

Emissions de chaudières biomasse de faible puissance

Sept.
2025



Campagnes de mesure en
conditions réelles d'exploitation

Contexte

Les chaudières biomasses de faible puissance (50 à 400 kW) sont considérées comme des systèmes de chauffage à énergies renouvelables présentant de hautes performances énergétiques et environnementales d'après les tests menés en laboratoire selon les protocoles normatifs.

La combustion de la biomasse dans ce type de chaudière est appelée à se développer. Ces installations présentent un certain nombre de bénéfices environnementaux et socio-économiques (énergie renouvelable et peu onéreuse, utilisation de ressources locales, enjeux climatiques, visibilité des coûts de production de chaleur, création d'emplois locaux, etc.) mais peuvent être à l'origine d'émissions polluantes qui impactent localement la qualité de l'air. Pourtant les chaudières de puissance inférieure à 400 kW ne font l'objet d'aucune surveillance réglementaire en matière de rejets atmosphériques et ne peuvent pas être testées sur banc d'essai en conditions réelles d'exploitation.

Les performances réelles de ces chaudières ainsi que la composition chimique de leurs émissions à l'atmosphère restent encore mal connues. Peu de données sont disponibles dans la littérature scientifique, car les campagnes d'essais *in situ* sont coûteuses et techniquement complexes à mettre en œuvre.

Le présent projet de recherche, CAPCHA (Caractérisation des polluants émis par des chaudières biomasses de faible puissance), s'inscrit dans un programme d'étude plus vaste comprenant :

- Un volet principal piloté par Airparif, visant à caractériser les émissions de huit chaudières biomasse ;
- Et un volet piloté par l'Ineris, dédié notamment à l'étude des émissions de la fraction condensable de ces mêmes chaudières.

L'objectif de CAPCHA, projet piloté par l'Ineris et cofinancé par l'Anses et l'ADEME, est de mieux connaître les émissions de ces chaudières en conditions réelles de fonctionnement. Des campagnes de mesures spécifiques ont notamment permis de réaliser des caractérisations poussées. Les résultats ont été analysés au regard de ceux des autres volets du programme. Ainsi, des mesures périodiques ont été réalisées en Île-de-France, sur trois installations de faible puissance (130, 150 et 250 kW) mises en service entre 2013 et 2018 et alimentées en granulés ou en plaquettes. L'étude met notamment l'accent sur de nouveaux polluants ou métriques d'intérêt (carbone suie, monosaccharides, acides organiques, sels inorganiques, potentiel oxydant notamment), afin de mieux caractériser la composition chimique des particules émises. Des facteurs d'émission en polluants ont ainsi été établis et comparés aux données de la littérature scientifique.

Ces nouvelles données enrichissent les connaissances existantes et favorisent une meilleure compréhension des impacts de ces installations, en particulier en milieu urbain, et contribuent également à l'élaboration de mesures visant à réduire leur impact sur la qualité de l'air et la santé publique. Elles permettent d'affiner les préconisations d'optimisation du fonctionnement de ces installations, d'évaluer la pertinence d'équiper ces installations de systèmes de filtration ainsi que de fixer des seuils d'émissions dans le cadre de plans de protection de l'atmosphère (PPA) ou d'aides financières telles que le Fonds chaleur.

1. Méthodologie

Dans le but de mieux évaluer l'impact de la période de réalisation des essais au regard de la saison de chauffe, trois campagnes s'étendant sur une période de trois à quatre jours par chaudière ont été conduites en novembre 2023, janvier et mars 2024. Chaque campagne d'essais inclue le déplacement sur site, l'installation du matériel, la réalisation des essais et le démontage du matériel installé.

Dans la suite du document, les chaudières, dont les caractéristiques et le mode de fonctionnement sont résumés dans le Tableau 1, seront désignées de la manière suivante : CAP A, CAG B et CAG C.

Parmi les chaudières sélectionnées, la chaudière à granulés CAG B, initialement prévue pour être caractérisée au cours des trois campagnes, a été mise en arrêt de longue durée peu avant la date prévue pour la deuxième campagne (janvier 2024) en raison d'une panne du système d'alimentation en combustible. Elle n'a donc pas pu être testée lors de cette campagne, ni lors de la suivante. Une chaudière à granulés CAG C de remplacement a ainsi été sélectionnée afin de mener les essais prévus lors de la troisième campagne de mars 2024.

Lors de chaque campagne d'essais :

- Les combustibles (bois déchiquetés/plaquettes et granulés) consommés par les chaudières ont été caractérisés afin de pouvoir examiner la composition des émissions en regard de celle des combustibles,
- Cinq prélèvements ont été effectués pour chaque polluant, soit un total de 25 prélèvements/analyses. Un blanc de site¹ a été réalisé lors de chaque campagne.

Chaudière	CAP A	CAG B	CAG C
Combustible	Plaquettes	Granulés	Granulés
Année de mise en service	2017	2018	2013
Puissance nominale (kW)	150	130	250
Puissance de fonctionnement lors des essais ou facteur de charge	Nominale	≈ 60 % du nominal	Nominale
Marche lors des essais	Continue	Intermittente (selon cycle marche/arrêt de 2h environ)	Continue

Tableau 1 : principales caractéristiques des chaudières testées.

Une caractérisation poussée des émissions polluantes a ensuite été réalisée, comprenant notamment des mesurages de composés organiques volatils totaux (COVT), ainsi que des mesurages permettant de caractériser la composition des particules (après dilution et donc comprenant les fractions solide et condensable) tels que :

- Les particules non volatiles à 50°C, mesure en masse en continu en temps réel ;
- L'équivalent Black Carbon (noté eBC), mesure en semi-continu en temps réel ;
- Le carbone élémentaire (EC) et organique (OC) ;
- Le potentiel oxydant (PO) ;
- Les métaux ;
- Les acides organiques ;
- Les sucres ou monosaccharides (lévoglucosan, mannosan et galactosan) ;
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ;
- Les ions inorganiques.

Les résultats d'analyse des différentes fractions constituant les particules (EC, OC, ions inorganiques, métaux et éléments minéraux) ont été comparés aux particules totales afin d'établir leur bilan massique et leur composition chimique.

¹ Un blanc de site est un échantillon témoin que l'on apporte et manipule sur le lieu de mesure, sans qu'il serve à collecter les polluants. Son rôle est de vérifier que les résultats ne sont pas faussés par une pollution extérieure ou par le matériel utilisé.

2. Résultats et discussion

L'impact de nombreux paramètres sur les émissions de polluants a été examiné et les résultats sont détaillés dans le rapport du projet.

2.1. Principaux résultats d'émissions

Le Tableau 2 présente les principaux résultats de chaque campagne d'essais du projet CAPCHA, exprimés en facteur d'émission, en indiquant la moyenne des cinq prélèvements réalisés par campagne.

Chaudière		CAP A	CAP A	CAP A	CAG B	CAG C	FE ACIBIOQA	FE littérature ^a
Campagne		C1	C2	C3	C1	C3	min / max	médian / moyen
Chaudières (puissance nominale et conditions de fonctionnement lors des essais)								
Puissance nominale (kW)		150	150	150	130	250	150 à 1000	150 à 1000
Facteur de charge (%)		100	100	100	60	100	30 à 80	-
Excès d'air (sans unité)		4,6	4,4	4,6	1,9	2,2	-	-
Rendement ^b (%)		71	73	71	92	91	-	-
Facteurs d'émission et indicateurs								
CO	g/GJ	Nv	1300	1136	102	298	171/1227 (4)	125 / 585 (35)
CO ₂	kg/GJ	Nv	96,3	97,5	99,6	99,5	-	-
NO _x	g éq. NO ₂ /GJ	Nv	150	102,3	131,8	83,2	60 / 145 (5)	76 / 83 (49)
COVt	g éq. C/GJ	7,6	2,7	7,7	3,6	< 1,5	5 / 73 (4)	1 / 30 (36) ^c
CH ₄	g/GJ	1,0	0,7	3,6	nv	< 1,5	-	0,1 à 2 (5)
Particules en nombre (PN)	nombre/GJ	Nv	2,9 10 ¹⁶	5,5 10 ¹⁶	nv	3,1 10 ¹⁶	-	1 à 5 10 ¹⁶ ^d 1,3 à 3,6 10 ¹⁶ ^e 1,3 à 2,0 10 ¹⁶ ^f
Diamètre géométrique moyen (GMD)	nm	Nv	262	nv	nv	64	-	60 à 150 ^d 70 à 91 ^e 59 à 96 ^f
Particules solides	g/GJ	71,0	90,5	97,6	25,2	44,4	26 / 140 (5)	65 / 113 (40)
Particules totales	g/GJ	88,2	110,9	113,9	27,2	51,3	31 / 169 (5)	13 à 92 ^d 26 à 41 ^e 14 à 36 ^f
Part de condensables dans les particules totales	%	18,8	18,4	13,3	7,8	13,1	5 / 44, moy. : 20	4,3 ^e
eBC	g/GJ	4,0	7,9	10,9	nv	0,5	-	-
EC	g/GJ	2,6	4,0	5,7	3,5	0,2	0,1 / 2,9 (5)	0,23/0,76 (20)
Lévoglucosan	mg/GJ	6	0	12	147	5	-	-
Benzo (a) pyrène	mg/GJ	0,45	0,27	0,33	0,25	0,03	0,01 / 3,1 (4) - 16,8	-
4 HAP ^g	mg/GJ	1,8	1,5	5,1	1,9	0,2	0,1 / 4,2 (4) - 73	0,3 / 10,7 (5) (8 HAP) ^h
15 HAP	mg/GJ	27 (2)	90	142	18	9	-	-

Les valeurs entre parenthèse indiquent le nombre de données pris en compte.

^a étude bibliographique menée dans le cadre du projet ACIBIOQA (2022)

^b valeur approximative (méthode indirecte)

^c 36 dans la gamme de puissance 0,1-20 MW dont 8 dans la gamme (150-800 kW)

^d Sippula 2010

^e Chandrasekaran et al. 2011 (données issues d'une étude menée par Nyserda 2010)

^f Sippula et al. 2017

^g Protocole de 1998 relatif aux polluants organiques persistants

^h 8 HAP de la norme NF X 43-329

nv : résultat non valide

Tableau 2 : principaux résultats obtenus lors du projet CAPCHA.

Globalement, les valeurs mesurées à l'émission des trois chaudières étudiées dans CAPCHA restent dans les plages rapportées par des travaux antérieurs et par la littérature. Les résultats obtenus mettent en évidence une nette différence entre la chaudière à plaquettes CAP A et les deux chaudières à granulés CAG B et CAG C en ce qui concerne les émissions de polluants. La marche intermittente de la chaudière à granulés CAG B est à l'origine de plus fortes émissions en EC et probablement en HAP (composés précurseurs du carbone suie) que celles observées pour l'autre chaudière à granulés CAG C sans influencer significativement les émissions de particules totales, EC et HAP étant présents en très faibles proportions dans celles-ci.

À titre de comparaison, le projet ACIBIOQA (2022), financé par l'ADEME et réalisé avec la contribution de l'Ineris, s'était concentré sur les chaudières d'une puissance comprise entre 150 et 600 kW fonctionnant avec des plaquettes. Cinq chaudières à plaquettes équipées au minimum d'un cyclone ou d'un électrofiltre avaient été testées. Cette étude avait mis en évidence une forte variabilité des facteurs d'émission en monoxyde de carbone (CO), ce paramètre étant un indicateur clé de la qualité de combustion. Ces variations dépendent principalement du facteur de charge des chaudières et de leurs conditions de fonctionnement, notamment les phases d'arrêt, de redémarrage et de charge réduite. Une exception avait été relevée sur un site utilisant un combustible humide, ce qui a potentiellement altéré la qualité de combustion et accru les émissions de CO. Par ailleurs, les deux chaudières les moins puissantes testées (150 et 200 kW) s'étaient révélées les plus émissives en CO, en composés organiques volatils totaux (COVT) et en particules totales.

Les données issues de la littérature (facteurs d'émission médians et moyens observés), extraites d'une étude bibliographique conduite dans le cadre d'ACIBIOQA, sont également reprises dans le Tableau 2 pour élargir la comparaison.

2.2. Évolution de la fraction solide des particules

La Figure 1 présente l'évolution des teneurs en fraction solide des émissions particulaires totales en fonction des teneurs en potassium et en sodium (K + Na) mesurées dans les combustibles.

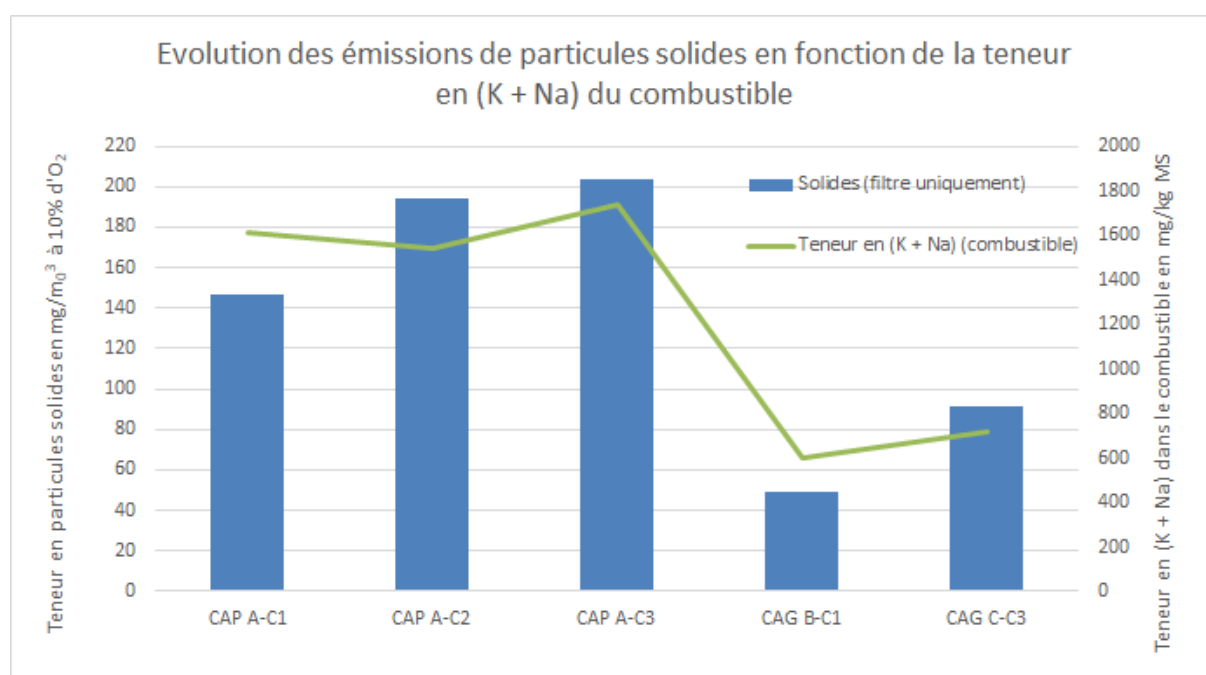


Figure 1 : évolution des teneurs en particules solides en fonction de la somme des teneurs en potassium (K) et sodium (Na) présents dans les combustibles.

La somme des teneurs en potassium et en sodium présents dans les combustibles apparaît comme un facteur explicatif majeur de l'évolution de la teneur en particules solides des fumées. On s'attend donc à ce que les particules émises soient composées très largement de ces éléments.

2.3. Évolution de la fraction condensable des particules

La Figure 2 présente l'évolution des teneurs en fraction condensable des émissions particulaires en fonction des teneurs en CO. Ce polluant est un bon indicateur de la qualité de la combustion : les teneurs en CO augmentent

lorsque la qualité de combustion se dégrade. L'amélioration de la qualité de la combustion conduit à une forte réduction de la fraction condensable, essentiellement constituée de composés organiques semi-volatils.

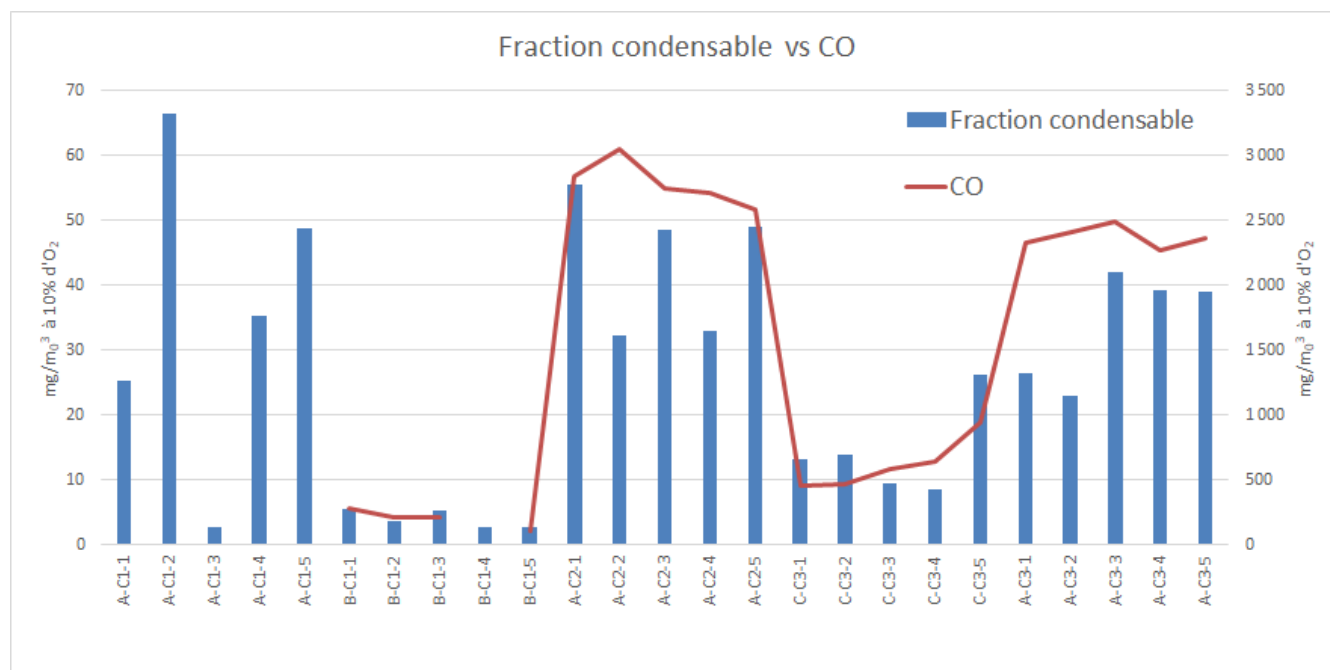


Figure 2 : évolution des teneurs en fraction condensable en fonction des teneurs en CO lors des essais.

Notons que les condensables constituent environ 8 à 13 % des particules totales pour les chaudières à granulés et 13 à 19 % pour la chaudière à plaquettes. Dans le cadre du projet ACIBIOQA (2022), les tests réalisés sur cinq chaudières à plaquettes avaient révélé une part moyenne de condensables de 20 %, avec une fourchette de valeurs allant de 5 à 44 %.

2.4. Bilan massique ou composition chimique des particules

En comparant les différentes fractions qui composent les particules par rapport à la masse totale des particules, leur bilan massique et leur composition chimique peuvent être établis.

Les principales fractions organiques et inorganiques des particules sont les suivantes :

- **Carbone organique (OC)** : cette fraction correspond au carbone présent dans les composés organiques des particules. Elle comprend des espèces comme les HAP, des acides organiques, des sucres (lévoglucosan, etc.) ou des espèces de plus haut poids moléculaire avec un grand nombre de noyaux aromatique (carbone brun, BrC). Elle peut être convertie en matière organique (MO) en appliquant un facteur multiplicatif tenant compte de la présence d'autres atomes dans ces molécules (oxygène, hydrogène, azote, etc.). La matière organique peut également être représentée par la fraction condensable (FC), constituée quasi exclusivement d'espèces organiques et qui, dans le cas présent, permet d'obtenir des résultats plus quantitatifs ;
- **Carbone élémentaire (EC)** : appelé EC quand il est mesuré par une méthode thermique, également appelé carbone suie ou black carbon (BC) quand il est mesuré par une méthode optique ; il résulte d'une combustion incomplète. Contrairement à l'OC, cette fraction de la matière carbonée est peu fonctionnalisée, réfractaire, et absorbante pour la lumière, favorisant le forçage radiatif et le réchauffement climatique (Bond et al., 2013) ;
- **Ions inorganiques** : cette fraction comprend des cations tels que potassium (K^+), sodium (Na^+), et des anions comme sulfates (SO_4^{2-}), chlorures (Cl^-), nitrates (NO_3^-). Ces composés proviennent de l'évaporation et de la recombinaison des éléments présents dans le combustible au cours de la combustion. Ils peuvent se présenter sous différentes formes selon les conditions de combustion et ainsi se répartir entre les gaz de combustion et les cendres ;

- Métaux traces : ils proviennent essentiellement du combustible. Ces métaux peuvent être volatilisés lors de la combustion, puis se condenser et s'agréger aux particules fines ;
- Éléments minéraux : calcium (Ca) et magnésium (Mg) notamment, qui proviennent de la mise en suspension des cendres. Contrairement aux éléments plus volatils, ces métaux restent essentiellement dans les cendres sous foyer (Marcotte et al. 2020). Dans le cas présent, ils ont été exprimés sous forme d'oxydes métalliques (CaO et MgO), correspondant à leur état chimique dominant dans les cendres (Yang et al. 2021 ; Adamczyk et al. 2023) mais ils pourraient être présents sous d'autres formes chimiques dans les gaz de combustion (carbonates et silicates notamment - Meka et al. 2022).

Les résultats de CAPCHA mettent en évidence que la part de la matière carbonée (EC + MO) dans les particules totales émises reste systématiquement inférieure à 30 %. Cela témoigne d'une bonne qualité de combustion, permettant une élimination efficace de ces composés. Ainsi, **les particules émises par les chaudières automatisées sont majoritairement constituées de sels inorganiques**, avec le sulfate de potassium (K_2SO_4) souvent identifié comme la forme dominante (Sippula et al., 2007 ; Boman et al., 2011 ; Chandrasekaran et al. 2011 ; Obaidullah et al. 2012 ; Orasche et al., 2012 ; Czech et al., 2018).

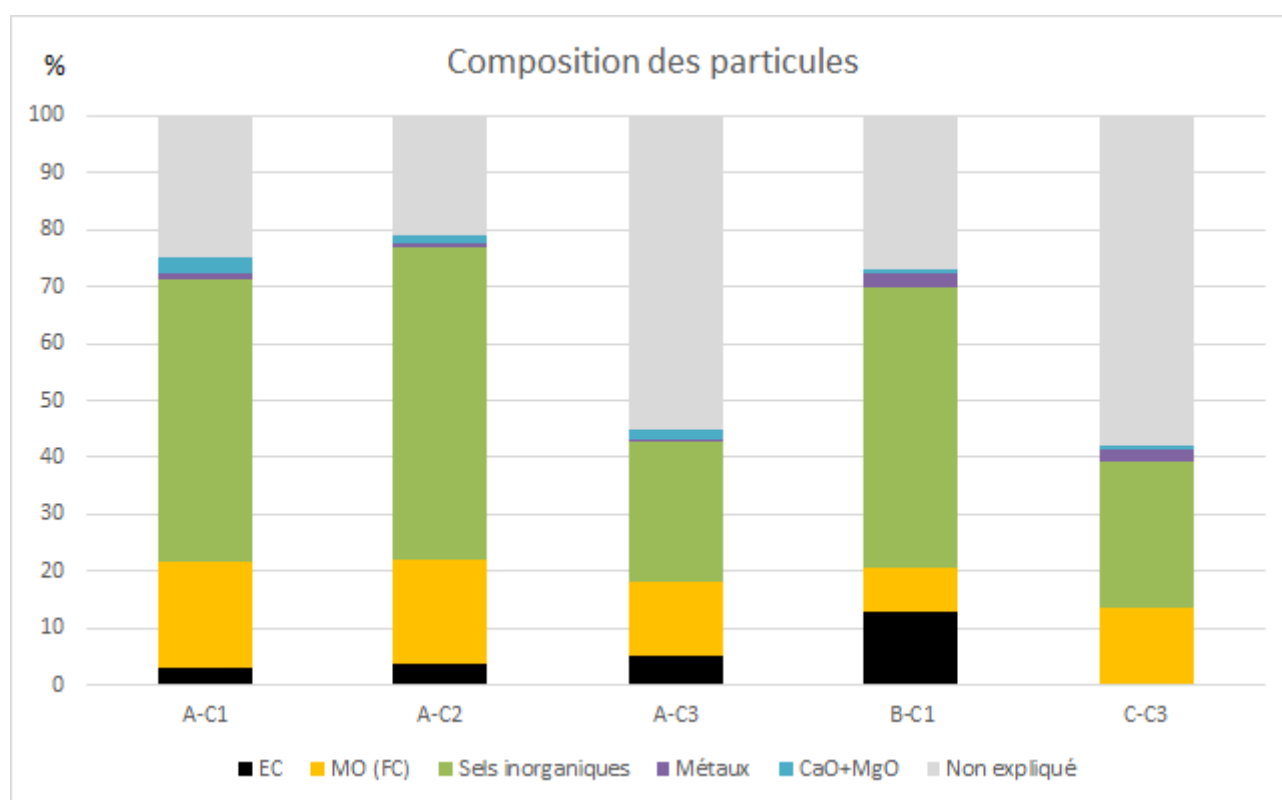


Figure 3 : composition chimique des particules (déterminée à partir des analyses de EC, de la matière organique (MO, estimée à partir de la fraction condensable (FC)), des ions inorganiques, des métaux et d'espèces minérales (Ca et Mg exprimés sous forme d'oxydes).

2.5. Évaluation du potentiel oxydant des particules

L'analyse du potentiel oxydant (PO) des particules a été réalisée. Cet indicateur évalue la capacité des particules à induire un stress oxydatif dans l'organisme, un paramètre que la nouvelle directive européenne sur la qualité de l'air (2024/2884) recommande désormais de suivre dans l'air ambiant. Pour cette analyse, les particules atmosphériques d'un échantillon sont mises en contact avec un fluide pulmonaire reconstitué, et la vitesse de consommation d'une quantité définie d'antioxydants pulmonaires est mesurée. À ce jour, très peu de données de référence existent concernant ce type de mesures appliquées directement aux émissions.

Les mesures effectuées dans le projet CAPCHA et présentées dans le rapport final, constituent donc, à notre connaissance, la première évaluation du potentiel oxydant de particules collectées sur filtres à l'émission de chaudières biomasse de faible puissance. Aucune donnée comparable n'a été identifiée dans la littérature scientifique. En revanche, des mesures de potentiel oxydant à l'émission avaient été réalisées sur des appareils de chauffage domestique dans le cadre du projet Sotox² coordonné par l'Ineris, fournissant ainsi quelques éléments de comparaison utiles.

Ainsi, une différence marquée de sensibilité au test utilisant pour antioxydant l'acide ascorbique (AA) entre les appareils de chauffage domestique (Sotox) et les chaudières du projet CAPCHA a été mise en évidence.

Les dispositifs domestiques présentent en effet des niveaux de potentiel oxydant mesurés par le test AA nettement plus élevés que ceux obtenus par le test utilisant pour antioxydant le dithiothréitol (DTT). Ces résultats contrastent fortement avec ceux observés pour les chaudières du présent projet, où cette tendance est inversée. Les niveaux de PO-AA mesurés sur les chaudières sont environ trente à quarante fois inférieurs à ceux des équipements domestiques, tandis que les niveaux de DTT sont du même ordre de grandeur (hors allure réduite).

Cette étude préliminaire ouvre la voie à une meilleure compréhension de la nocivité potentielle des particules en fonction du type d'équipement et des conditions de combustion

3. Conclusion et recommandations

L'objectif de cette étude était de mieux caractériser les émissions polluantes des chaudières biomasse de faible puissance en conditions réelles de fonctionnement, et en particulier d'analyser la composition chimique de la phase particulaire. Des campagnes de mesure ont été réalisées sur deux chaudières à granulés et une chaudière à plaquettes.

Les résultats obtenus au cours des différentes campagnes ont été analysés afin d'évaluer les émissions de polluants peu étudiés et indicateurs d'intérêt :

- Comparaison des résultats d'émissions particulières obtenus avec différentes méthodes de prélèvement (évolution des parts solides et condensables, bilan massique) ;
- Mesurage de polluants spécifiques (monosaccharides, acides organiques, HAP, carbone suie, métaux, etc.) ;
- Évaluation du potentiel oxydant des particules.

Les résultats ont aussi été analysés afin d'étudier les corrélations entre certains paramètres et les émissions. Les différentes corrélations obtenues pourraient servir, en première approximation à estimer les niveaux d'émission en particules solides et condensables des chaudières, en s'appuyant sur des paramètres aisément mesurables (teneurs en potassium et sodium dans le combustible, teneurs en monoxyde de carbone à l'émission). Toutefois, ces corrélations doivent être interprétées avec prudence en raison du nombre limité d'essais réalisés et de chaudières étudiées dans ce projet.

Concernant l'excès d'air, les chaudières à granulés affichent des valeurs conformes aux attentes pour ce type d'installation. En revanche, la chaudière à plaquettes présente un excès d'air, de l'ordre de 4,5, trop élevé pour obtenir une combustion optimale. Cela entraîne un rendement particulièrement faible (72 %), ainsi que de fortes émissions de monoxyde de carbone (CO) et de composés organiques condensables.

Lorsque la combustion est bien maîtrisée, grâce à un apport en air suffisant mais pas trop fort et à une température de chambre élevée, la teneur en matière carbonée des particules solides diminue. Par ailleurs, le fonctionnement en continu du système de combustion permet aisément de maintenir un rapport air/combustible constant, ce qui contribue à garantir une combustion efficace et de meilleure qualité.

² <https://www.ineris.fr/fr/resultats-preliminaires-projet-sotox-comparaison-comprehension-toxicite-sources-majeures>

Pour les trois chaudières, les particules émises se composent d'une fraction solide et d'une fraction condensable, principalement constituée de composés organiques semi-volatils. La fraction condensable représente environ 10 % des particules totales pour les chaudières à granulés et 17 % pour la chaudière à plaquettes. Ces valeurs sont comparables à celles de la littérature. Les essais ont montré que la fraction solide est largement influencée par les teneurs en potassium et sodium présents dans le combustible, tandis que la fraction condensable évolue en fonction des teneurs en CO, indicateur de la qualité de la combustion.

Il a été mis en évidence que les particules sont majoritairement composées de sels inorganiques issus de la volatilisation des éléments inorganiques du combustible, notamment le potassium. Les particules totales sont constituées de moins de 30 % de matière carbonée (carbone suie et composés organiques). Elles contiennent également des métaux issus du combustible, libérés lors de la combustion (moins de 3 % des particules totales), ainsi que des cendres envolées du fait d'une trop forte turbulence au niveau du lit de combustible.

Le lévoglucosan, marqueur d'une combustion incomplète du bois à basse température (Champrobois 2014), est très peu émis par ces installations, sauf en quantité minime lors du fonctionnement en mode marche/arrêt. Cette faible émission s'explique par les températures élevées et la combustion plus complète dans ces chaudières, qui conduit à la dégradation du lévoglucosan. Le mode de fonctionnement marche/arrêt entraîne également une augmentation des émissions de carbone suie (BC).

Les résultats des mesures du potentiel oxydant suggèrent que les particules émises par ces chaudières de faible puissance présentent *in fine* un pouvoir oxydant inférieur à celui des particules issues d'appareils de chauffage domestique à bûches mais des investigations complémentaires restent nécessaires pour confirmer et consolider cette interprétation.

Étant donné le nombre restreint de chaudières et de conditions de fonctionnement étudiés, les résultats obtenus mériteraient d'être confirmés par des investigations sur un échantillon plus large d'installations, incluant des puissances plus variées (notamment en faible charge) et une plus grande diversité de combustibles.

Les résultats de cette étude ont été utilisés pour élaborer des recommandations qui confortent et complètent celles du projet ACIBIOQA, en vue d'optimiser les performances énergétiques et environnementales de ces installations en conditions réelles d'exploitation, telles que :

- Optimiser le dimensionnement des installations ;
- Optimiser la combustion en réduisant l'excès d'air et en utilisant la teneur en monoxyde de carbone comme indicateur de la qualité de combustion ;
- Utiliser un combustible de qualité : certifié, sans écorce et présentant de faibles taux de cendres et de potassium ;
- Surveiller et contrôler les émissions ;
- Adapter les systèmes de traitement des fumées, en tenant compte notamment de la qualité du combustible et de la nature des particules émises ;
- Sensibiliser et accompagner les exploitants et installateurs.

4. Bibliographie

ACIBIOQA (2022). Florence Paulus Inddigo, Marine Fichau Inddigo, Gaetan Remond Inddigo, Benjamin Cuniasse Citepa, Benjamin Céa Ineris, Isaline Fraboulet Ineris. Émissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW. Campagnes de mesures sur site et proposition d'évolution des facteurs d'émission. Projet ACIBIOQA. Rapport. 68 pages. Ouvrage disponible en ligne : www.librairie.ademe.fr.

Adamczyk J., Smółka-Danielowska D., Krzątała A. Krzykowski T. (2024). Chemical and mineral composition of bottom ash from agri-food biomass produced under low combustion conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology* 21, 4025-4036, <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05255-3>.

Boman C., Pettersson E., Westerholm R., Boström D., Nordin A. (2011). Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 1: Pellet Stoves. *Energy & Fuels* 25, 307-314.

Champrobois (2014). Transformation physico-chimique d'un aérosol de combustion de bois en champ proche de la source. Ouvrage disponible en ligne : <https://librairie.ademe.fr/>.

Chandrasekaran, S.R., Laing, J.R., Holsen, T.M., Raja, S., & Hopke, P.K. (2011). Emission characterization and efficiency measurements of high-efficiency wood boilers. *Energy and Fuels*, 25(11), 5015-5021. <https://doi.org/10.1021/ef2012563>.

Czech H., Miersch T., Orasche J.G., Sippula O., Tissari J., Michalke B., Schnelle-Kreis J., Streibel T., Jokiniemi J., Zimmermann R. (2018). Chemical composition and speciation of particulate organic matter from modern residential small-scale wood combustion appliances *Science of The Total Environment* 612, 636-648, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.263>.

Marcotte S., Castilla C., Morin C., Merlet-Machour N., Carrasco-Cabrera L., Medaerts F., Lavanant H., Afonso C. (2020) Particulate inorganic salts and trace element emissions of a domestic boiler fed with five commercial brands of wood pellets. *Environmental Science and Pollution Research* 27, 18221-18231, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08329-8>.

Meka W., Szuhanski J., Finney K., Gudka B., Jones J., Pourkashanian M., Fennell P.S. (2022). Modeling and Evaluation of Ash-Forming Element Fate and Occurrence in Woody Biomass Combustion in an Entrained-Flow Burner. *ACS Omega* 7(19), 16306-16322, doi: 10.1021/acsomega.1c06445.

Nyserda (2010). Evaluation of the performance and emissions from commercial scale advanced wood combustion systems. Report 13-01.

Obaidullah M., Bram S., Verma V.K., & De Ruyck J. (2012). A Review on Particle Emissions from Small Scale Biomass Combustion. *International Journal of Renewable Energy Research* 2(1).

Orasche J., Seidel T., Hartmann H., Schnelle-Kreis J., Chow J.C., Ruppert H., Zimmermann R. (2012). Comparison of emissions from wood combustion. Part 1: emission factors and characteristics from different small-scale residential heating appliances considering particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-Related toxicological potential of particle-bound organic species. *Energy Fuels* 26, 6695-6704.

Sippula O., Hytönen K., Tissari J., Raunemaa T., Jokiniemi J. (2007). Effect of wood fuel on the emissions from a top-feed pellet stove. *Energy Fuels* 21(2), 1151-60.

Sippula O. 2010. Fine particle formation and emissions in biomass combustion. Report series in aerosol science N:o 108. Thesis.

Sippula O., Lamberg H., Leskinen J., Tissari J., Jokiniemi J. (2017). Emissions and ash behavior in a 500 kW pellet boiler operated with various blends of woody biomass and peat. *Fuels* 202, 144-153.

Yang W., Pudasainee D., Gupta R., Li W., Wang B., Sun L. (2021). An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/ MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors. *Fuel Processing Technology* 213, 106657. doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106657.

RÉSUMÉ

Les chaudières biomasses de faible puissance (50 à 400 kW) sont considérées comme des systèmes de chauffage à énergies renouvelables présentant de hautes performances énergétiques et environnementales d'après les tests menés en laboratoire selon les protocoles normatifs. Cependant, les performances énergétiques réelles et les émissions de polluants atmosphériques de ces chaudières en conditions d'utilisation restent encore peu étudiées.

L'objectif de ce projet est une caractérisation poussée des émissions polluantes de trois chaudières de faible puissance utilisant des granulés ou du bois déchiqueté, mesurées périodiquement en fonctionnement réel. Les résultats ont permis d'évaluer les émissions de nouveaux polluants et métriques d'intérêt, tels que le carbone suie, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les métaux, les sels inorganiques et le potentiel oxydant.

Les particules émises par les chaudières étudiées sont majoritairement composées de sels inorganiques issus de la volatilisation des éléments inorganiques du combustible, ainsi que de matière carbonée (carbone suie et composés organiques) qui représente cependant moins de 30 % des particules totales. Les particules émises contiennent également des métaux issus du combustible, libérés lors de la combustion (moins de 3 % de la masse des particules totales), ainsi que des cendres et des imbrûlés envolés du fait d'une trop forte turbulence au niveau du lit de combustible.

Les facteurs d'émission des différents polluants ont été déterminés et comparés aux données disponibles dans la littérature scientifique.

Les résultats de cette étude permettent d'enrichir les recommandations visant à optimiser les performances énergétiques et environnementales de ces installations en conditions réelles d'exploitation.

Ce document diffusé par l'ADEME a été réalisé à l'initiative de son/ses auteur(s) ; il a reçu un soutien financier de l'ADEME, mais n'engage pas l'ADEME. Son contenu (ou les données qu'il contient) n'engage que la seule responsabilité de son/ses auteurs et ne représente pas la position de l'ADEME

ADEME

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

Numéro de contrat : 23IFD0894

Projet de recherche réalisé par : COLLET Serge, MARFAING Hélène, JOLY Fabrice, GAIE-LEVREL François, UZU Gaëlle, JAFFREZO Jean-Luc et BESOMBES Jean-Luc pour ce projet financé par l'ADEME et par l'ANSES

Coordination technique - ADEME : AUGEVEN-BOUR Isabelle
Direction villes et territoires durables / Service qualité de l'air

CITATION DE CE RAPPORT

COLLET S., Ineris, MARFAING H., Airparif, JOLY F., Airparif, GAIE-LEVREL F., Airparif, UZU G., IGE, JAFFREZO J-L, IGE, BESOMBES J-L, Edytem. 2025. Émissions de chaudières biomasse de faible puissance. Campagnes de mesure en conditions réelles d'exploitation CAPCHA. Synthèse, 10 pages.

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

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives