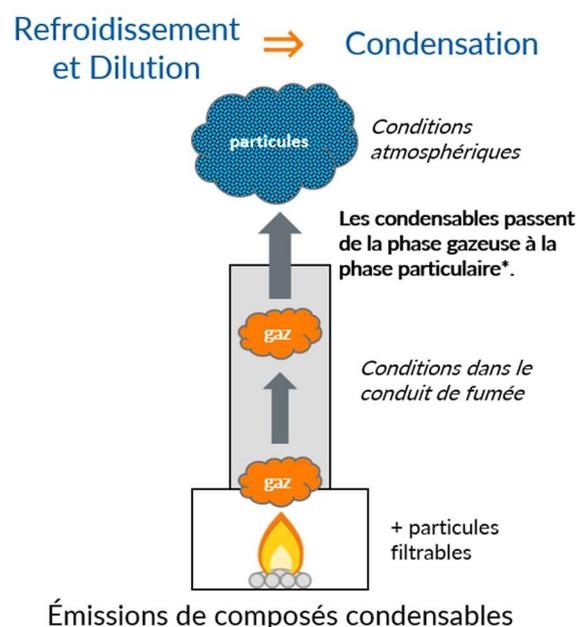
Si les quantités d'émissions sont le reflet des rejets dans l'air des différentes chaudières, cela ne reflète toutefois pas le lien émissions / quantité d'énergie produite par les chaudières. Ainsi, afin de hiérarchiser les chaudières au regard de leurs émissions et de leurs productions d'énergie, les

facteurs d'émissions (en quantité de polluant /par quantité d'énergie produite) sont déterminés dans le paragraphe 5.5.

5.4. Emissions de particules condensables

Lors de la combustion de biomasse, des particules et des gaz sont rejetés dans l'atmosphère. De plus, certains composés présents sous forme gazeuse dans le conduit de fumées se condensent lors de leur entrée dans l'atmosphère, engendrant des particules supplémentaires. Cette transformation est liée à la dilution et au refroidissement des fumées.

La Figure 42 illustre le principe de formation des particules condensables à partir d'émissions de composés condensables (sous la forme de gaz) liées à la combustion et la transformation en particules solides une fois dans l'atmosphère.



*En revanche, certains composés plus volatiles s'évaporent du fait de la diminution de leur pression partielle par dilution.

Figure 42 : Illustration du principe de formation des particules condensables dans l'atmosphère.

Les mesures à la fois des particules solides et des particules condensables ont permis de quantifier la contribution des particules condensables. **Cette part de condensables est comprise entre 10% à 16%**, ce qui est relativement faible par rapport à celle à l'émission du chauffage individuel au bois. En effet, que cela soit **pour les anciens appareils ou les plus récents et performants, la part des condensables est importante et comprise entre 41% pour les appareils respectant la directive écoconception et 75% pour les appareils anciens à bûches** (voir Tableau 3). Les proportions de condensables les plus importantes s'observent pour les appareils les plus anciens et les pratiques de chauffage au bois en foyers ouverts ; Les conditions de combustion sont les plus dégradées entraînant des émissions de composés condensables plus importants.

Proportion des condensables parmi les particules totales émises	Appareil ancien	Appareil récent	Appareil performant	Appareil avancé	Appareil sans distinction de période d'installation
Chaudières à bûches	66%	63%	46%	ND*	
Poêles, inserts et cuisinières à bûches	75%	66%	50%	41%	
Foyers ouverts à bûches					73%
Poêles et chaudières à granulés					48%

*Non disponible

ancien = appareils installés jusqu'en 2010

récent = appareils installés à partir de 2005 jusqu'en 2021

performant = appareils installés à partir de 2015 au moins jusqu'en 2021

À partir de 2022, des appareils dit "avancés" respectant la directive européenne écoconception (ecodesign) sont installés

Tableau 3 : Proportion des condensables dans les particules totales selon les modes de chauffage au bois individuel (d'après calculs à partir d'OMINEA & SECTEN 2024).

Concernant les chaudières biomasse de plus grandes puissances (> 1 MW), il apparaît à travers les mesures réalisées sur une chaudière de 1.65 MW dans le cadre du projet ACIBIOQA qu'à la fois les quantités de particules solides et condensables sont très faibles (proches voire inférieures aux limites de quantifications des appareils de mesure). De ce fait, la définition de la part des condensables de particule est difficile. Il est à noter que cette chaudière est équipée d'un filtre à manche et à un système dit « cyclone ».

Les chaudières domestiques gaz et fioul de présentent pas de fraction condensable (étude AFACOMB - INERIS, 2023) dans leurs émissions.

A l'aide des mesures réalisées sur les petites chaudières, l'évolution de la part des condensables dans les poussières totales a pu être étudiée notamment en fonction de la qualité de la combustion. Les teneurs de CO les plus élevées sont constatées lorsque les conditions de combustions sont les plus mauvaises (combustion incomplète). Ce polluant est ainsi un bon indicateur de la qualité de la combustion. Dans de telles conditions, les teneurs de particules totales (solides + condensables) sont également les plus élevées. La Figure 43 illustre cette corrélation, linéaire, de l'évolution des concentrations de ces deux polluants.

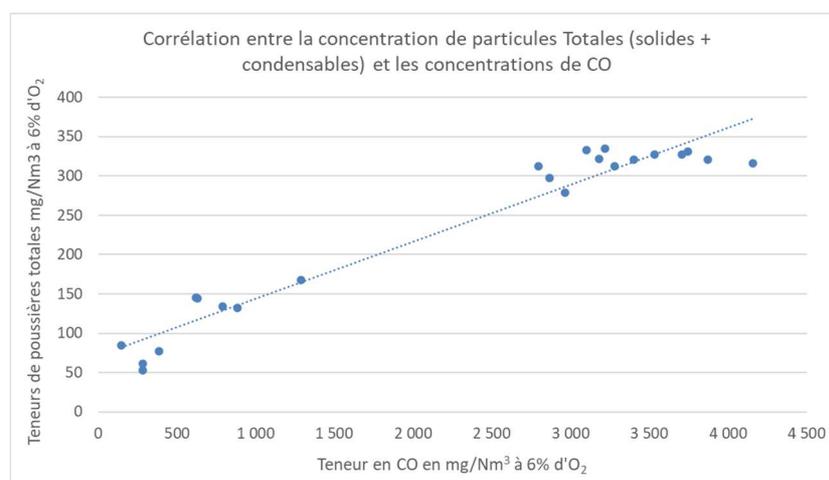


Figure 43 : Corrélation entre les concentrations de monoxyde de carbone et les concentrations de particules totales (solides + condensables) en mg/Nm³ à 6% d'O₂.

Les mesures font également apparaître une augmentation de la part des condensables lors des conditions de combustion les moins bonnes. Lorsque les teneurs de CO sont supérieures à 3 000 mg/Nm³, les teneurs de particules totales sont importantes (supérieures à 250 mg/Nm³) et la part des condensables plus importante avec environ 15% en moyenne. A l'inverse, lorsque les conditions de combustion sont meilleures, accompagnées de teneurs en CO et d'un excès d'air plus faible, la concentration de particules totales diminue ainsi que la part des condensables, pour atteindre environ 10% en moyenne.

Les chaudières présentant ainsi les teneurs de CO les plus élevées peuvent s'avérer être les chaudières dont la part de condensables est la plus importante. Les chaudières de petites puissances utilisant les PFA (« 110 kW – PFA » et « 150 kW – PFA »), dont les teneurs de CO sont les plus élevées peuvent ainsi émettre dans l'atmosphère une part de condensable plus élevée.

Afin de quantifier l'ensemble des émissions de particules générées par les chaudières, il est nécessaire d'ajouter aux émissions mesurées au sein de la cheminée (particules solides) entre 11% à 20% afin d'obtenir les émissions de particules incluant les condensables. Cela reflète ainsi les quantités de particules réellement émises par les chaudières biomasse instrumentées.

5.5. Facteurs d'émission

Pour comparer les émissions de chaudières au regard de la quantité d'énergie produite, la quantité de polluant émise rapportée à l'énergie consommée, soit le facteur d'émission (FE), exprimée en g/GJ est déterminée (gramme : quantité de polluant émise ; Gigajoule : quantité d'énergie libérée par la combustion de combustible).

Une des principales difficultés pour évaluer les facteurs d'émission de polluants lors de cette étude était le manque d'information concernant la consommation de bois des chaufferies pendant les mesures. En effet, ce paramètre primordial pour le calcul des FE n'a pas été mesuré. Cette consommation peut être approchée par plusieurs méthodes d'estimation. La méthode la plus précise, qui s'appuie sur les émissions de CO₂, a été utilisée. Elle est présentée dans la partie 5.5.1.

Les facteurs d'émission estimés sont comparés aux facteurs d'émission nationaux OMINEA 2023¹⁵, utilisés dans les inventaires d'émission nationaux et régionaux.

5.5.1. Détermination des facteurs d'émission

L'énergie produite, nécessaire au calcul des facteurs d'émission, est évaluée à partir de la quantité de biomasse brûlée et son pouvoir calorifique. La qualité de biomasse est estimée à partir du carbone contenu dans la biomasse brûlée, estimée à partir des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), comme précisé ci-après.

¹⁵ Source : Citepa, 2023. Base de données OMINEA – 20ème édition.

Détermination de la masse de dioxyde de carbone (CO₂)

Les émissions de CO₂ sont directement liées à la quantité de carbone présente dans la biomasse brûlée. En effet, le CO₂ présent dans les fumées est issu, pour sa très grande majorité, de la combustion de biomasse. Il est donc possible, à partir des émissions de CO₂, et de la composition de la biomasse (teneur en carbone mesurée pour chaque chaufferie), d'évaluer la consommation de biomasse.

Les concentrations de CO₂ émises et le débit des fumées mesurés en continu pour toutes les chaudières permettent de calculer la masse de CO₂ rejetée dans l'atmosphère pendant la combustion.

Détermination de la quantité de biomasse brûlée

La masse de CO₂ émise permet le calcul de la masse de carbone (C) émise qui correspond à 12/44 de la masse de CO₂ (masse molaire C : 12g/mol ; masse molaire O : 16g/mol ; masse molaire CO₂ : 44g/mol).

La masse de biomasse consommée est ensuite calculée à partir de la masse de carbone contenue dans les combustibles. Chaque lot de biomasse (granulés et PFA) utilisé par les chaudières lors des mesures a été analysé spécifiquement pour disposer notamment de la masse de carbone qu'il contient. A l'aide de ces résultats, la part de carbone brut dans la biomasse est ainsi connue, (notée « part de carbone dans la biomasse », en %).

La formule suivante résume le calcul de la masse de biomasse consommée :

$$\text{Masse de biomasse consommée} = (\text{Masse}_{\text{CO}_2} * 12/44) / (\text{part de carbone dans la biomasse})$$

La connaissance de la masse de CO₂ émise permet ainsi de disposer de la quantité de biomasse brûlée (sur la même période que celle pendant laquelle ont été mesurées les émissions de CO₂ et le débit).

Limites à l'estimation de la consommation de biomasse brûlée

La méthode d'estimation de la biomasse brûlée s'appuyant uniquement sur les émissions de CO₂ pour en déduire les émissions de carbone, la part du carbone émise sous la forme de Composés organiques volatils (COV) et de monoxyde de carbone (CO) n'est pas prise en compte. Cette part est toutefois négligeable.

Les données de livraison de biomasse fournies par les exploitants n'ont pas pu être exploitées pour la définition des facteurs d'émission. En effet, celle-ci ont été fournies pour de larges périodes qui ne permettent pas les associer à l'échelle temporelle fine des mesures. De plus, il est difficile de mettre en adéquation les livraisons de biomasse avec la période durant laquelle elle est réellement brûlée.

Calcul des facteurs d'émission

Les **facteurs d'émission pour chaque polluant sont déterminés à partir des émissions mesurées (à partir des concentrations et du débit), des consommations de biomasse et du pouvoir calorifique spécifique de la biomasse consommée** (déterminé par analyse des combustibles – Cf. chapitre Analyse des combustibles). Le pouvoir calorifique de la biomasse exprime la quantité de chaleur dégagée par unité de biomasse lorsque celle-ci est consommée. Il s'exprime en J/g.

Le calcul des facteurs d'émission est résumé ci-dessous :

$$\text{Facteur d'émission (g/J)} = \frac{\text{Emission (g)}}{\text{Masse de biomasse(g)} * \text{PCI (J/g)}}$$

5.5.2. Facteurs d'émission de NOx

Les facteurs d'émission présentés permettent de compléter les informations fournies par les émissions moyennes d'oxydes d'azote (Cf. chapitre Emissions rejetées par les chaudières) qui montrent pour les PFA des émissions plus fortes pour les chaudières les plus puissantes. En effet, les facteurs d'émissions permettent de rapporter ces émissions à la quantité d'énergie produite par la chaudière. Un facteur d'émission plus faible montre un meilleur rapport entre la quantité de biomasse consommée et l'énergie produite.

Les facteurs d'émission de NOx estimés pour chacune des 8 chaudières instrumentées sont présentés Figure 44. L'intervalle entre le 1^{er} et 3^{ème} quartile des facteurs d'émission y est représenté pour illustrer la variabilité des facteurs d'émission, sans l'influence des valeurs les plus extrêmes (faibles comme élevées).

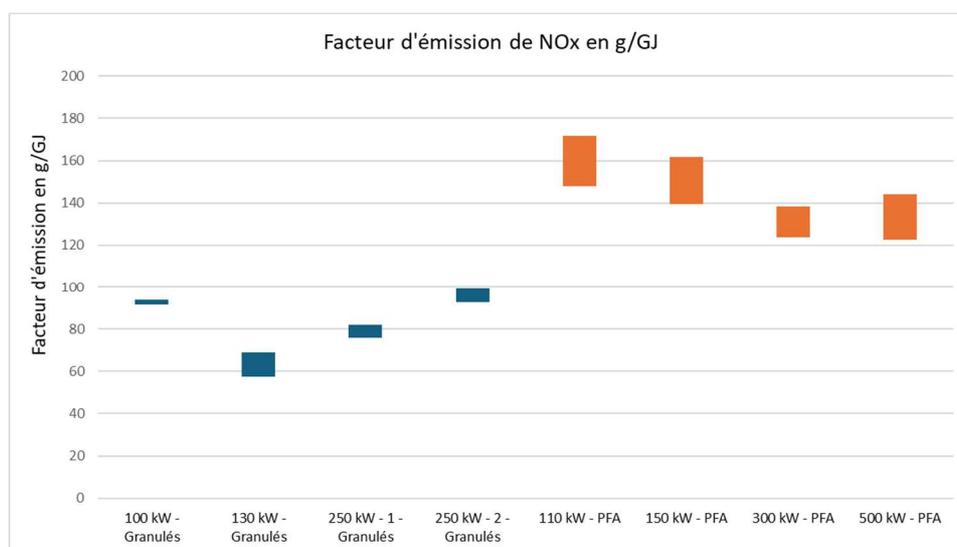


Figure 44 : Variabilité des facteurs d'émissions de NOx en g/GJ (intervalle entre le premier (Q1) et le troisième (Q3) quartiles).

Les facteurs d'émission de NOx des chaudières à granulés sont compris entre 57 et 99 g/GJ. Ils sont plus faibles que ceux des chaudières à PFA, compris entre 123 et 172 g/GJ.

Pour une même chaudière, les facteurs d'émission de NOx varient plus fortement pour les chaudières à PFA (jusqu'à 24 g/GJ d'écart entre le 1^{er} et 3^{ème} quartile) que pour les chaudières à granulés (au maximum 12 g/GJ d'écart entre le 1^{er} et 3^{ème} quartile).

Le Tableau 4 explicite la variabilité des facteurs d'émission pour chaque chaudière, par quartile. Il montre que le facteur d'émission OMINEA¹⁵, de 125 g/GJ pour les chaudières de moins de

20 MW, est supérieur aux facteurs d'émission des chaudières à granulés, et inférieur à celui des chaudières à PFA.

FE NOx (g/GJ)	Premier quartile (Q1)	Médiane (Q2)	Troisième quartile (Q3)	Moyenne	Facteur d'émission OMINEA
100 kW - Granulés	91	93	94	92	125 (chaufferies de puissance < 20 MW)
130 kW - Granulés	57	65	69	61	
250 kW - 1 - Granulés	76	79	82	79	
250 kW - 2 - Granulés	93	96	99	96	
110 kW - PFA	148	159	172	153	
150 kW - PFA	139	152	162	151	
300 kW - PFA	124	132	138	126	
500 kW - PFA	123	133	144	134	

Tableau 4 : Résultats des facteurs d'émission de NOx en g/GJ.

5.5.3. Facteurs d'émission de particules (en masse)

Particules totales en masse

Les facteurs d'émission présentés permettent de compléter les informations fournies par les émissions moyennes de particules (5.3 Emissions rejetées par les chaudières) montrant pour les PFA des émissions plus fortes pour les chaudières les plus puissantes. En effet, les facteurs d'émissions permettent de rapporter ces émissions à la quantité d'énergie produite par la chaudière. Un facteur d'émission plus faible montre un meilleur rapport entre la quantité de biomasse consommée et l'énergie produite.

Les facteurs d'émission de particules (fraction solide) estimés pour chacune des 8 chaudières sont présentés Figure 45. L'intervalle entre le 1^{er} et 3^{ème} quartile des facteurs d'émission y est représenté pour illustrer la variabilité des facteurs d'émission, sans l'influence des valeurs les plus extrêmes (faibles comme élevées).

Les facteurs d'émission des particules des chaudières à granulés sont compris entre 14 et 57 g/GJ. Ils sont plus faibles que ceux des chaudières à PFA, compris entre 31 et 125 g/GJ.

Pour une même chaudière, les facteurs d'émission de particules pour les chaudières à PFA de petite puissance varient plus fortement que les autres chaudières instrumentées, qu'elles soient à PFA ou à granulés. En effet, l'écart entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile est de plus de 60 g/GJ pour les deux chaudières à PFA de « 110 kW – PFA » et « 150 kW – PFA », alors qu'il est au maximum de 23 g/GJ pour toutes les autres chaudières.

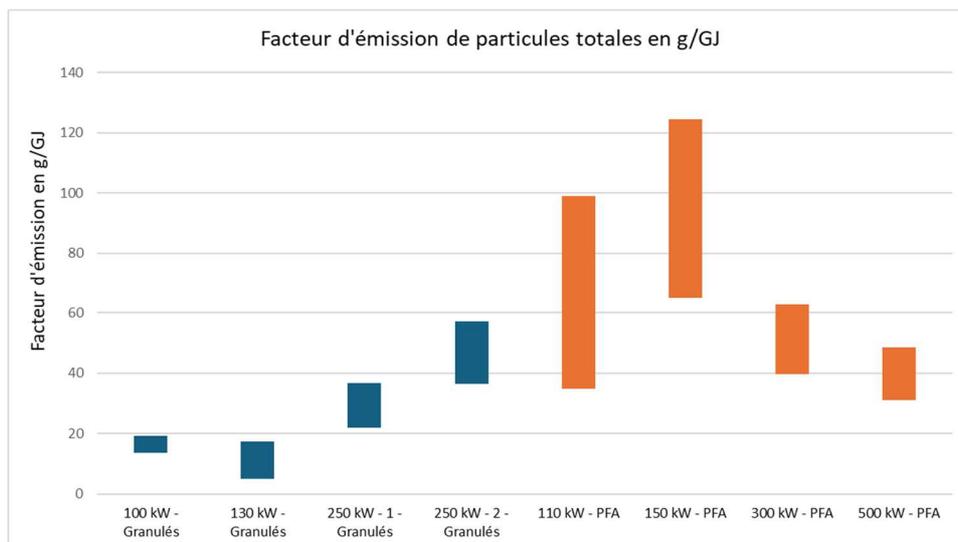


Figure 45 : Variabilité des facteurs d'émissions de particules (fraction solide) en g/GJ (premier (Q1) et troisième (Q3) quartiles)

Le facteur d'émission OMINEA¹⁵ est de 63.8 g/GJ, soit plus que les facteurs d'émission (moyenne, médiane et 3^{ème} quartile, voir tableau 5) des chaudières à granulés et des deux chaudières les plus puissantes à PFA et moins que les chaudières à PFA de 110 et 150 kW.

Les deux chaudières à granulés de 250 kW ont des facteurs d'émission de particules sensiblement différents, puisque ceux de la première chaudière sont compris entre 22 et 37 g/GJ alors que ceux de la deuxième sont compris entre 36 et 57 g/GJ. Cela montre que pour une même puissance, le fonctionnement des chaudières a un impact important sur les émissions.

FE PMtot (fraction solide) (g/GJ)*	Premier quartile (Q1)	Médiane (Q2)	Troisième quartile (Q3)	Moyenne	Facteur d'émission OMINEA**
100 kW - Granulés	14	16	19	44	63.8 (chaufferies de puissance < 20 MW)
130 kW - Granulés	5	12	17	24	
250 kW - 1 - Granulés	22	27	37	31	
250 kW - 2 - Granulés	36	47	57	60	
110 kW - PFA	35	58	99	84	
150 kW - PFA	65	90	125	101	
300 kW - PFA	40	47	63	57	
500 kW - PFA	31	38	49	49	

* Fraction des condensables à ajouter aux facteurs d'émission estimés : 11 à 20%

** Facteur d'émission prenant en compte les fractions solide et condensable des particules.

Tableau 5 : Résultats des facteurs d'émission de particules en g/GJ

Il est à noter que la fraction des condensables est à ajouter aux facteurs d'émission estimés, ce qui représente une augmentation des facteurs d'émission comprise entre 11% à 20% (Cf. chapitre Mesure des composés condensables).

Particules Fines en masse (PM_{2.5})

En complément des facteurs d'émission présentés pour l'ensemble des particules solides, un travail spécifique d'estimation a été mené pour les facteurs d'émission de PM_{2.5}. Il s'appuie sur le profil gravimétrique des particules mesurées (Cf. 5.2.3 Taille des particules : Profils granulométriques et gravimétriques) qui montre que 96% des particules totales sont des PM_{2.5} et sur la prise en compte de la partie condensables (Cf. 5.4 Mesure des composés condensables).

Le tableau 6 ci-dessous présente ces facteurs d'émissions et permet une comparaison avec le facteur OMINEA¹⁵ des chaufferies de puissance < 20 MW.

FE PM _{2.5} (fractions solide et condensable -g/GJ)	Etude Airparif	Facteur d'émission OMINEA*
Granulés	26.8	42.4 (chaufferies de puissance < 20 MW)
PFA	67.4	

* Facteur d'émission prenant en compte les fractions solide et condensable des particules.

Tableau 6 : Résultats des facteurs d'émissions des PM_{2.5} en g/GJ (prise en compte des fractions solide et condensable).

Le facteur d'émission moyen pour les chaudières à granulés est de 26.8 g/GJ d'énergie produite, soit 2.5 fois moins que celui estimé pour les chaudières à PFA. Il est de 37% inférieur à celui issu d'OMINEA pour les des chaufferies de puissance <20 MW, alors que celui des PFA y est 59% supérieur.

5.5.4. Particules en Nombre

Les facteurs d'émission de particules (nombre de particules) estimés pour chacune des 8 chaudières sont présentés Figure 46. L'intervalle entre le 1^{er} et 3^{ème} quartile des facteurs d'émission y est représenté pour illustrer la variabilité des facteurs d'émission, sans l'influence des valeurs les plus extrêmes (faibles comme élevées).

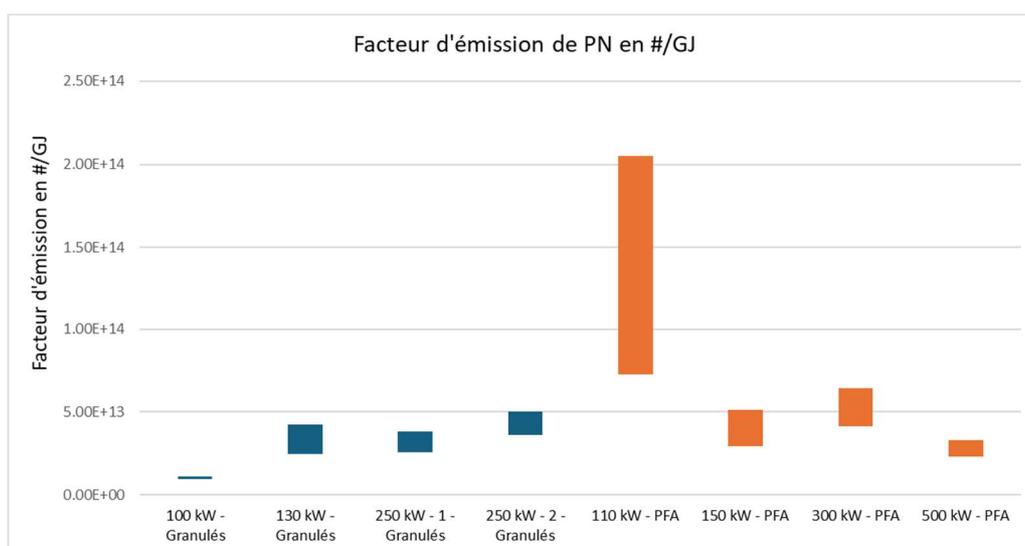


Figure 46 : Variabilité des facteurs d'émissions de PN en nombre/GJ (premier (Q1) et troisième (Q3) quartiles).

Les facteurs d'émission des particules en nombre ne sont pas directement liés au combustible utilisé. En effet, 6 chaudières, 3 à PFA et 3 à granulés, ont des facteurs d'émission comparables (entre 2.48E+13 et 6.43E+13 particules/GJ). En revanche, deux chaudières ont des comportements atypiques : la chaudière à granulés de 100 kW a des facteurs d'émission beaucoup plus faibles (entre 9.48E+12 et 1.11E+13 particules/GJ pour les quartiles 1 à 3) alors que la chaudière à PFA de 110 kW a des facteurs beaucoup plus variables et beaucoup plus élevés (entre 7.26E+13 et 2.05E+14 particules/GJ pour les quartiles 1 à 3).

Il n'existe pas de facteur d'émission OMINEA pour les particules en nombre. Cette étude permet ainsi de fournir des premières valeurs de facteurs d'émission des chaufferies biomasse de faible puissance.

FE particules en nombre - PN (nombre/GJ)	Premier quartile (Q1)	Médiane (Q2)	Troisième quartile (Q3)	Moyenne
100 kW - Granulés	9.48E+12	1.03E+13	1.11E+13	1.11E+13
130 kW - Granulés	2.48E+13	3.15E+13	4.21E+13	9.31E+13
250 kW - 1 - Granulés	2.54E+13	3.19E+13	3.82E+13	3.22E+13
250 kW - 2 - Granulés	3.58E+13	4.27E+13	5.02E+13	5.62E+13
110 kW - PFA	7.26E+13	1.13E+14	2.05E+14	1.80E+14
150 kW - PFA	2.95E+13	3.85E+13	5.13E+13	4.30E+13
300 kW - PFA	4.15E+13	4.73E+13	6.43E+13	5.94E+13
500 kW - PFA	2.29E+13	2.74E+13	3.30E+13	3.31E+13

Tableau 7 : Résultats des facteurs d'émission de particules en nombre/GJ.

5.5.5. Résultats des Facteurs d'émission de CO

Les **facteurs d'émission calculé pour le monoxyde de carbone sont très variables d'une chaufferie à l'autre** avec pour la chaudière 100 kW – Granulés un facteur d'émission faible compris entre 18 g/GJ et 31 g/GJ (représentant la borne basse avec le 1^{er} quartile et la borne haute avec le 3^{ème} quartile) et à l'inverse un facteur d'émission de CO très important pour la petite chaudière de « 110 kW – PFA » avec un intervalle compris entre 545 g/GJ à 2 432 g/GJ. Rappelons que le fonctionnement de cette chaudière est caractérisé par une alternance entre un fonctionnement de « Démarrage/montée en charge » et « arrêt/baisse de charge » sans phase de chauffe stabilisée. Dans de telles conditions, la combustion est rarement de bonne qualité (combustion incomplète) entraînant des émissions très importantes de CO tout en ayant une faible énergie produite.

Si la chaudière la plus puissante rejette dans l'air une quantité de CO plus importante que les autres chaudières (Cf. Chapitre Emissions rejetées par les chaudières), en prenant en compte l'énergie qu'elle délivrée, un meilleur rapport entre la quantité de biomasse consommée et l'énergie produite est mis en lumière par rapport aux autres chaudières PFA de plus petite puissance.

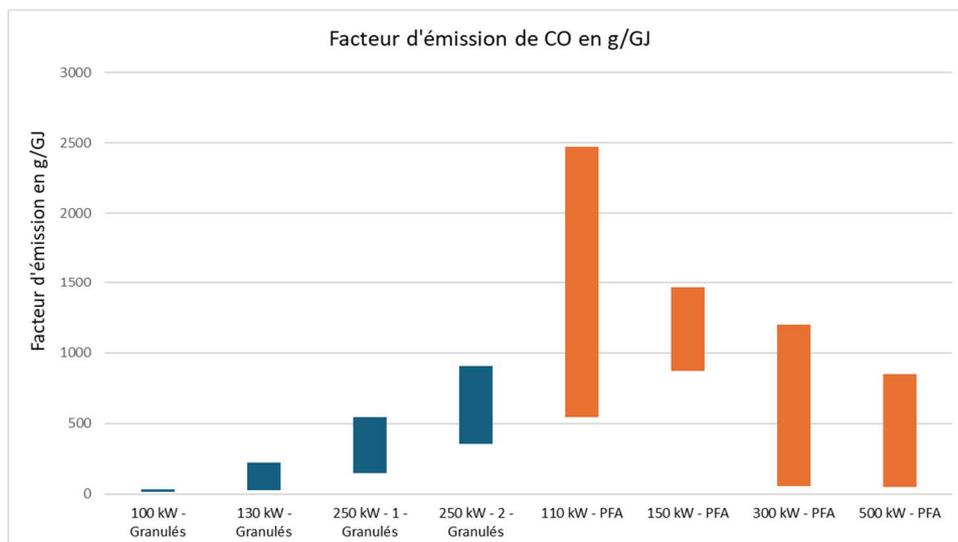


Figure 47 : Variabilité des facteurs d'émissions de CO en g/GJ (premier (Q1) et troisième (Q3) quartiles).

Les paramètres statistiques des facteurs d'émission calculés à partir des données mesurées au pas de temps fin d'une minute sont présentés Tableau 8.

FE CO (g/GJ)	Premier quartile (Q1)	Médiane (Q2)	Troisième quartile (Q3)	Moyenne	Facteur d'émission OMINEA
100 kW - Granulés	18	23	31	68	275 (chaufferies de puissance < 20 MW)
130 kW - Granulés	24	45	221	754	
250 kW - 1 - Granulés	147	284	544	406	
250 kW - 2 - Granulés	354	573	905	706	
110 kW - PFA	545	875	2472	2432	
150 kW - PFA	869	1133	1466	1241	
300 kW - PFA	57	101	1198	998	
500 kW - PFA	48	340	850	880	

Tableau 8 : Résultats des facteurs d'émission de CO en g/GJ.

Le facteur d'émission de référence (OMINEA¹⁵) permettant de calculer des émissions de CO pour les chaudières de puissance inférieure à 20 MW dans le cadre des inventaires est de 275 g/GJ). Les facteurs d'émission déterminés dans le cadre de l'étude sur les 8 chaudières sont plus élevés que celui de référence, hormis pour la chaudière « 100 kW – Granulés » pour laquelle le facteur d'émission est plus faible.

Ainsi, pour les chaudières de petites puissances, comme celles étudiée dans le cadre de cette étude (de 100 à 500 kW), le facteur d'émissions proposé pour l'élaboration des inventaires de CO pour ces installations de petites puissances semble faible. Comme ce facteur d'émission de référence est établi pour en large gamme de puissance, celui-ci peut être cohérent pour des chaudières de puissance plus importante dont les conditions de combustion peuvent être de meilleure qualité.

5.5.6. Comparaison des facteurs d'émission des petites chaufferies biomasse au regard des autres moyens de chauffage

Les facteurs d'émission estimés grâce à cette étude sont exprimés en g/GJ. Ces GJ correspondent à l'énergie contenue dans la biomasse entrante dans les chaudières, selon son pouvoir calorifique. Afin de pouvoir comparer les différents moyens de chauffage, il est nécessaire de s'intéresser aux facteurs d'émission associés non pas à l'énergie entrante mais à l'énergie utile fournie par les chaudières, la différence correspondant au rendement des chaudières. Le rendement utilisé pour les chaufferies instrumentées est de 85%, ce qui correspond à leur rendement théorique moyen défini par les constructeurs. Ce même rendement (85%) est appliqué aux facteurs d'émission OMINEA des chaufferies de plus grosses puissances (20 MW>P, 50 MW>P>20 MW, 300 MW>P>50 MW).

Ces facteurs d'émission sont exprimés en mg/kWh.

Le facteur d'émission moyen en NO_x issu de cette étude pour les chaudières à granulés est de l'ordre de 350 mg/kWh, ce qui le situe au niveau des poêles à granulés individuels (339 mg/kWh) et des foyers fermés à bûches pré-2005 (335 mg/kWh). Il correspond aussi au facteur d'émission d'une chaudière à gaz individuelle classique (352 mg/kWh).

Le facteur d'émission moyen en NO_x issus de cette étude pour les chaudières à PFA est de l'ordre de 600 mg/kWh, ce qui le situe au-dessus de l'ensemble des équipements individuels, hors foyers ouverts à bûches. Il est légèrement supérieur aux FE des chaudières de plus forte puissance (Tableau 9), qui émettent plus de NO_x, du fait de températures de combustion plus élevées. Il est en revanche 3 fois moins importants que les facteurs d'émission des foyers ouverts à bûches individuels. Ceux-ci sont très émissifs, du fait d'un rendement très faible (10%) et de conditions de combustion dégradées.

Le facteur d'émission moyen en PM_{2,5} issu de cette étude pour les chaudières à granulés est de l'ordre de 115 mg/kWh. Il est de 53% moins élevé que celui des équipements individuels ayant les facteurs d'émission les moins élevés (chaudières ou poêles à granulés), et plus de 250 fois moins élevé que celui des foyers ouverts à bûches individuels. Le facteur d'émission des chaudières à granulés de cette étude reste néanmoins très largement supérieur à ceux des équipements individuels utilisant d'autres énergies (fioul, gaz, électricité...). Il est aussi très supérieur aux facteurs d'émission OMINEA des chaufferies de grosse puissance (36 mg/kWh pour les puissances entre 20 et 50 MW, et 19 mg/kWh pour les puissances entre 50 et 300 MW).

Le facteur d'émission moyen en PM_{2,5} issu de cette étude pour les chaudières à PFA est de l'ordre de 300 mg/kWh, ce qui le situe légèrement au-dessus des équipements individuels à granulés (+17%). Ce facteur d'émission est aussi très largement supérieur à ceux des équipements individuels utilisant d'autres énergies (fioul, gaz, électricité...) et aux facteurs d'émission OMINEA des chaufferies de grosse puissance (36 mg/kWh pour les puissances entre 20 et 50 MW, et 19 mg/kWh pour les puissances entre 50 et 300 MW).

ÉMISSIONS DE PARTICULES FINES (PM_{2,5}) DE DIFFÉRENTS MOYENS DE CHAUFFAGE

Émissions à chaleur fournie identique. Les valeurs entre crochets correspondent aux émissions moyennes minimales et maximales mesurées sur des chaufferies instrumentées par Airparif - Sources : données Airparif, ADEME, INERIS, CITEPA (2025)

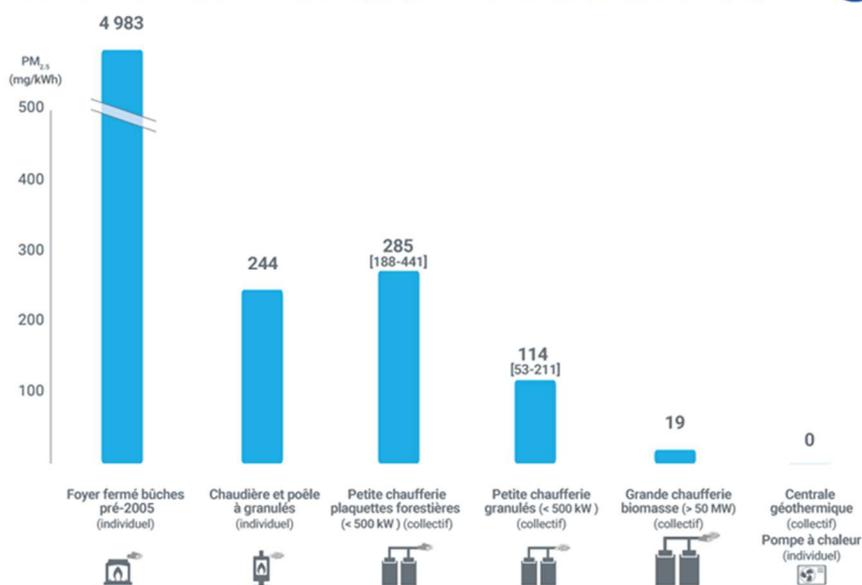


Figure 48 : Comparaison des facteurs d'émission de PM_{2,5} de différents moyens de chauffage.

	Moyenne PM _{2,5} (mg/kWh) – fractions solide et condensable	Moyenne NO _x (mg/kWh)
Chaufferie Granulés – Etude Biomasse	114 (53 - 211)	352 (274 - 407)
Chaufferie PFA – Etude Biomasse	285 (188 - 441)	609 (558 - 672)
OMINEA 20 MW>P	180	529
OMINEA 50 MW>P>20 MW	36	541
OMINEA 300 MW>P>50 MW	19	458

Tableau 9 : Résultats des facteurs d'émission en NO_x et en PM_{2,5} en mg/kWh, avec prise en compte du rendement des chaudières, et comparaison aux facteurs OMINEA.

6. Conclusions et recommandations

Cette étude a permis de mesurer les émissions de polluants atmosphériques (Oxydes d'azote, particules, monoxyde de carbone) et de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone et méthane) de 8 chaudières biomasse de puissances inférieures à 500 kW pendant 1 à 6 mois dans les conditions réelles d'exploitation. 4 chaudières à granulés et 4 fonctionnant avec des plaquettes forestières ont été instrumentées. L'INERIS a de plus réalisé des mesures ponctuelles de particules condensables (particules qui se forment à la sortie de la cheminée par condensation de composés émis à l'état gazeux) sur 3 chaudières.

Ces mesures ont permis de calculer les facteurs d'émission en mg/GJ d'énergie produite par la combustion du bois, permettant de les comparer aux facteurs d'émission du CITEPA utilisés dans les

inventaires d'émissions mais également les facteurs d'émission par mg/kWh d'énergie finale délivrée, permettant des comparaisons à d'autres systèmes de chauffage en prenant en compte le rendement des équipements.

Le facteur d'émission moyen en NOx (ramené à l'énergie finale) issu de cette étude pour les chaudières à granulés (352 mg/kWh) est du même ordre de grandeur que celui des poêles à granulés individuels, des foyers fermés à bûches pré-2005 ou de celui d'une chaudière à gaz individuelle classique. En revanche, le facteur d'émission en énergie finale pour les chaudières à plaquettes forestières (PFA) est près de deux fois supérieur (609 mg/kWh) ; il est supérieur d'au moins 30% à l'ensemble des équipements individuels hors foyers ouverts à bûches. Il est également légèrement supérieur aux facteurs d'émission des chaudières de plus forte puissance, dont la combustion à des températures de combustion plus élevées favorise l'émission de NOx dit thermiques, c'est-à-dire produits par l'oxydation de l'azote de l'air dans la chambre de combustion.

Cette étude montre également que le fonctionnement des chaudières impacte directement leurs émissions. Il est ainsi recommandé de :

1. **Bien dimensionner les chaudières aux besoins**, afin d'avoir un fonctionnement régulier en phase de chauffe nominale. Les phases successives « d'arrêt/baisse de charge » et de « démarrage/montée en charge » engendrent les conditions de combustion les plus mauvaises.
2. **Apporter un réglage optimum des paramètres de la chaudière et notamment l'excès d'air** qui doit être suffisant pour garantir une combustion complète mais pas trop élevé pour éviter de refroidir la chambre de combustion et limiter la qualité de combustion. La valeur d'excès d'air à partir de laquelle les concentrations de particules sont augmentées est de l'ordre de 3 à 4.
3. Au-delà des critères d'humidité du combustible à respecter, **choisir un combustible, dont** les teneurs en potassium et sodium sont les plus faibles, ces derniers influençant directement les émissions de particules.

L'étude a également permis des mesures de composés spécifiques (projet CAPCHA) sur trois chaudières, dont les résultats seront publiés ultérieurement par les équipes en charge de ces travaux. Ils permettront de compléter ceux de ce rapport.

L'étude a également permis des mesures de composés spécifiques (projet CAPCHA) sur trois chaudières, dont les résultats seront publiés ultérieurement par les équipes en charge de ces travaux. Ils permettront de compléter ceux de ce rapport. Il est prévu de mettre à disposition tous ces résultats pour la communauté scientifique via une publication.

Les données produites seront par ailleurs partagées avec le CITEPA pour faire évoluer les facteurs d'émission nationaux et valorisées au niveau européen en lien avec l'Ineris et l'Ademe.

Ensuite, la combustion du bois émet du dioxyde de carbone, et dans de mauvaises conditions de combustion du méthane, autre gaz à effet de serre. Il est souvent considéré que ce dioxyde de carbone est compensé par l'absorption de CO₂ lors de la croissance des arbres. Cette approche repose sur une vision comptable du carbone, mais ne prend pas en compte le fait que la reconstitution des stocks de carbone forestier peut prendre de quelques années à plusieurs décennies, période durant laquelle le CO₂ reste présent dans l'atmosphère. Une analyse est à mener pour évaluer la neutralité carbone de ce type de processus et la capacité de décarbonation du chauffage au bois en substitution à d'autres sources d'énergies.

Cette étude expérimentale a de plus permis d'**industrialiser un process de mesures des particules permettant de définir les contributions en PM₁₀, en PM_{2.5} ainsi que de mesurer les particules de toutes taille en nombre**. L'expérimentation réussie de ces mesures pourrait être appliquée à d'autres expérimentations en France et à des chaufferies de plus grosses puissances (>1 MW), ce qui permettrait d'améliorer notamment la connaissance de la contribution des PM₁₀ et de PM_{2.5} dans les émissions de particules totales.

Plusieurs systèmes de filtration existent actuellement sur des chaufferies de plus grosses puissances et certains peuvent être également installés sur des chaufferies de petites puissances. Un test de systèmes de dépollution des particules sur ces petites chaufferies serait également pertinent, afin d'évaluer en situation réelle l'efficacité de différents systèmes, par exemple, dans le cadre d'expérimentations Airlab.

Annexe 1 - Taux de données disponibles

Les mesures à l'émission des chaudières ont été réalisées en travaillant avec 2 sous-traitants fournisseurs des matériels de mesure et plus généralement d'une solution automatisée de recueil des données de mesures de gaz et de particules (recettage matériels, maintenance au cours de la campagne, étalonnage gaz) les 2 sous-traitants (ENVEA et ADDAIR) s'engageant sur un taux de disponibilité des données sur chacune des installations. Un 3^{ème} sous-traitant (CERTAM) a eu pour rôle d'ajuster les mesures délivrées par les appareils automatiques des particules pour disposer de mesures fiables en PM₁₀, PM_{2,5} et la granulométrie de ces particules.

L'analyse des données issues des mesures à l'émission des chaudières est réalisée à partir d'un nombre de données disponible différent pour chaque chaudière. Cela est dû à la durée d'instrumentation, à la récurrence des périodes de chauffe différente selon les campagnes de mesure et à d'éventuels problèmes techniques rencontrés (appareils de mesure ou chaudière) etc.

Le taux de données disponibles indique **le taux de fonctionnement des appareils de mesure** quel que soit le mode de fonctionnement des chaudières, y compris à l'arrêt. Les taux de fonctionnement ont été calculés à partir des données enregistrées à la minute auprès des huit chaudières.

Des difficultés techniques relatives à l'instrumentation des polluants gazeux et particulaires ont entraîné des périodes pour lesquelles il n'y a pas de données disponibles. Ainsi, le taux de disponibilité est compris selon les chaudières entre 43% et 85% pour les polluants gazeux et entre 12% et 77% pour les données particulaires (cf. Tableau 10).

Chaufferie	Période d'instrumentation	Taux de données disponibles Gaz et paramètres chaudières	Taux de données disponibles Particules
100 kW - Granulés	06/11/2023 au 11/12/2023	49%	12%
130 kW - Granulés	06/11/2023 au 22/01/2024	43%	22%
250 kW 1- Granulés	12/12/2023 au 24/04/2024	52%	51%
250 kW 2 - Granulés	12/12/2023 au 21/01/2024	74%	53%
110 kW - PFA	19/10/2023 au 11/12/2023	65%	53%
150 kW - PFA	16/10/2023 au 24/04/2024	85%	73%
300 kW - PFA	23/01/2024 au 19/03/2024	71%	67%
500 kW - PFA	22/01/2024 au 29/03/2024	84%	77%

Tableau 10 : Taux de données disponibles selon les chaudières instrumentées et les appareils mis en œuvre (mesure gaz et mesure particules).

Comme les besoins en chauffage des bâtiments alimentés sont différents en fonction du temps, **les périodes de chauffe pendant les mesures sont plus ou moins importantes en fonction des chaudières**. Ainsi le taux de données recueillies lors du fonctionnement des chaudières (période de chauffe) est très variable. Il est compris entre 31% et 90% pour l'instrumentation des appareils permettant la mesure des gaz et de 32 à 93 % pour la mesure des particules (voir Tableau 12). Par exemple, les chaudières « 250 kW – 1 Granulés » et « 150 kW – PFA » connaissent un fonctionnement

important puisque 90% du temps où les mesures de gaz sont disponibles, il y a eu une production de chaleur. A l'inverse, lors des périodes étudiées, ce besoin de production de chaleur est assez peu important pour certaines chaudières (chaudières « 110 kW – PFA » et « 300 kW – PFA ») avec une période de chauffe durant environ 2/3 du temps.

Le temps de chauffe sur les périodes de disponibilité des données est similaire pour les gaz et les particules hormis pour la chaudière « 130 kW – Granulés » pour laquelle plus de données sont disponibles pour les particules (74% contre 63% pour les gaz).

De plus, comme illustré au chapitre 4.2, les périodes de chauffe des chaudières sont différentes selon des cycles plus ou moins récurrents des périodes de « démarrage/ montée en charge », « phase nominale de chauffe » et de « baisse de charge ».

Chaufferie	% Données lors de période de chauffe	% Données "phase nominale"	% données "démarrage/montée en charge"	% données "arrêt/baisse de charge"
100 kW - Granulés	84%	96%	3%	1%
130 kW - Granulés	59%	63%	25%	12%
250 kW 1- Granulés	90%	89%	9%	2%
250 kW 2 - Granulés	80%	90%	9%	2%
110 kW - PFA	31%	0%	37%	63%
150 kW - PFA	90%	84%	10%	6%
300 kW - PFA	34%	28%	59%	13%
500 kW - PFA	68%	94%	4%	3%

a. Données gaz

Chaufferie	% Données lors de période de chauffe	% Données "phase nominale"	% données "démarrage/montée en charge"	% données "arrêt/baisse de charge"
100 kW - Granulés	86%	94%	4%	2%
130 kW - Granulés	74%	74%	20%	5%
250 kW 1- Granulés	89%	89%	9%	2%
250 kW 2 - Granulés	89%	90%	8%	2%
110 kW - PFA	32%	0%	38%	62%
150 kW - PFA	93%	83%	11%	6%
300 kW - PFA	36%	28%	59%	13%
500 kW - PFA	74%	94%	4%	3%

b. Données particules

Tableau 11 : Pourcentage de données recueillies en période de chauffe et selon les phases de chauffe durant l'instrumentation des différentes chaudières.

Notamment, compte tenu de son caractère de chauffe très bref, la chaufferie « 110 kW – PFA » ne présente pas de temps de chauffe en période nominale. Le cycle de chauffe est uniquement marqué par des périodes de « montée en charge » puis à partir du point de chauffe arrivée à son apogée, une période de baisse de charge. Compte tenu de ce mode de fonctionnement les données disponibles sont uniquement lors de la « montée en charge », pour un peu moins de 40% du temps et pour un peu plus de 60% du temps pour la phase de « baisse de charge », celle-ci étant plus longue que la montée en charge qui est brève et rapide.

Le fonctionnement également très dynamique de la chaudière « 300 kW – PFA » entraîne des temps de fonctionnement en phases de « montée en charge » les plus représentés (près de 60%).

Pour les autres chaudières, **la chauffe en « phase nominale » est la plus représentée. Lors de la période de chauffe, les phases de « montée en charge » sont généralement plus longues que celles de « baisse de charge ».**

L'interprétation et les conclusions apportées selon les cycles de chauffe sont ainsi généralement plus robustes en « phase nominale » lors de laquelle le nombre de données est plus important.

Annexe 2 : Modèle statistique d'analyse des facteurs d'influence

Pour répondre à l'objectif d'identification et de hiérarchisation de l'influence des paramètres de caractéristiques des chaudières (puissance, âge), des combustibles (PFA/Granulés, composition chimique, taux d'humidité, ...), des conditions de combustion (phase, excès d'air, pression) sur les concentrations des différents polluants mesurés lors de l'étude, une approche par modélisation statistique a été adoptée.

La démarche est de (1) construire un modèle statistique entraîné sur les données de la campagne de mesure, (2) sélectionner le modèle selon sa performance (pourcentage d'explicative du modèle, erreur de prédiction RMSE à minimiser) mais également selon la cohérence des facteurs d'influence retenus par le modèle et de la réalité physique de leur influence sur les concentrations des différents polluants.

Dans cette démarche, l'ensemble des chaudières de l'étude est analysé, à l'exception de la chaudière « 100 k W – Granulés », du fait d'un taux de disponibilité des données trop faible pour cette chaudière. Etant donné que les chaudières (de par leur dimensionnement) émettent des quantités d'émissions et de concentrations de polluants en air ambiant sur des gammes très différentes, il convient d'analyser ici les concentrations de polluants standardisées à 6% d'O₂ afin de se ramener à des gammes comparables entre chaudières.

Les concentrations d'oxydes d'azote (NO_x), particules en masse (PM_{tot}) et monoxyde de carbone (CO) ont été étudiées dans cette partie.

Données utilisées par le modèle

Les concentrations standardisées à 6% d'O₂ pour chacune des chaudières sont analysées à la fréquence minute, et sont mises au regard des paramètres suivants :

Caractéristiques chaudière :

Puissance (en kW)

Age de la chaufferie (nombre d'années depuis la mise en service)

Paramètres de combustion :

Phase (cycle de chauffe)

Excès d'air

Pression

Caractéristiques du combustible :

Type de combustible : PFA/Granulés

Pouvoir calorifique (PCI/PCS)

Taux d'humidité du combustible (%)

Composition chimique du combustible (taux en %) : pour le carbone, hydrogène, azote, soufre, chlore, oxygène, calcium, potassium, sodium et pour les métaux (cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb, zinc, arsenic, silicium, mercure).

Certains paramètres n'ont pas été fournis au modèle statistique du fait de limites d'interprétabilité du paramètre, tels que la température de fumée et la densité du combustible tassé.

Etant donné que les mesures ont été réalisées sur une période plus ou moins longue selon les chaudières, il convient d'utiliser un nombre égal de mesures pour chacune des chaudières. Ainsi, un échantillonnage de 12 772 données minutes (équivalent à 9 jours de données en continu) a été réalisé, en conservant la représentativité initiale des jours de la semaine, des heures et des cycles de chauffe mesurés pour chacune des chaudières. Un total de près de 90 000 données minutes a donc été utilisé pour entraîner et valider le modèle statistique.

Modèle statistique

Le modèle statistique utilisé dans cette démarche est un modèle de régression basé sur un ensemble d'arbres de décision et avec de l'optimisation par descente de gradient. Le package utilisé est celui de XGBoost.

Un modèle statistique est construit pour chaque polluant : NO_x, PM_{tot} et CO.

Afin d'interpréter l'influence des paramètres retenus par le modèle et de hiérarchiser les facteurs entre eux, l'analyse SHAP est employée. L'analyse SHAP repose sur le calcul et l'analyse de valeurs de Shapley.

Pour chaque observation dans le jeu de données (une observation désigne la valeur de concentration de polluant et les valeurs des paramètres précédemment décrits - caractéristiques chaudière, paramètre de combustion, caractéristiques du combustible - pour un instant donné), une valeur de Shapley est calculée pour chaque paramètre. La valeur de Shapley, représente l'influence du paramètre sur la concentration de polluant :

- Signe de la valeur de Shapley : si la valeur de Shapley est positive, alors le paramètre contribue à augmenter la concentration de polluant ; si la valeur de Shapley est négative, alors le paramètre contribue à diminuer la concentration de polluant.
- Amplitude de la valeur de Shapley : la valeur numérique de Shapley s'exprime dans la même unité que la valeur à prédire (ici la concentration de polluant), ainsi, elle quantifie de combien la concentration de polluant est augmentée ou diminuée.
-

Le graphique dit « Résumé SHAP » représente l'ensemble des valeurs de Shapley calculées pour chaque paramètre (axe des abscisses), et la couleur est associée à la valeur du paramètre (valeur forte en rouge et valeur faible en bleu).

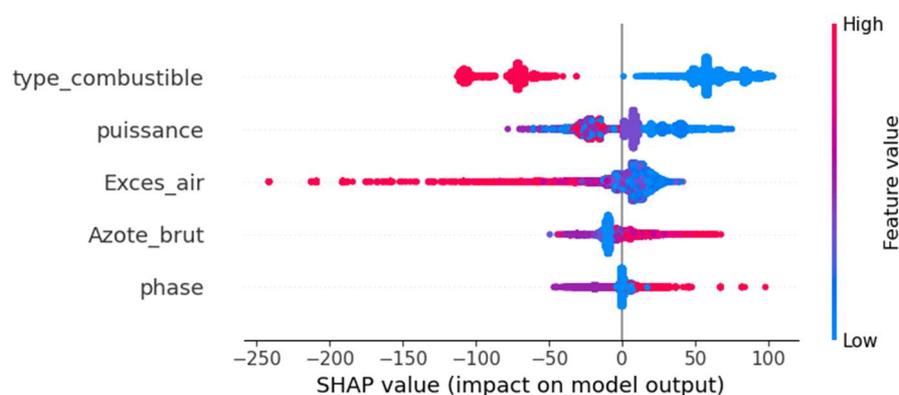


Figure 49 : Résumé SHAP du modèle statistique sur les concentrations de NO_x.

De plus, ce graphique montre la hiérarchie des paramètres entre eux (ici le type de combustible en premier et la phase en dernier). Celle-ci est calculée à partir de la moyenne des valeurs absolues de valeur de Shapley (peu importe donc le signe de l'influence). Le Tableau 12 permet de quantifier cette influence moyenne de chaque paramètre obtenu à partir du modèle statistique sur les concentrations d'oxydes d'azote (standardisées à 6% d'O₂) :

Paramètre	Influence moyenne (valeurs absolues de SHAP)	Importance SHAP (%)	Importance SHAP cumulée (%)
<i>type_combustible</i>	71.82	0.57	0.57
<i>puissance</i>	21.16	0.17	0.74
<i>Exces_air</i>	16.82	0.13	0.88
<i>Azote_brut</i>	10.03	0.08	0.96
<i>phase</i>	5.43	0.04	1.00

Tableau 12 : Influence moyenne (valeur absolue) de chaque facteur, influence relative et influence cumulée. Analyse SHAP sur le modèle statistique de prédiction des concentrations d'oxydes d'azote (NO_x).

L'influence moyenne des facteurs pour les concentrations de particules et de monoxyde de carbone est donné dans les tableaux suivants :

Paramètre	Influence moyenne (valeurs absolues de SHAP)	Importance SHAP (%)	Importance SHAP cumulée (%)
<i>Exces_air</i>	51.20	0.47	0.47
<i>Potassium_sec</i>	16.13	0.15	0.62
<i>Silicium_sec</i>	12.24	0.11	0.73
<i>Humid_brut</i>	9.84	0.09	0.82
<i>Sodium_sec</i>	8.15	0.07	0.89
<i>puissance</i>	7.55	0.07	0.96
<i>phase</i>	2.41	0.02	0.98
<i>type_combustible</i>	1.90	0.02	1.00

Tableau 13 : Influence moyenne (valeur absolue) de chaque facteur, influence relative et influence cumulée. Analyse SHAP sur le modèle statistique de prédiction des concentrations de particules (PM_{tot}).

Paramètre	Influence moyenne (valeurs absolues de SHAP)	Importance SHAP (%)	Importance SHAP cumulée (%)
<i>Exces_air</i>	1864.19	0.69	0.69
<i>Puissance (*)</i>	667.26	0.25	0.93
<i>phase</i>	120.26	0.04	0.98
<i>type_combustible</i>	62.91	0.02	1.00

Tableau 14 : Influence moyenne (valeur absolue) de chaque facteur, influence relative et influence cumulée. Analyse SHAP sur le modèle statistique de prédiction des concentrations de monoxyde de carbone (CO).

Comme précisé dans la partie 5.2.4 Concentrations en monoxyde de carbone (CO), il convient de valider les résultats de l'analyse SHAP au regard de la réalité physique des paramètres. Dans le cas du modèle statistique de prédiction des concentrations de CO, l'influence de la puissance n'est pas en adéquation avec les analyses des différences entre chaudières, et ce résultat ne permet donc pas d'être conclusif sur l'influence de la puissance sur les concentrations de CO pour les chaudières instrumentées lors de l'étude.

Annexe 3 : Concentrations en NOx

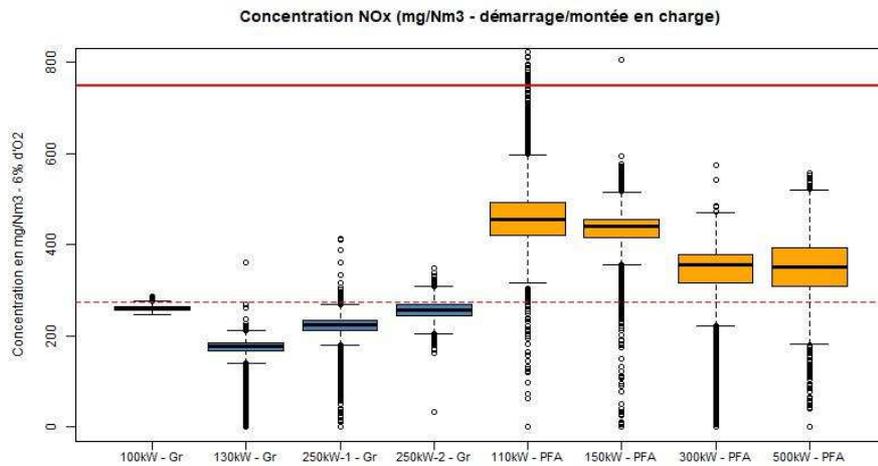


Figure 50 : Distribution des concentrations d'oxydes d'azote des huit chaudières sur les périodes de montées en charge mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

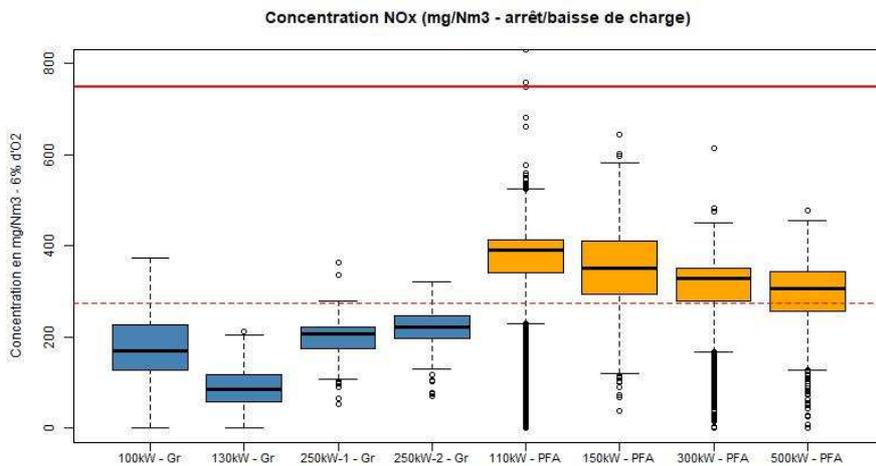


Figure 51 : Distribution des concentrations d'oxydes d'azote des huit chaudières sur les périodes de baisses de charge mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

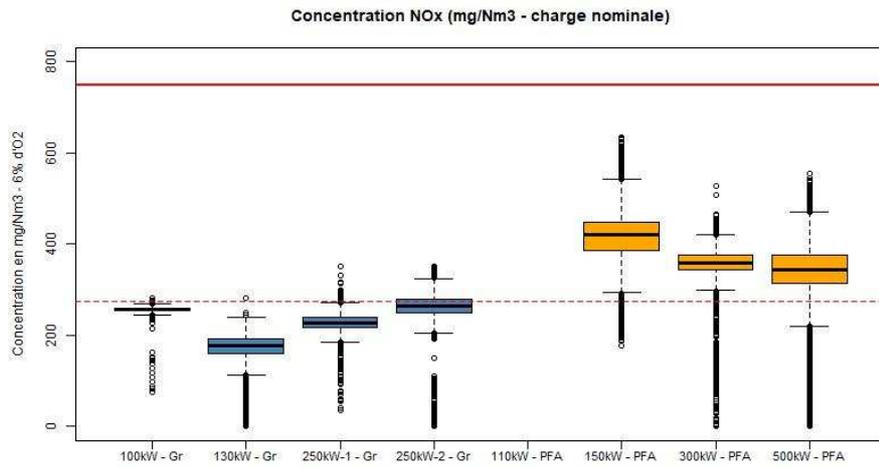


Figure 52 : Distribution des concentrations d'oxydes d'azote des huit chaudières en phase nominale mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

Annexe 4 : Concentrations en CO

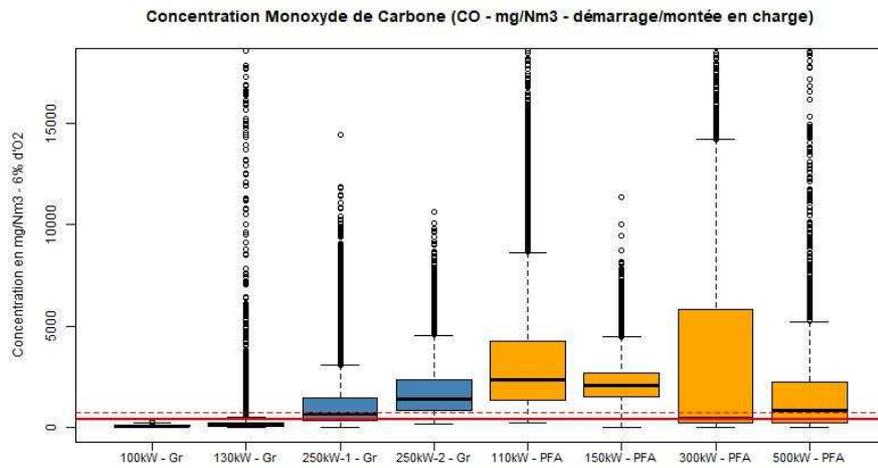


Figure 53 : Distribution des concentrations de monoxyde de carbone des huit chaudières sur les périodes de montées en charge mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

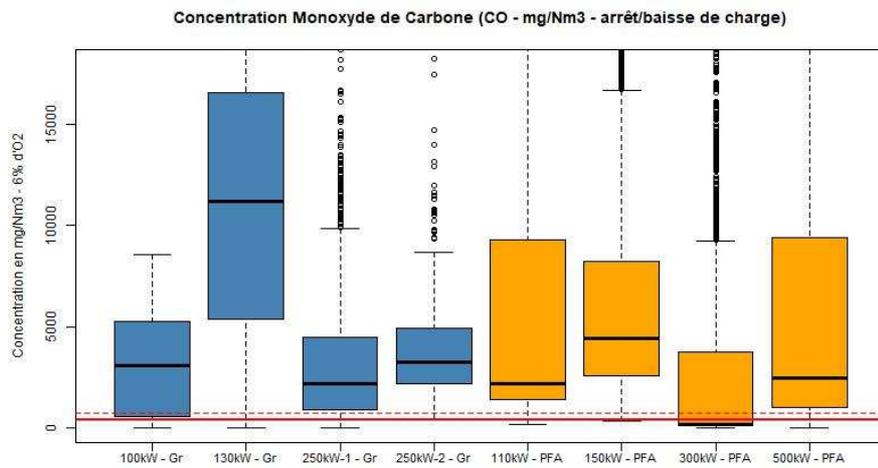


Figure 54 : Distribution des concentrations de monoxyde de carbone des huit chaudières sur les périodes de baisses de charge mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

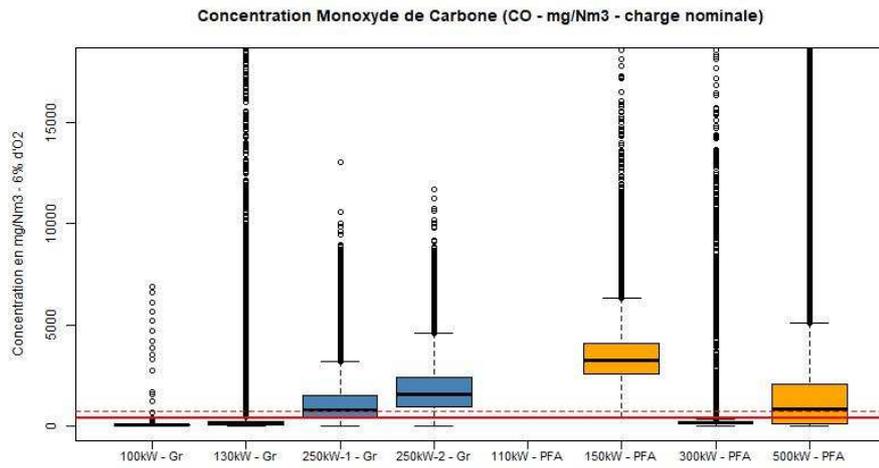


Figure 55 : Distribution des concentrations de monoxyde de carbone des huit chaudières en phase nominale en charge mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

Annexe 5 : Concentrations en Particules totales

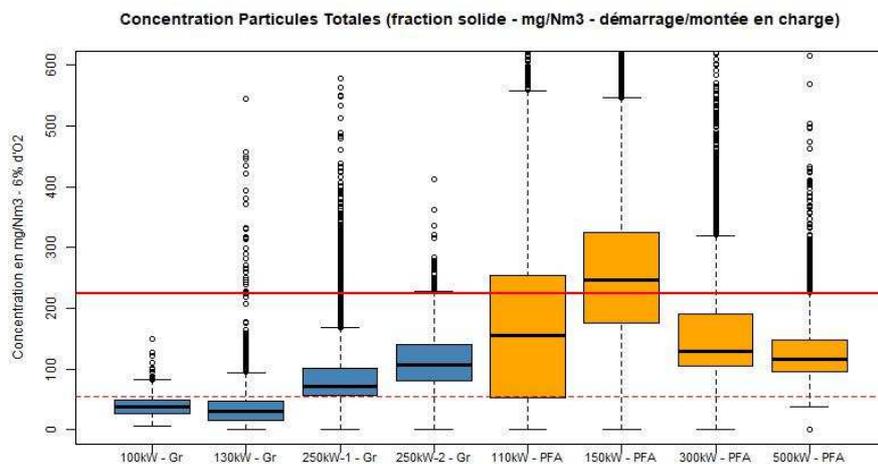


Figure 56 : Distribution des concentrations en particules totales des huit chaudières sur les périodes de montées en charge mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

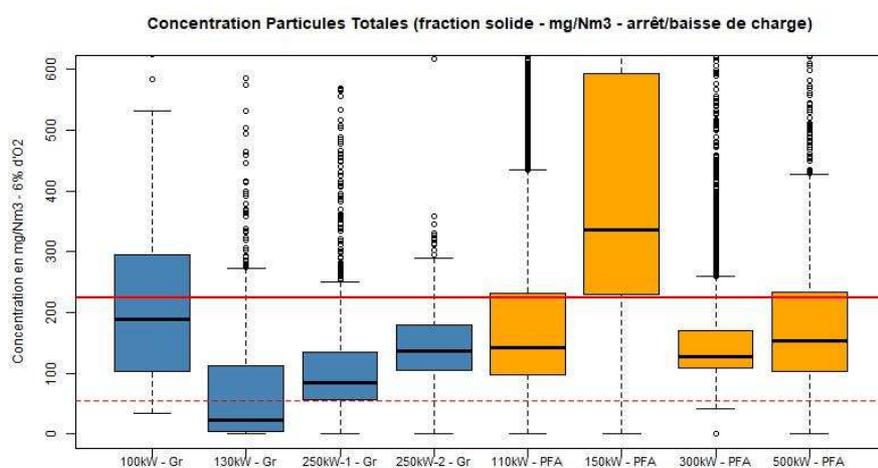


Figure 57 : Distribution des concentrations en particules des huit chaudières sur les périodes de baisse de charge mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange).

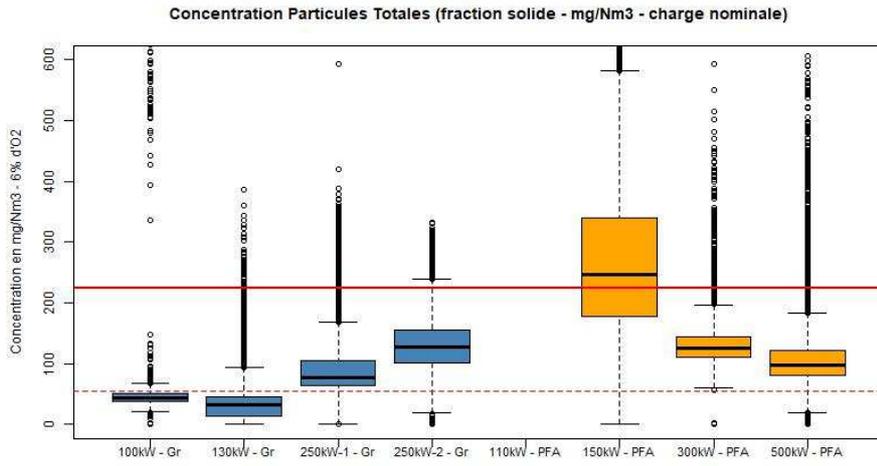


Figure 58 : Distribution des concentrations en particules totales des huit chaudières en phase nominale mises au regard des valeurs prises comme référence (chaudière à granulé en bleu ; chaudière à PFA en orange)