



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

SYNTHÈSE

1. Introduction

Le bois-énergie est actuellement reconnu comme la première source d'énergie renouvelable produite et consommée en France¹. Dans le cadre des objectifs nationaux visant à augmenter la part des énergies renouvelables dont celle de la consommation finale de chaleur, 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. Ce combustible est notamment utilisé dans des chaudières de faible puissance qui sont peu documentées et ne sont généralement équipées d'aucun système de traitement des fumées.

Aussi, 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 l'Organisation mondiale de la santé recommande de d'avantage documenter les sources d'émissions puisque que leur impact sanitaire fait consensus avec un nombre croissant d'études.

Huit chaudières de faible puissance (< 500 kW), alimentées avec des granulés ou des plaquettes forestières (PFA) ont été instrumentées en continu en Île-de-France, sur des périodes allant de 1 à 6 mois, pour prendre en compte les différentes phases d'exploitation et de chauffe. Les mesures à l'émission de différents polluants de l'air et gaz à effet de serre émis par ces chaufferies ont été réalisés : pour des gaz (CO₂, CH₄, NO_x, CO), mesurés en continu avec des MIR 9000 P, pour des particules en continu avec des PPS ainsi que des mesures granulométriques et gravimétriques ponctuelles avec un ELPI+.

Cette étude a été financée par l'astreinte décidée par le Conseil d'État, dans le cadre du non-respect des valeurs limites réglementaires dans l'air ambiant 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 ainsi que l'Ademe et l'Anses dans le cadre du projet CAPCHA, qui sera publié ultérieurement.

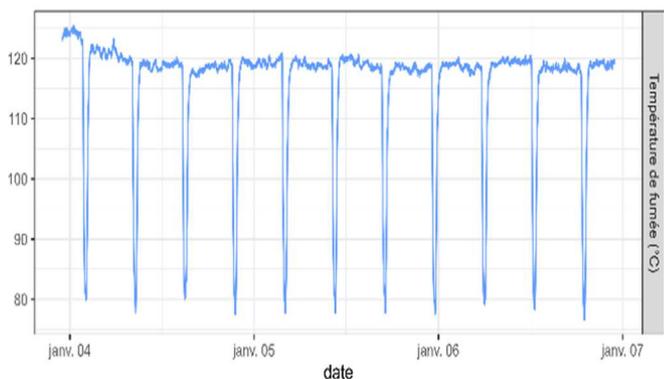
Les paragraphes ci-dessous présentent le résumé des différents enseignements et les recommandations tirées de ce dispositif inédit.

2. Résultats de l'étude

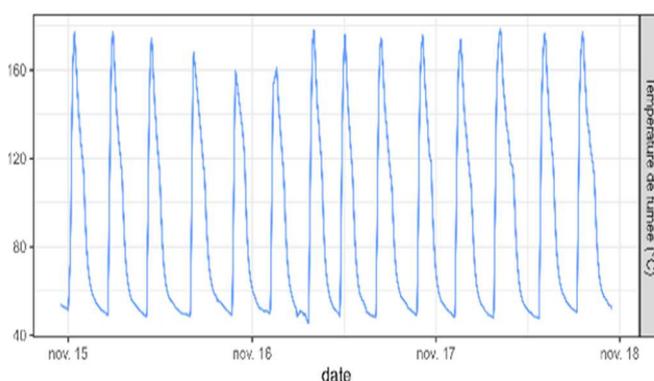
2.1. Fonctionnement des chaudières

D'une manière générale, les chaudières présentent des cycles de fonctionnement plus ou moins variables et dynamiques alternant entre 3 principaux régimes : « démarrage/montée en charge », « charge nominale », « arrêt/baisse de charge ». Les mesures de la température des fumées permettent l'analyse des cycles de chauffe des chaudières. Ces cycles sont différents suivant les chaudières et peuvent l'être pour une même chaudière en fonction de la période à laquelle les mesures ont été réalisées (cœur de la période hivernale ou début / fin de période de chauffe).

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



Chaudière 250 kW - Granulés



Chaudière 110 kW - PFA

Illustration des cycles de fonctionnement des chaudières par le suivi de la température des fumées, avec à gauche un fonctionnement continu ; à droite un comportement avec des cycles très dynamiques.

La figure de gauche montre une température globalement stable (fonctionnement continu) avec des baisses régulières de température correspondant aux cycles d'évacuation des cendres. A l'inverse le graphique de droite montre des cycles très dynamiques avec une périodicité régulière de montée de la température puis une baisse dès le point le plus chaud atteint.

Ces différentes phases du cycle de combustion influencent la température de fumée qui est plus élevée en phase nominale de chauffe, le taux d'oxygène avec une baisse lors de la combustion, et le débit de fumée. Lors d'une combustion incomplète, notamment en phase de « arrêt/baisse de charge », du monoxyde de carbone (CO) et du méthane (CH₄) se forment au détriment de l'émission de CO₂.

2.2. Réglementation applicable

En Ile-de-France, ces installations de faible puissance sont réglementées par l'arrêté inter-préfectoral du 31 janvier 2018 relatif au Plan de Protection de l'Atmosphère² (PPA). Celui-ci fixe 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'Ile-de-France, hors Paris lorsqu'elles utilisent de la biomasse comme combustible. Cet arrêté inter-préfectoral a également étendu l'application de l'arrêté du 2 octobre 2009, relatif au contrôle des chaudières, à celles de moins de 400 kW. Par ailleurs, l'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).

Le nouvel arrêté relatif au Plan de Protection de l'Atmosphère francilien entré en vigueur en janvier 2025 confirme ces obligations³ (représenté par une ligne rouge dans les graphiques de concentrations pour chaque polluant). Les graphiques font également référence, à titre d'information, au règlement sur l'écoconception⁴ (représenté par une ligne rouge pointillée dans

² 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'Ile-de-France

³ 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'Ile-de-France

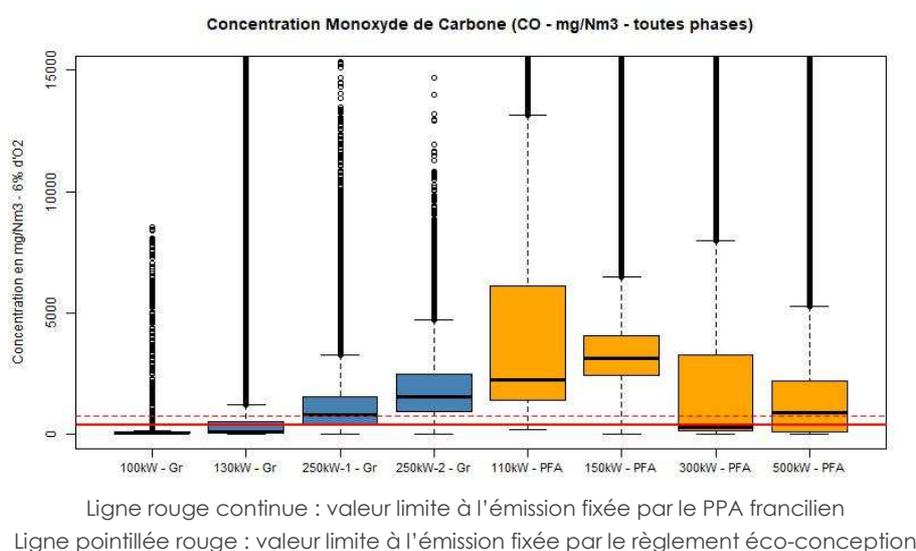
⁴ Règlement 2015/1189 de la commission du 28 avril 2015 portant application de la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les exigences d'écoconception applicables aux chaudières à combustible solide

les graphiques de concentrations pour chaque polluant), non applicable directement aux chaudières instrumentées, celui-ci étant entré en vigueur ultérieurement à leur mise en service.

2.3. Concentrations de polluants

2.3.1. Concentrations de monoxyde de carbone

Les résultats des mesures à l'émission de monoxyde de carbone (CO) montrent pour les chaudières à granulés ainsi que celles à PFA **des dépassements récurrents, voire pour certaines chaudières quasiment systématiques, de la valeur limite à l'émission** fixée (375 mg/Nm³) par l'article 17 de l'arrêté inter-préfectoral du 9 janvier 2025 relatif au Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) francilien.



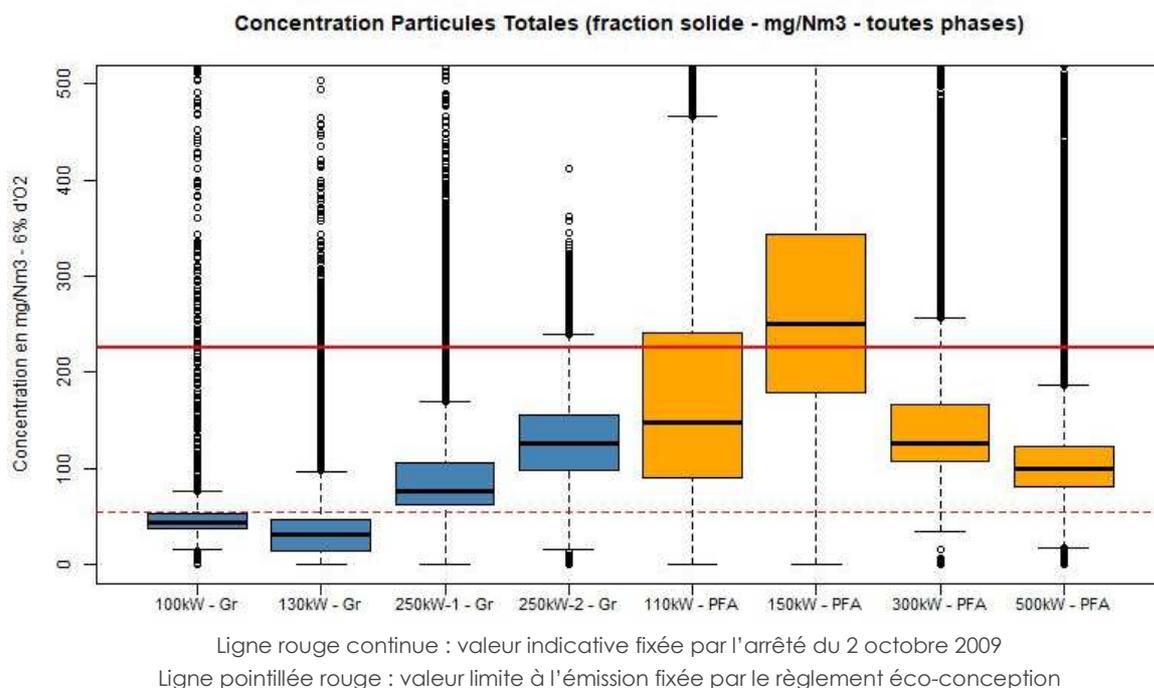
Concentrations de monoxyde de carbone au niveau des huit chaudières (chaudière à granulés en bleu ; chaudière à PFA en orange)

2.3.2. Concentrations particulaires

Concentrations en particules totales

Les résultats des mesures à l'émission des particules totales montrent que les chaudières à granulés ainsi que celles à PFA avec les plus grosses puissances présentent des dépassements très ponctuels du seuil indicatif de l'arrêté du 2 octobre 2009 (225 mg/Nm³ à 6% d'O₂), applicable en Ile-de-France pour les chaudières de moins de 400 kW (selon l'article 11 de l'arrêté inter-préfectoral du 9 janvier 2025 relatif au Plan de Protection de l'Atmosphère francilien) lors des phases transitoires de chauffe, principalement lors de la phase « d'arrêt/baisse de charge ».

Les chaudières à PFA de plus petites puissances présentent au contraire des dépassements de cette valeur indicative de manière plus récurrente, 30% à 60% du temps.



Distribution des concentrations de particules totales pour les huit chaudières (chaudière à granulés en bleu ; chaudière à PFA en orange)

Les principaux facteurs d'influence des concentrations de particules sont l'excès d'air (un apport d'air trop important entraîne une combustion incomplète liée à la baisse de température du foyer), et la **qualité du combustible à travers la quantité de minéraux contenus dans le combustible et son taux d'humidité** (la présence de sodium et de potassium dans le combustible favorise l'augmentation des concentrations de particules tout comme un combustible très humide).

Contribution des particules condensables aux concentrations de particules mesurées

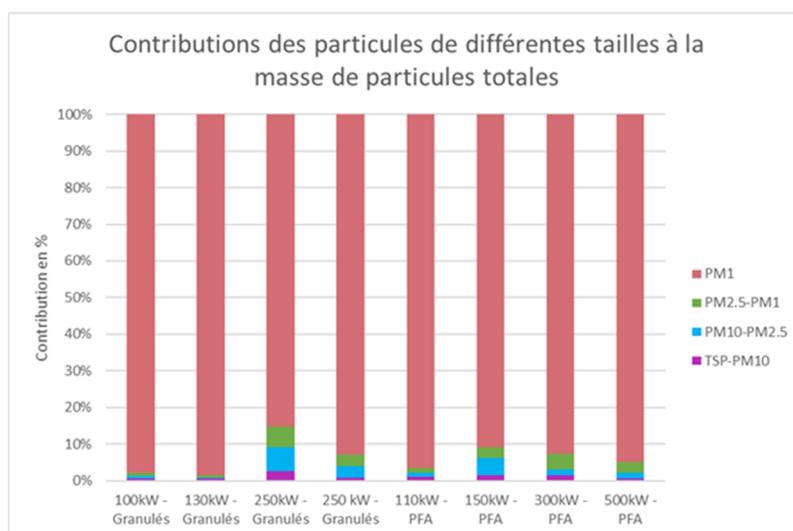
Des mesures ponctuelles de quelques heures effectuées par l'INERIS sur 3 chaudières ont permis de montrer que **10 % à 16 % des particules totales sont des particules condensables, c'est-à-dire des particules qui se forment à la sortie de la cheminée à partir d'émissions gazeuses**. Ces contributions sont nettement plus faibles que celles des particules condensables dans les émissions du chauffage individuel au bois (41 % pour les appareils respectant la directive écoconception et 75 % pour les appareils anciens à bûches et foyers ouverts). A contrario, les chaudières de puissance supérieure à celles instrumentées et équipée de systèmes de dépollution produisent de très faibles quantités de particules condensables⁵, la qualité de la combustion étant meilleure dans ces installations. Les mesures à l'émissions montrent que la part de particules condensables est plus importante lorsque les conditions de combustion se dégradent (corrélation entre les teneurs de CO, indicateur de mauvaises conditions de combustion, et la part de particules condensables).

Contribution des particules à la masse totale en fonction de leur taille

Des mesures ponctuelles par gravimétrie de la masse de particules selon leur taille ont été réalisées pour chacune des chaudières instrumentées. Les résultats montrent, comme illustré dans la figure ci-dessous, que la contribution des particules PM₁ à la masse totale des particules est comprise entre

⁵ Emissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieures à 1 MW - Campagnes de mesures sur site et proposition d'évolution des facteurs d'émissions – Projet ACIBIOCA – ADEME – Mai 2023

85 % à 99 % selon les chaudières. Cette contribution très importante des PM₁ à la masse totale des particules se retrouve aussi bien pour l'utilisation de granulés que de PFA.



Contribution des particules de différentes tailles à la masse de particules totales

Profil granulométrique des particules (en nombre)

De mesures ponctuelles du nombre de particules en fonction de leur taille ont également été réalisées pour chaque chaudière, permettant le classement des particules en nombre selon 12 classes de taille comprises entre 9 nanomètres et 7,6 micromètres.

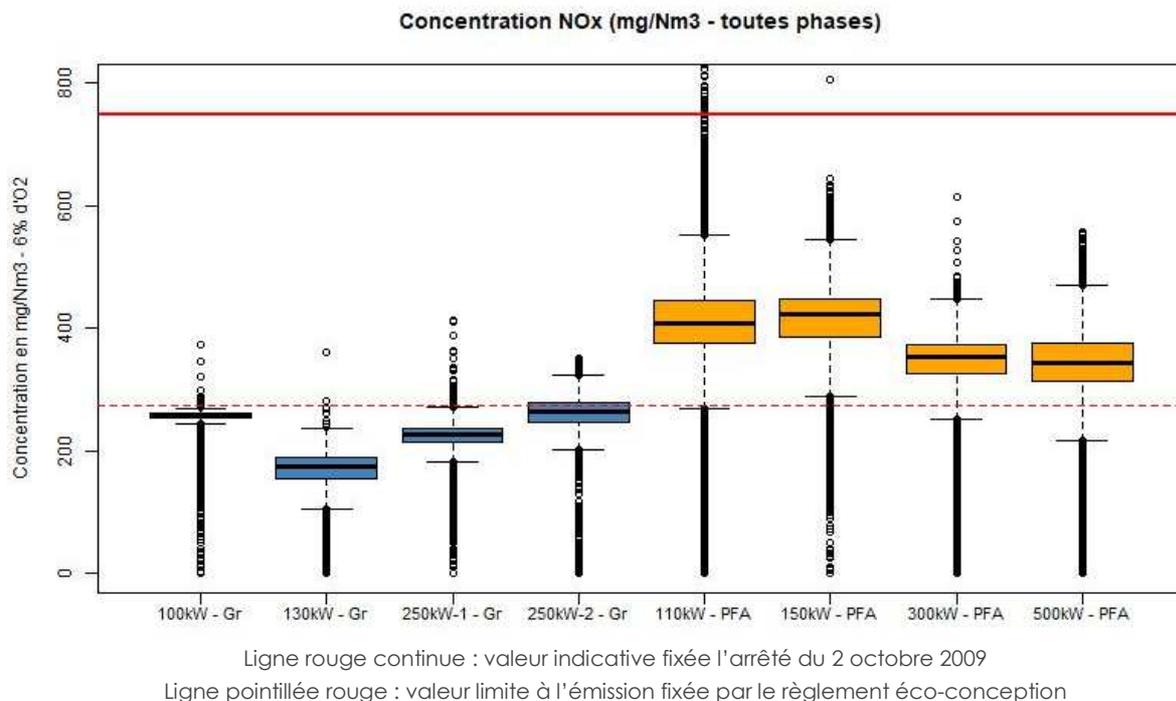
La contribution des particules ultrafines (< à 100 nanomètres) est comprise entre 86 % et 91 % hormis pour une chaudière dont le nombre de particules est plus faible (contribution des particules ultrafines estimée à 72 %).

Le mode majeur, correspondant à la taille pour laquelle il y a le plus grand nombre de particules, est compris entre 28 et 50 nm, hormis pour 1 chaudière, dont le nombre de particules est plus faible, avec un mode majeur compris entre 50 et 100 nm.

Ces résultats montrent des tailles de particules à l'émission inférieures à celles des résultats de mesure de concentration 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 l'influence des phénomènes de coagulation, de condensation et d'accumulation dans l'augmentation de la taille des particules après leur émission.

2.3.3. Concentrations d'oxydes d'azote

Les concentrations d'oxydes d'azote des différentes chaudières présentent une grande variabilité. Les chaudières utilisant les granulés présentent des concentrations inférieures à la valeur indicative de 750 mg/Nm³ (6% d'O₂) définie dans l'arrêté du 2 octobre 2009. Celles des chaudières PFA sont également la très grande majeure partie du temps en dessous de cette valeur.



Distribution des concentrations de NOx pour les huit chaudières (chaudière à granulés en bleu ; chaudière à PFA en orange)

Les principaux facteurs d'influence des concentrations d'oxydes d'azote sont le **type de combustible** (les chaudières utilisant les PFA comme combustible engendrent des concentrations plus élevées de NOx que celles à granulés) **et sa composition** (un taux d'azote plus élevé dans les PFA engendre des concentrations de NOx plus élevées), **la puissance de la chaudière** (les chaudières de petites puissances observent des concentrations de NOx plus importantes), **l'excès d'air** (un excès d'air très important refroidit l'air dans le foyer, limitant la formation de NOx).

2.4. Facteurs d'émissions

Ces mesures ont permis de calculer les **facteurs d'émissions en g/GJ d'énergie produite par la combustion du bois**, permettant de les comparer aux facteurs d'émissions, utilisés dans les inventaires d'émissions nationaux et régionaux, publiés dans le guide OMINEA⁶ du CITEPA⁷. En l'absence d'information sur la quantité de bois consommée en temps réel par les chaudières, la quantité d'énergie produite a été estimée à partir des concentrations de dioxyde de carbone.

Les facteurs d'émissions de la fraction solide des particules totales, d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone sont plus élevés et plus variables pour les chaudières PFA que pour les chaudières à granulés.

Les facteurs d'émissions de la fraction solide des particules totales des chaudières à granulés et chaudières à PFA les plus puissantes sont inférieurs aux valeurs utilisées dans les inventaires (OMINEA : 64 g/GJ pour les chaudières < 20 MW). En revanche les facteurs d'émission sont supérieurs pour les chaudières PFA de petites puissances.

⁶ La méthode de calcul de chaque secteur de l'inventaire national et les facteurs d'émissions associés sont publiés sous forme de rapport et de base de données (« OMINEA ») pour Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France).

⁷ CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

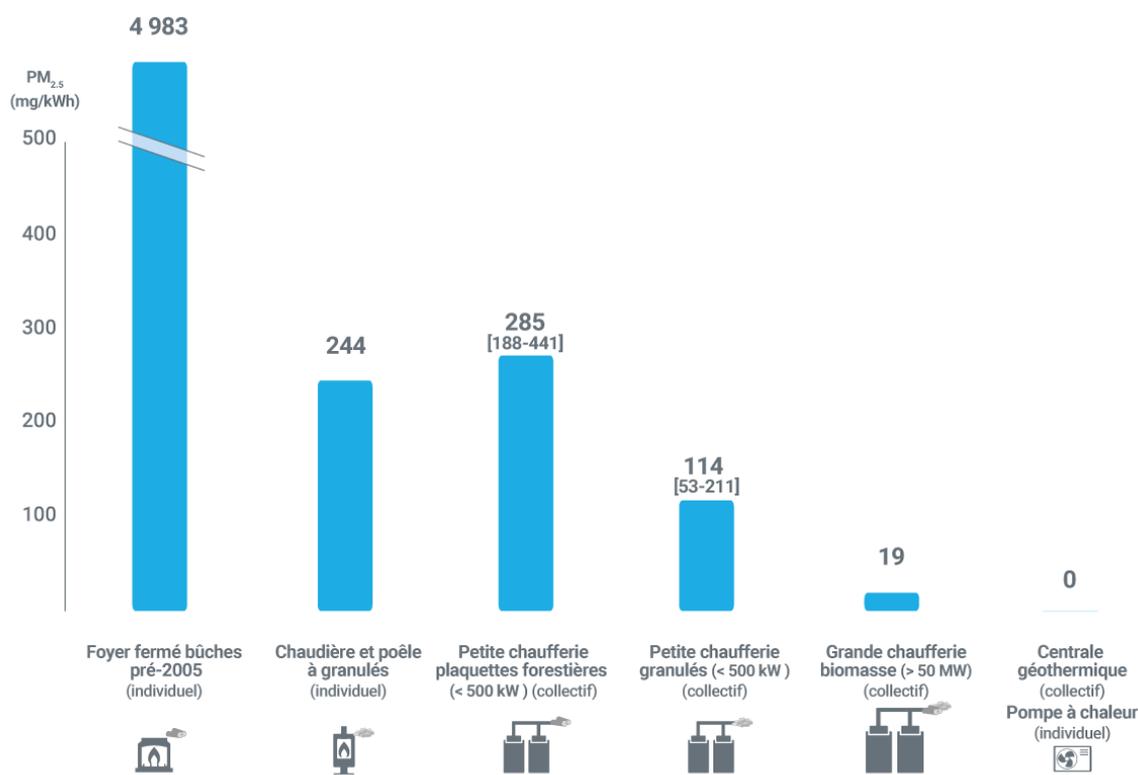
Pour les oxydes d'azote, les facteurs d'émissions des chaudières à granulés sont inférieurs au facteur d'émission OMINEA (125 g/GJ pour les chaudières de moins de 20 MW). Ceux des chaudières PFA sont en revanche supérieurs à celui utilisé dans les inventaires.

Les facteurs d'émissions moyens pour le monoxyde de carbone, obtenus grâce aux mesures en conditions réelles d'exploitation, sont très supérieurs au facteur d'émission OMINEA actuellement utilisé dans les inventaires d'émission (275 g/GJ pour les chaudières de moins de 20 MW). Il est probable que des chaudières de puissance plus importante que celles instrumentées présentent des facteurs d'émissions plus faibles liés à une meilleure combustion.

Les facteurs d'émissions ont également été calculés par mg/kWh d'énergie finale en sortie de chaudière pour permettre des comparaisons à d'autres systèmes de chauffage en prenant en compte le rendement des équipements.

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)



Comparaison des facteurs d'émissions (énergie utile) de PM_{2,5} de différents moyens de chauffage

Les facteurs d'émissions moyens (ramenés à l'énergie utile) en PM_{2,5} des chaudières de petite puissance (< 500 kW) utilisant des PFA sont plus de deux fois supérieurs à ceux déterminés pour les chaudières à granulés de même puissance. A chaleur fournie identique, les émissions des chaudières instrumentées sont de 2 à 40 fois inférieures que celles des équipements individuels utilisant de la biomasse, mais sont très largement supérieures à celles des équipements individuels utilisant d'autres énergies (fioul, gaz, électricité). Les facteurs d'émissions sont également très supérieurs à ceux des chaufferies de plus grosse puissance (>20 MW). Les petites chaufferies biomasse alimentées aux granulés émettent en moyenne 6 fois plus de particules fines (PM_{2,5}) que des chaufferies biomasse de grande puissance (> 50 MW), et en moyenne 15 fois plus quand elles sont alimentées aux plaquettes forestières.

Comparées à des chaudières ou poêles à granulés individuels (qui sont les moyens de chauffage individuels au bois les moins polluants), les petites chaufferies biomasse évaluées émettent nettement moins (-53%) de particules fines lorsqu'elles utilisent des granulés, mais a contrario plus (+17%) lorsqu'elles sont alimentées aux plaquettes forestières.

Les facteurs d'émissions moyens (ramenés à l'énergie utile) en NOx des chaudières à granulés instrumentées dans l'étude sont comparables à ceux du chauffage individuel utilisant des poêles à granulés et des foyers fermés à bûches pré-2005, ainsi qu'au facteur d'émissions d'une chaudière à gaz individuelle classique. En revanche, les facteurs d'émissions moyens en NOx des chaudières à PFA sont supérieurs à l'ensemble des équipements individuels, hors foyers ouverts à bûches. Le facteur d'émission des chaudières de plus forte puissance est plus élevé que celui des petites chaudières à granulés, du fait d'une combustion à des températures plus élevées qui favorise l'émission de NOx dits thermiques, c'est-à-dire produits par l'oxydation de l'azote de l'air dans la chambre de combustion. Toutefois, pour les petites chaudières à PFA instrumentées dans l'étude, ce facteur d'émission reste légèrement supérieur à celui des installations de plus forte puissance.

3. Recommandations

Cette étude montre 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. 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'émissions nationaux et valorisées au niveau européen en lien avec l'Ineris et l'Ademe.

La combustion du bois émet également du dioxyde de carbone, et du méthane, autre gaz à effet de serre, lors de mauvaises conditions de combustion. Il est souvent considéré que le dioxyde de carbone émis par la combustion 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 processus 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.