

Emissions de particules ultrafines du chauffage domestique au bois

Oct.
2025

DOCUMENT
cofinancé par l'ADEME

PERICLES -
Mesures sur un poêle à bûches
et un poêle à granulés

1. Contexte général et objectifs du projet

Les particules fines (dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm pour les $\text{PM}_{2,5}$ et à 1 μm pour les PM_1) et ultrafines ou PUF ($\text{PM}_{0,1}$ – Diamètre inférieur à 0,1 μm), dont les effets sur la santé sont avérés sans pour autant être tous identifiés, sont majoritairement générées par les phénomènes de combustion, dont le chauffage au bois [1] et le transport routier [2]. Le parc existant d'appareils domestiques de chauffage au bois inclut principalement des appareils à bûches et à granulés. Les appareils à bûches constituent la majorité du parc, mais le nombre d'appareils à granulés installés a fortement augmenté ces dernières années. En France, selon les chiffres SECTEN 2024, le secteur « Usage/activités des bâtiments », auquel le chauffage domestique au bois contribue très majoritairement, est à l'origine de 67 % des émissions en masse de $\text{PM}_{2,5}$ et 82 % des émissions en masse de PM_1 [3]. Ces chiffres indiquent que l'importance du chauffage domestique au bois dans les émissions est d'autant plus marquée que la granulométrie considérée est fine. Encore peu étudiées, les PUF peuvent représenter une fraction importante en nombre des particules émises par le chauffage domestique au bois [4], [5]. A l'heure actuelle, les PUF n'apparaissent pas dans les inventaires français d'émissions de polluants réalisés par le Citepa, notamment du fait d'une méconnaissance de leurs facteurs d'émissions (FE) pour les différentes sources.

Les particules ultrafines peuvent notamment être émises par les procédés de combustion ou formées via des mécanismes de condensation de vapeurs organiques. Leur composition est donc principalement carbonée (sous forme organique ou élémentaire), mais peut aussi inclure des sels minéraux. Bien que leur contribution en masse soit négligeable, elles peuvent représenter plus de 90 % du nombre de particules émises par le chauffage domestique au bois [6]. La faible taille de ces particules leur permet de pénétrer jusqu'au fond des alvéoles pulmonaires et de passer dans le sang. Elles peuvent avoir des effets néfastes sur la santé (décès prématurés, troubles cardiaques, inflammations pulmonaires, troubles de la fertilité et du développement fœtal [7], [8], [9], [10]). Il n'existe actuellement pas de valeur limite réglementaire en France et en Europe concernant les PUF, que ce soit en termes de concentration dans l'air ambiant ou d'émission.

Toutefois, la réglementation française impose depuis 2021 que les polluants atmosphériques d'intérêt national, dont les PUF, fassent l'objet d'une surveillance spécifique. Par ailleurs, la nouvelle directive européenne air ambiant 2024/2881 [11] impose aux États membres une obligation de surveillance des PUF dans l'air ambiant. Ces évolutions réglementaires renforcent le besoin de disposer de données fiables sur les émissions de PUF.

Des politiques publiques ont été mises en place pour réduire les émissions de polluants atmosphériques associées au chauffage domestique au bois. Les dispositifs réglementaires et de labellisation existants pour les appareils de chauffage domestique au bois, tels que le règlement européen Ecoconception [12] ou le label Flamme Verte, fixent des exigences sur les émissions massiques de particules totales (TSP : total suspended particles) sans distinction de taille, ainsi que d'autres polluants gazeux tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV). Par ailleurs, les améliorations technologiques des appareils ont permis de réduire les émissions de particules fines en masse, mais leur efficacité vis-à-vis des émissions de PUF reste inexplorée.

Le projet PERICLES a pour objectif d'étudier les émissions de particules ultrafines issues des appareils de chauffage domestique au bois en répondant aux questions suivantes :

- Quelles sont les technologies les plus adaptées pour caractériser les PUF émises par le chauffage domestique au bois ?
- Comment ces PUF sont-elles produites et comment évoluent-elles ?
- Quels sont les impacts des caractéristiques des combustibles bûches et granulés (nature, humidité) et des conditions de combustion sur les émissions de PUF ?
- Quelle est l'influence de la hauteur de prélèvement sur la teneur en PUF des émissions ?

2. Analyse bibliographique

Les études de la littérature sur les émissions de PUF issues du chauffage domestique au bois restent peu nombreuses. De plus, elles ont souvent été conduites dans des conditions expérimentales différentes (technologie des appareils de combustion, essence du bois, taux de dilution dans le protocole de mesure, protocole de combustion, méthodologie de mesure, etc.), rendant délicate toute comparaison des résultats obtenus.

La caractérisation des PUF issues du chauffage domestique au bois requiert, à minima, de caractériser trois grandeurs essentielles, que sont le nombre, la taille, mais également la composition chimique. Toutefois, la plupart des études identifiées sont limitées à la taille et au nombre.

Il existe diverses manières de caractériser les PUF (et également les particules fines) dans les effluents de combustion, mais toutes ont en commun la nécessité de procéder, préalablement à la mesure, à une forme de conditionnement de l'effluent par dilution (à chaud puis à froid). En effet, les techniques de caractérisation des particules fines et ultrafines ont souvent été développées pour la caractérisation de l'air ambiant, et sont peu adaptées aux conditions d'humidité, de température et de concentration de polluants élevées rencontrées dans les matrices de combustion. Le recours à la dilution permet de ramener les conditions de la matrice de combustion à des conditions proches de celles de l'air ambiant. La dilution permet également de limiter et stabiliser les phénomènes de nucléation, de réagencement et condensation de particules, qui peuvent se dérouler au sein de l'échantillon, entre le point de prélèvement dans le conduit et la technique de caractérisation. La dilution en deux étapes, à chaud puis à froid, permet de répondre à ces deux objectifs. Au cours de ces étapes de dilution, le contrôle et le suivi du taux de dilution appliqué sont essentiels à la réalisation d'une caractérisation fiable de l'aérosol.

Les principales techniques utilisables pour caractériser les PUF sont :

L'impaction en cascade (avec ou sans détection électrique) : Elle est basée sur une séparation des particules selon leur inertie, avec mesure en masse par pesée (via un DGI ou un DLPI) ou en nombre par détection électrique (via un ELPI+). Ces techniques permettent de caractériser de manière quantitative la distribution granulométrique en masse des particules et, dans le cas de l'ELPI+, le nombre également, avec une résolution granulométrique relativement faible et une résolution temporelle élevée. Une analyse chimique des particules collectées peut être effectuée après prélèvement donnant accès à leur composition chimique quantitative.

La mobilité électrique : Elle s'appuie sur les propriétés électriques des particules (via un DMS500 ou un SMPS). Le DMS offre un temps de réponse très court (de l'ordre de la seconde), tandis que le SMPS présente une résolution granulométrique supérieure à celle du DMS, mais un temps de réponse de plusieurs minutes.

La microscopie Electronique à Balayage/Transmission (MEB/MET) : Elle permet l'observation des particules prélevées dans le conduit (via un MPS), afin d'analyser leur taille et leur morphologie. Couplée à un analyseur de dispersion des rayons X (EDX), elle fournit des informations qualitatives sur la taille des PUF et sur leur composition élémentaire.

Plusieurs paramètres peuvent influencer les émissions de PUF issues du chauffage domestique au bois. Les principaux paramètres identifiés dans la littérature sont :

Le type de combustible (bûches/granulés) : Les études identifiées sur ce sujet ne ciblent pas nécessairement les PUF. Seules trois études comparent les émissions de PUF issues de combustion de bûches et de granulés (poêles et chaudières datant d'avant 2017), dont seulement deux comparent des poêles entre eux (générations

antérieures à 2012), et ce dans des conditions de tests différentes rendant délicate l'interprétation des résultats. De plus, l'impact de la nature du combustible (granulés/bûches) sur les émissions en nombre de particules et sur la distribution granulométrique est difficilement dissociable de la technologie des appareils. Les résultats montrent que les FE en nombre de particules déterminés sont de l'ordre de 10^{13} à 10^{14} particules.MJ⁻¹. Par ailleurs, les informations sur les distributions granulométriques obtenues indiquent que les PUF sont émises en quantités importantes, indépendamment de la nature du combustible. Les systèmes de combustion de bûches étudiés ont tendance à émettre davantage de PUF en nombre que ceux de combustion de granulés. Les PUF issues des systèmes de combustion de bûches étudiés sont majoritairement organiques, tandis que celles issues des systèmes de combustion de granulés sont majoritairement inorganiques.

L'essence de bois : Les études sur l'effet de l'essence du bois sur les émissions de PUF et sur leur composition chimique restent très limitées (dont une seule identifiée sur des poêles), ce qui rend difficile l'établissement de conclusions robustes. L'essence de bois (bûches ou granulés) peut affecter la composition chimique des PUF. Une étude montre que, pour les granulés, l'essence de bois n'affecte pas les émissions de PUF en nombre et en masse, mais pourrait influencer leur composition chimique. Pour le poêle à bûches étudié, l'essence de bois peut affecter à la fois les émissions en nombre et en masse des PUF ainsi que leur composition chimique. Pour les bûches, c'est un paramètre complexe, car il est difficile de dissocier l'effet propre de l'essence de bois de celui du déroulement de la combustion, les appareils étant généralement optimisés pour un type d'essence donné (principalement des feuillus en France). L'utilisation d'une essence non adaptée peut ainsi dégrader la qualité de la combustion et influencer les émissions de PUF.

L'humidité du combustible : Une seule étude traitant de l'influence de ce paramètre sur les émissions de PUF est identifiée. Les résultats de cette étude montrent qu'une bûche très humide (31 %) dégrade fortement la combustion et les émissions associées, notamment celles de particules en masse, mais n'affecte que très faiblement les PUF en nombre. Ce résultat reste à confirmer.

Génération de l'appareil : Peu d'études se sont intéressées à l'effet des différentes générations de systèmes de chauffage domestique au bois sur les émissions de PUF. Seules trois études réalisées sur des appareils antérieurs à 2012 ont été identifiées. Elles montrent une tendance à l'augmentation de la contribution relative des PUF au nombre total de particules pour les générations les plus récentes antérieures à 2012, mais il reste difficile de conclure sur les nombres absolus émis. Aucune donnée quantitative n'est disponible concernant la composition chimique des PUF émises par ces différentes générations d'appareils. Les autres études existantes ne fournissent pas de données spécifiques aux PUF et ne montrent aucune tendance quant à l'effet de la génération des appareils sur le nombre total de particules émises.

En plus des paramètres précédemment cités, d'autres peuvent affecter les émissions de PUF. Pour une même génération d'appareils, la technologie de l'appareil peut jouer un rôle important dans les émissions de PUF, mais aucune tendance générale quant à l'impact observé n'a été mise en évidence.

Le **régime de fonctionnement** (charge avec débits d'air adaptés) constitue également un paramètre influant les émissions de PUF : la contribution relative en nombre des PUF semble diminuer lorsque le régime de fonctionnement est réduit, bien que cette tendance ne soit pas systématiquement observée dans l'ensemble des études. En outre, un fonctionnement à plein régime induit des émissions de particules en masse plus faibles, mais avec une contribution relative des PUF plus élevée. ²

Ces observations montrent que les données disponibles restent parcellaires, car limitées à un trop faible nombre d'études réalisées dans des conditions différentes ; elles ne permettent pas d'établir des tendances robustes quant aux facteurs d'influence des émissions de PUF issues des poêles à bûches et granulés.

Pour pallier ces manques, il est nécessaire :

- De tester les appareils (anciens vs performants) dans des conditions de combustion comparables et représentatives d'un usage réel des appareils de combustion (prise en compte des phases transitoires, allure réduite etc.), en appliquant des protocoles de mesure et de prélèvement harmonisés ;
- Que les études traitent des caractéristiques physiques et chimiques des PUF ;
- Et qu'elles couvrent une plus grande variété de technologies d'appareils, y compris les technologies les plus récentes.

3. Matériels et méthodes

La métrologie utilisée pour la caractérisation des PUF dans le projet PERICLES combine des mesures de la distribution granulométrique en nombre plutôt qu'en masse, la nécessité de diluer en amont des mesurages, ainsi que des analyses de la morphologie et de la composition chimique des particules émises.

Bancs d'essai et poêles utilisés : Les essais ont été menés sur deux plateformes différentes (Figure 1). Le banc d'essai du LNE, utilisé pour réaliser les tests avec le poêle à granulés, et le banc d'essai des foyers domestiques de l'Ineris, utilisé pour les tests avec le poêle à bûches. Sur les deux installations, le conduit d'évacuation des fumées est thermiquement isolé afin d'éviter tout refroidissement de l'effluent et un ventilateur de tirage assure une dépression adaptée au fonctionnement de l'appareil. Le poêle à granulés testé (LNE) est un appareil neuf (2021) de puissance nominale de 10 kW, tandis que le poêle à bûches (Ineris) est labellisé Flamme Verte 7 étoiles (2017) et présente une puissance nominale de 7 kW.

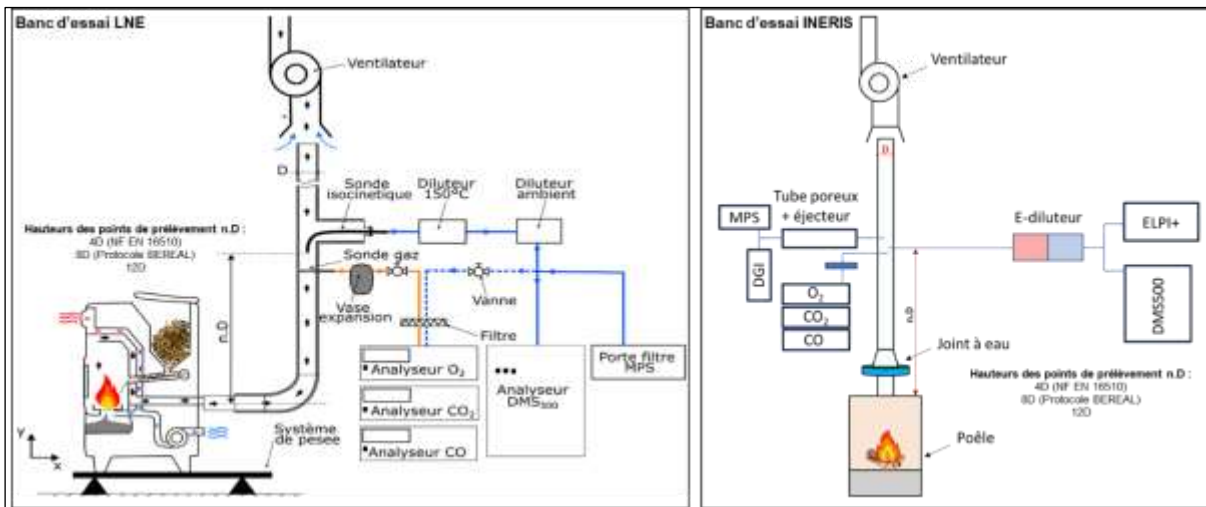


Figure 1 : Représentation schématique du banc d'essai du LNE utilisé pour l'appareil à granulés (à gauche) et du banc d'essai de l'Ineris utilisé pour l'appareil à bûches (à droite)

Hauteurs des points de prélèvement : Afin d'étudier l'évolution des particules dans le conduit, les essais sur les deux bancs ont été réalisés à trois hauteurs de prélèvement différentes sur le conduit d'évacuation des fumées. Ces hauteurs sont notées 4D (conformément à la norme NF EN 16510), 8D (selon le protocole BeReal¹) et 12D, où D correspond au diamètre interne du conduit (80 mm pour le LNE et 150 mm pour l'Ineris). Ces hauteurs sont mesurées en aval du coude sur le banc LNE, et directement en sortie de foyer sur le banc Ineris (Figure 1).

Caractérisation des émissions : Les émissions de gaz de combustion (O₂, CO et CO₂) ont été caractérisées en continu sur les deux bancs. La distribution en taille et en nombre des particules a été mesurée en continu sur les deux installations à l'aide d'un spectromètre de mobilité électrique DMS500 (5 nm–1 µm). Sur le banc Ineris, cette mesure a été complétée par un impacteur électrique basse pression ELPI+ (6 nm–10 µm), permettant une caractérisation granulométrique basée sur le diamètre aérodynamique. Des prélèvements ponctuels d'aérosols ont également été réalisés à l'aide de préleveurs MPS, en vue d'analyses par microscopie électronique (MEB ou MET couplée à l'EDX). Sur le banc de l'Ineris, des prélèvements supplémentaires sur filtres à l'aide d'un impacteur gravimétrique haut débit (DGI) ont été effectués lors de certains essais, puis suivis d'analyses chimiques quantitatives de la composition des particules PM_{0,2} (EC/OC, ions, métaux).

Dilution des effluents : Pour la caractérisation des émissions particulaires, des systèmes de dilution à deux étages ont été mis en œuvre sur les deux bancs, comprenant un premier étage de dilution à chaud suivi d'un étage de dilution à température ambiante. Cette configuration permet de limiter les phénomènes de condensation

¹ BeREal Project, Deliverable 7.1,

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj6wp7t9fmSAXWBaqQEhbweDHQQFnoECBwQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.tfz.bayern.de%2Fmam%2Fcms08%2Ffestbrennstoffe%2Fdateien%2Fd7.1_documentation_and_evaluation_of_field_data_demonstration.pdf&usg=AOvVaw1uWjXURJppSEaBpM80mETv&opi=89978449

et de re-volatilisation des espèces semi-volatiles et de protéger les instruments de mesure. Les taux de dilution ont été vérifiés expérimentalement à partir des mesures de CO₂ effectuées dans l'effluent brut, dans l'air de dilution et dans l'effluent dilué.

Caractérisation des combustibles : Une phase préalable de caractérisation des combustibles a été réalisée avant les essais de combustion. Au total, quinze combustibles ont été analysés : sept types de granulés différents, présents sur le marché national ; huit bûches de hêtre (avec écorce et sans écorce) ; deux bûches densifiées. Les sept types de granulés présentent des caractéristiques similaires, et trois granulés ont été sélectionnés pour la suite de l'étude : le granulé présentant la meilleure qualité (pouvoir calorifique supérieur le plus élevé et teneur en cendres la plus faible) ; le granulé présentant la proportion de feuillus la plus élevée ; le granulé présentant la teneur en carbone la plus faible.

Protocole de combustion : Les protocoles de combustion sont des adaptations du protocole BeReal.

Le protocole d'essais granulés (Figure 2) comprend un allumage à froid (Phase 1a – 100 %), une phase à puissance réduite (Phase 1b – 20 %), un démarrage à chaud (Phase 2 – 100 %) et une phase à puissance intermédiaire (Phase 3 – 60 %).

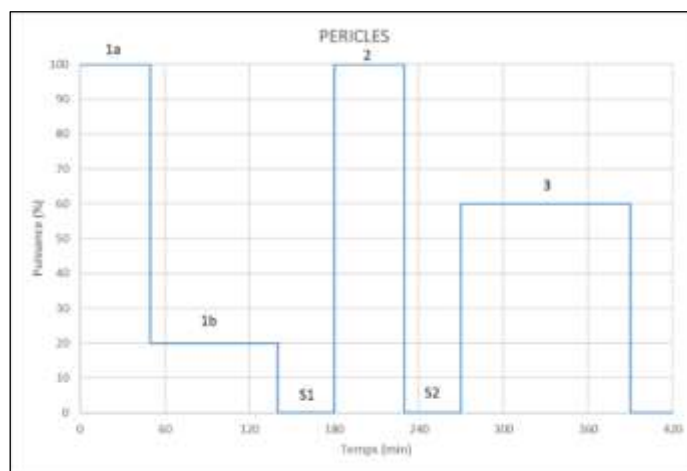


Figure 2 : Protocole BeReal adapté pour l'appareil à granulés

Pour le poêle à bûches, le protocole (Figure 3) inclut une phase d'allumage à froid (3 kg de bois), suivie de plusieurs charges réalisées à allure nominale (1,5 à 2 kg de bois), puis de charges en allure réduite, cette dernière étant obtenue par la réduction des apports d'air pour une même quantité de combustible introduite. Le passage d'un essai à l'autre se fait lorsque le bois est entièrement consommé, qu'il ne reste plus visuellement de flamme dans le foyer, que la teneur en CO₂ atteint maximum 4 %, et qu'une réserve suffisante de braises est atteinte (lit de braises d'environ 3 cm).

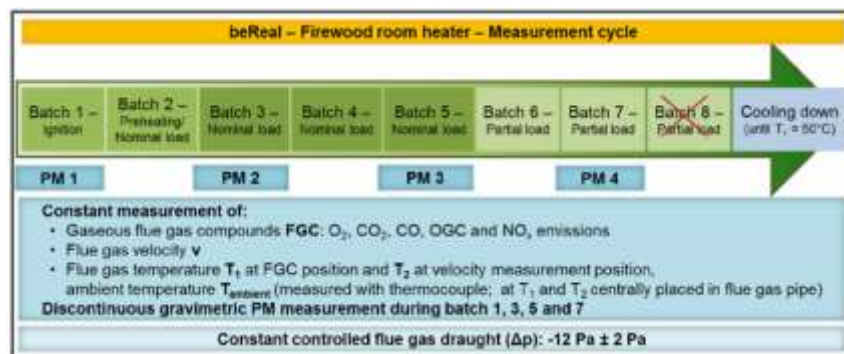


Figure 3 : Protocole BeReal adapté pour les appareils à bûches

Lors des essais réalisés sur les deux plateformes, la vitesse du ventilateur est ajustée manuellement afin de maintenir le tirage à 12 ± 2 Pa. Les essais ont été conduits principalement à la hauteur 8D, pour laquelle quatre types de bûches et trois types de bois granulés ont été étudiés, avec trois jours de répétition par type de combustible. Les hauteurs 4D et 12D ont fait l'objet d'essais complémentaires, limités à un type de bois pour les bûches et un type de bois granulé, également répétés sur trois jours pour chacune de ces positions.

Exploitation des données sous forme de facteurs d'émission : Afin de comparer les émissions particulières des différents combustibles et des différentes configurations de fonctionnement des appareils de combustion, des facteurs d'émission ont été calculés. Ces facteurs, exprimés en nombre de particules par mégajoule ($\#.MJ^{-1}$), permettent de rapporter les émissions en nombre de PM_{10} et de PUF à l'énergie entrante dans le poêle.

Ils sont calculés selon l'équation suivante :

$$FE = \frac{C \times D_v}{PCI \times 1000 \times M_h}$$

Où « C » est la concentration en nombre de particules PM_{10} ou PUF dans les fumées (particules.m^{-3}), « D_v » le débit volumique des fumées ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$), « M_h » la masse brute de combustible consommée par heure (kg.h^{-1}) et « PCI » le pouvoir calorifique inférieur du combustible brut (kJ.kg^{-1}). Le facteur 1000 permet la conversion de l'énergie de kJ en MJ.

4. Principaux résultats

4.1 Résultats obtenus avec le poêle à granulés

Les essais ont été réalisés sur le banc d'essai du LNE en utilisant trois granulés différents : deux composés à 100 % de résineux (granulés 1 et 3) et un composé d'un mélange (80 % feuillus – 20 % résineux, granulé 2). Les mesures par DMS500, ainsi que les mesures des gaz de combustion, ont été effectuées en continu pendant la journée d'essai. Les prélèvements MPS n'ont été réalisés que sur une seule des trois journées pour chaque type de granulé (un prélèvement par niveau de puissance).

Données temporelles : Lors des essais, les profils temporels d'émissions de gaz et de particules ont montré des tendances similaires pour les paramètres mesurés (CO , CO_2 , O_2 , nombre de particules PM_{10} et PUF dans les fumées) entre les différentes journées d'essais, pour les trois types de granulés et aux trois points de prélèvement. Les évolutions temporelles observées mettent en évidence une forte dépendance des émissions particulières aux conditions de fonctionnement de l'appareil, en particulier au niveau de puissance. Les émissions en nombre de particules varient de manière significative entre les différentes phases du protocole, notamment lors des phases transitoires de démarrage, d'extinction et de changement de puissance.

Les distributions granulométriques mesurées montrent que la contribution des PUF au nombre de particules PM_{10} varie entre 83 et 91 % selon les phases de fonctionnement et les combustibles étudiés. Les granulométries observées sont différentes en fonction des niveaux de puissance du poêle (Figure 4). Les phases de fonctionnement à puissance nominale, qu'il s'agisse d'un allumage à froid (phase 1a) ou à chaud (phase 2), présentent des distributions granulométriques similaires, stables dans le temps et centrées autour de 60 nm. La phase de fonctionnement à puissance intermédiaire (phase 3) montre également une distribution monomodale similaire. La phase à puissance réduite (phase 1b) présente une distribution centrée à 60 nm mais avec un étalement marqué vers les grands diamètres, ainsi qu'une dispersion temporelle importante, liés aux phénomènes d'instabilité. Ce phénomène peut s'expliquer par une combustion ponctuellement sous-ventilée (chute de granulés par paquets, sans modification du niveau d'alimentation en air), conduisant à une combustion incomplète et à la génération de grandes quantités de matière organique imbrûlée, qui se condensent en aval sous forme de particules.

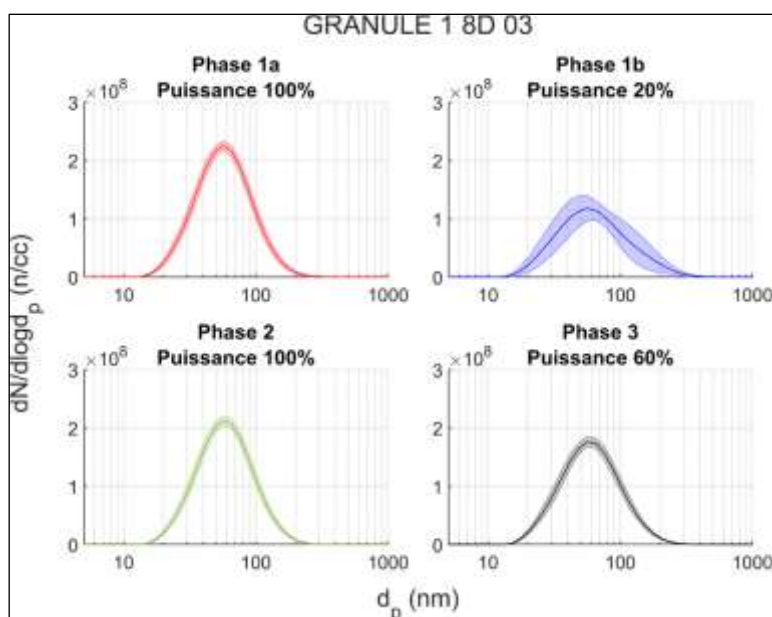


Figure 4 : Distribution granulométriques moyennes par phases – Granulé 1 – Prélèvement à 8 diamètres en aval – Essai n°3 – De gauche à droite et de haut en bas : Phase 1a (Puissance 100 %) – Phase 1b (Puissance 20 %) – Phase 2 (Puissance 100 %) – Phase 3 (Puissance 60 %)

Facteurs d'émission : Les facteurs d'émission en nombre de particules PM₁, exprimés en moyennes journalières dans les fumées, pour les trois types de granulés testés varient entre 8×10^{13} #.MJ⁻¹ et 1×10^{14} #.MJ⁻¹ (mesures réalisées à 8D) et sont comparables aux données issues de la littérature, qui rapportent des valeurs comprises entre 10^{13} et 10^{14} #.MJ⁻¹ [13], [14], [15].

La comparaison des facteurs d'émission en nombre de particules PM₁ et de PUF obtenues sur trois essais, pour les différents granulés testés et pour chaque phase de combustion, montre que le niveau de puissance du poêle à granulés est le principal facteur d'influence des émissions de particules en nombre : le fonctionnement du poêle à puissance réduite (environ 20 % de la puissance nominale) conduit aux facteurs d'émission en nombre les plus élevés, pour les PM₁ comme pour les PUF (Figure 5). Par ailleurs cette phase se distingue par une plus grande variabilité temporelle des émissions associée avec des instabilités de la combustion. Ces instabilités s'accompagnent d'une modification transitoire de la distribution granulométrique, avec l'apparition d'un second mode autour de 200 nm.

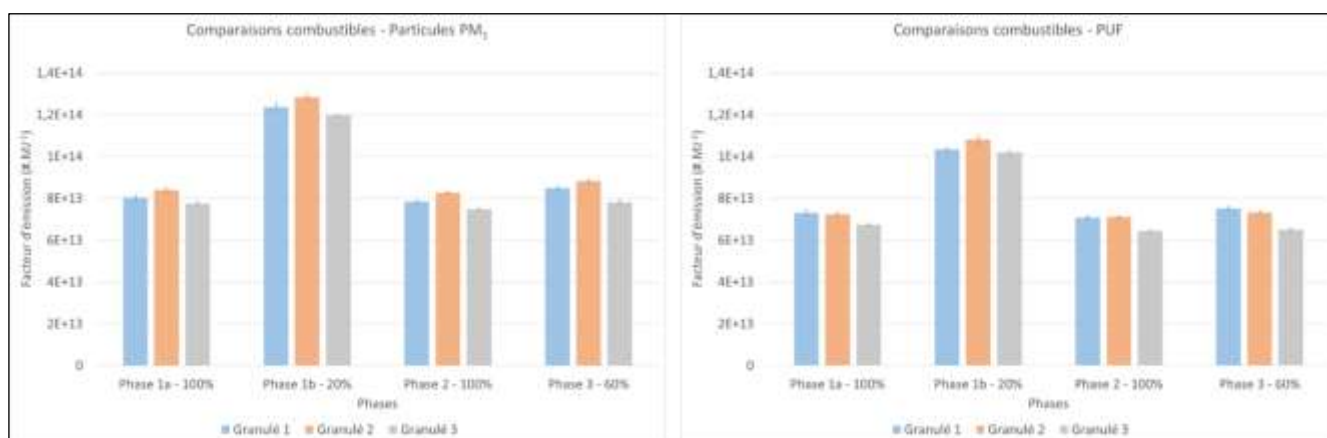


Figure 5 : Facteurs d'émission en nombre par phases – Poêle à granulés – Particules PM₁ (à gauche) et PUF (à droite)

Les propriétés des granulés ne semblent pas avoir d'effet significatif sur les émissions en nombre de PM₁ et de PUF. En effet, les différences observées entre les trois types de granulés testés sont faibles. Les granulés présentent des caractéristiques physico-chimiques proches, notamment en termes d'humidité, de pouvoir calorifique et de teneur en cendres, ce qui explique l'absence d'effet marqué du combustible sur les émissions de PUF dans cette étude.

L'influence de la hauteur du point de prélèvement a été étudiée en réalisant des essais à des distances de 4, 8 et 12 diamètres en aval du coude du conduit de fumée. Les résultats montrent que le déplacement du point de prélèvement vers l'aval conduit à une diminution progressive des facteurs d'émission en nombre de PM₁ et de PUF. En revanche, les distributions granulométriques mesurées à ces différentes hauteurs restent comparables en termes de diamètre modal, ce qui suggère que la diminution du nombre de particules est principalement liée à des mécanismes de dépôt sur les parois du conduit plutôt qu'à des phénomènes de croissance sélective des particules.

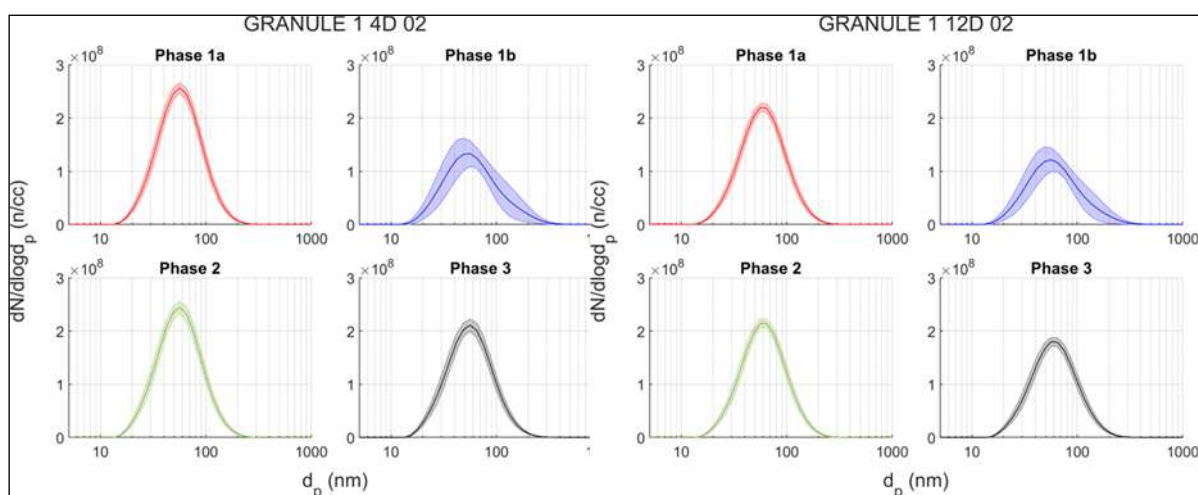


Figure 6 : Comparaisons des distribution granulométriques mesurées à 4 (gauche) et 12 (droite) diamètres en aval – Poêle à granulés – Granulé 1. Avec Phase 1a (Puissance 100 %) – Phase 1b (Puissance 20 %) – Phase 2 (Puissance 100 %) – Phase 3 (Puissance 60 %)

Les observations réalisées par microscopie électronique sur les particules émises par le poêle à granulés mettent en évidence trois catégories principales de particules : cendres volantes (structure en plaquettes, composition majoritairement minérale), particules de suies (agrégats de particules primaires de 20 nm), particules majoritairement organiques (gouttelettes de 20 nm à quelques micromètres, majoritairement C et O, présence de K et S possibles). Les gouttes sont difficiles à étudier avec l'EDX, en particulier les plus fines ; car le faisceau de rayons X tend à les disperser, voire à les évaporer. Aucune différence marquée de morphologie, de taille ou de composition élémentaire n'a été observée en fonction du type de granulés, du point de prélèvement ou de la phase de combustion.

4.2 Résultats obtenus avec le poêle à bûches

Les essais ont été réalisés sur le banc d'essai de l'Ineris en utilisant quatre types de bûches différents : bûches de hêtre avec et sans écorce à une humidité d'environ 15 %, bûche densifiée A (vendue comme 100 % bois sans écorce) et bûche densifiée B (vendue comme 100 % bois à partir de copeaux, sciures et connexes industriels de pin maritime), toutes deux à une humidité de 10 %. Les mesures par DMS500 et ELPI+, ainsi que les mesures des gaz de combustion, ont été effectuées chaque jour. Les prélèvements DGI et MPS ont été réalisés le troisième jour pour chaque type de bois. Aucun prélèvement DGI n'a été effectué pour les essais réalisés à 4D et 12D.

Données temporelles : Tout d'abord, les résultats en nombre de particules, obtenus avec les deux instruments ELPI+ et DMS500 ont montré un bon accord : profils temporels similaires et ordres de grandeur comparables et ce malgré des principes de mesure différents mis en œuvre par ces deux instruments.

Les essais réalisés sur le poêle à bûches mettent en évidence une variabilité temporelle des émissions plus marquée que pour le poêle à granulés. Les profils temporels des concentrations en gaz et en particules montrent

une forte sensibilité des émissions aux différentes phases de combustion, en particulier à la phase d'allumage et aux phases de rechargement en combustible.

La phase d'allumage est la plus émissive en nombre de PM_1 dans les fumées (Figure 7). Cette phase est caractérisée par un pic d'émission important, d'une durée de dix à vingt minutes, associée à une combustion initialement dégradée dans une chambre de combustion encore froide. Au cours de cette phase, la contribution des PUF au nombre de PM_1 reste significative (42 à 66 %), mais elle est plus faible que lors des phases de fonctionnement à allures nominale ou réduite (65 à 93 %) en raison de la présence accrue de particules de diamètre supérieur à 100 nm.

Lors des phases de fonctionnement à allure nominale, les émissions en nombre de particules sont dominées par les PUF (Figure 7). Les distributions granulométriques sont généralement monomodales, centrées autour d'un diamètre de l'ordre de 20 nm. Des pics ponctuels de particules de diamètre compris entre 100 et 300 nm sont observés dans les premières minutes suivant le rechargement du foyer, avant que les émissions ne se stabilisent.

Les phases de fonctionnement à allure réduite présentent des profils d'émission globalement comparables à ceux observés à allure nominale, mais avec une plus grande variabilité temporelle (Figure 7). Le démarrage de la combustion est plus lent et peut nécessiter une ouverture des arrivées d'air. Les distributions granulométriques restent dominées par les PUF, mais montrent parfois un étalement vers les diamètres plus élevés.

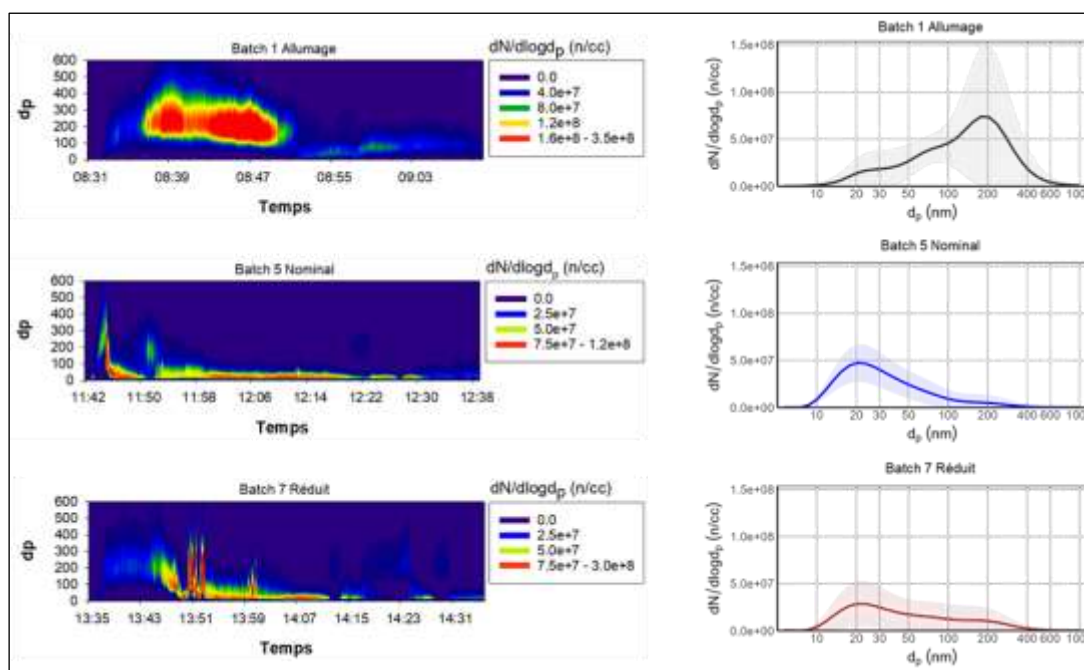


Figure 7 : Variation de la granulométrie instantanée au cours des différentes phases de combustion (à gauche) et distribution granulométrique moyenne (à droite), lors des essais réalisés avec du bois de hêtre avec écorce.

Facteurs d'émission : Les moyennes journalières des facteurs d'émission en nombre de PM_1 varient entre $2,5 \times 10^{13}$ et $3,4 \times 10^{13}$ #.MJ⁻¹, avec des valeurs légèrement supérieures pour les deux lots de bûches densifiées par rapport aux bûches de hêtre. Comparées aux données de la littérature, où les facteurs d'émission pour les poêles à bûches sont généralement comprises entre 10^{13} et 10^{14} #.MJ⁻¹ ([13], [15], [16], [17], [18], [19]), les valeurs mesurées dans cette étude s'inscrivent dans la limite inférieure de l'intervalle rapporté.

La comparaison des facteurs d'émission en nombre de PM_1 et de PUF obtenues sur trois essais, pour les différents types de bûches testés et pour chaque phase de combustion, montre que la phase d'allumage est la plus émissive en nombre de PM_1 (Figure 8). Les facteurs d'émission à l'allumage sont 1,4 à 1,8 fois plus élevés que les facteurs d'émission en allures nominales ou réduites. Lors de cette phase, la contribution relative des PUF aux PM_1 baisse, cependant il n'est pas observé de diminution du nombre de PUF en valeur absolue, mais plutôt une augmentation des particules de diamètre > 100 nm. Aucune différence significative n'est observée entre les allures nominales et réduites concernant le nombre moyen de particules émises (PM_1 et PUF).

Les comparaisons entre les différents types de bûches (Figure 8) montrent que les facteurs d'émission en nombre sont du même ordre de grandeur pour les quatre combustibles étudiés lors des phases nominales et réduites. En revanche, lors de la phase d'allumage, les bûches densifiées émettent davantage de particules que les bûches de hêtre (Figure 8), soit 1,2 à 1,4 fois plus en PM_{10} et 1,8 à 2,1 fois plus en PUF. Cette différence pourrait être liée à des pics ponctuels d'émission observés lors de l'ouverture soudaine des bûches densifiées au cours de la combustion.

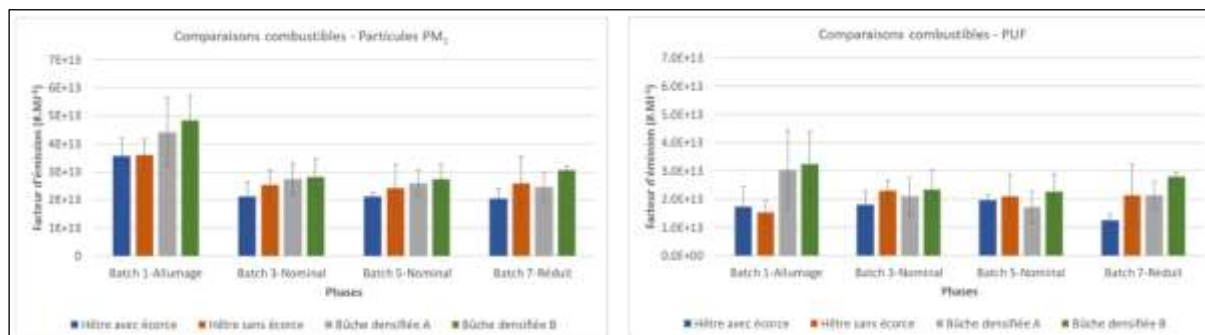


Figure 8 : Facteurs d'émission en nombre par phases – Poêle à bûches – Particules totales PM_{10} (à gauche) et PUF (à droite)

L'effet de la hauteur du point de prélèvement est marqué pour le poêle à bûches (Figure 9). L'éloignement du point de prélèvement dans le conduit s'accompagne d'une diminution du nombre de particules mesurées (PM_{10} et PUF). Les distributions granulométriques évoluent également avec la hauteur de prélèvement, avec un déplacement progressif vers des diamètres plus élevés, traduisant des phénomènes de coagulation et de condensation au cours du transport des fumées, sans toutefois exclure la possibilité d'une perte de matière sur les parois du conduit.

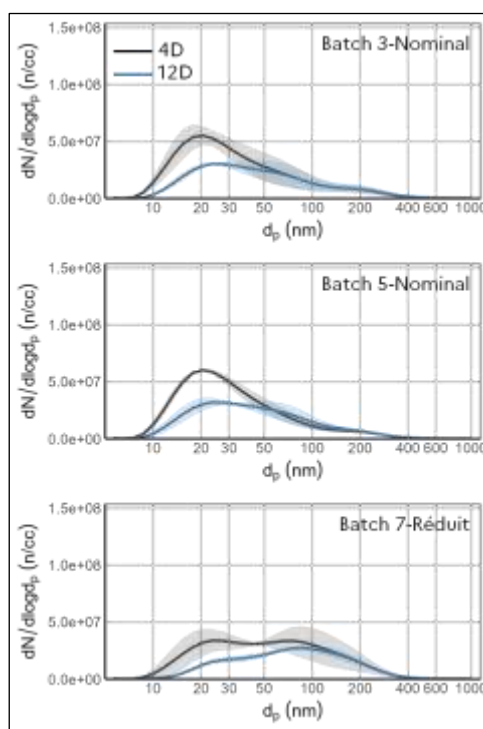


Figure 9 : Évolution de la granulométrie en fonction du point de prélèvement d'aérosols

Les observations de microscopie électronique réalisées sur les particules émises par le poêle à bûches montrent, comme pour le poêle à granulés, la présence de particules majoritairement organiques sous forme de gouttelettes, associées à des particules de suie et à des particules inorganiques en plus faible proportion.

L'utilisation de l'impacteur DGI associé à l'analyse chimique au laboratoire, bien que limitée à la caractérisation de la fraction $PM_{0,2}$ permet de compléter les observations microscopiques. En effet, il s'agit d'une technique

quantitative donnant accès aux fractions organique et inorganique de l'aérosol compensant ainsi les limitations associées à l'utilisation de l'observation par microscopie électronique. La caractérisation chimique des PM_{0,2} par impaction DGI et analyses chimiques, dans les conditions de réalisation des essais, a montré que la majorité des composés analysés présente des valeurs supérieures aux limites de quantification, confirmant la faisabilité de la stratégie de prélèvement et d'échantillonnage pour l'étude des PM_{0,2}, tout en mettant en évidence certaines limites liées aux blancs et à la sensibilité analytique, et la nécessité d'adaptations méthodologiques futures afin d'améliorer la capacité de détection des composés présents à de plus faibles concentrations. L'analyse des échantillons de PM_{0,2} indique que le carbone est majoritairement présent sous forme organique, quels que soient l'allure de combustion et le type de bûche utilisé, avec des niveaux plus élevés à l'allumage et en allure réduite. La fraction organique des PM_{0,2} est plus élevée que la fraction inorganique. Les métaux les plus abondants sont le fer et l'aluminium ; parmi les cations, le potassium est le plus abondant ; pour les anions, le sulfate est le plus représenté.

4.3 Comparaison des émissions des poêles à bûches et à granulés

La comparaison des émissions entre les deux appareils (poêle à granulés et poêle à bûches), montre que les émissions de PUF sont du même ordre de grandeur (de l'ordre de 10¹³ #.MJ⁻¹).

Le poêle à granulés présente toutefois des facteurs d'émission trois à quatre fois plus élevés que le poêle à bûches. En revanche, le poêle à bûches émet des particules plus fines, avec un mode centré autour de 20 nm, tandis que le poêle à granulés présente un mode centré autour de 60 nm. Par ailleurs, les émissions du poêle à bûches présentent une évolution granulométrique plus marquée dans le conduit, indiquant que les processus de formation et de croissance des PUF se poursuivent au-delà de la chambre de combustion. Ce résultat est propre aux deux appareils évalués et aux conditions de combustion et de mesure dans lesquelles ils ont été testés, et ne peut pas être considéré comme représentatif des émissions de PUF issues de l'ensemble des poêles à bûches et granulés. Certaines observations peuvent en effet aussi s'expliquer par les caractéristiques propres aux appareils, notamment la présence d'un échangeur de chaleur dans le poêle à granulés et les différences de configuration du point de prélèvement, qui influencent le refroidissement des fumées et favorisent la condensation et la croissance des PUF. Il est également important de mentionner que les deux appareils ont été testés sur deux plateformes différentes, exploitées par des équipes différentes et équipées de matériels de mesure différents, bien que basés sur la même technologie de mesure et le même modèle d'instrument pour les PUF. Ainsi, la comparaison entre bûches et granulés ne reflète pas uniquement l'effet du combustible, mais également les différences de conception et de fonctionnement des appareils et des plateformes de mesure, ce qui limite toute comparaison directe entre ces deux systèmes.

5 Conclusions et perspectives

Le projet PERICLES a tout d'abord permis **d'identifier les technologies adaptées à la mesure des particules ultrafines** émises par les appareils de chauffage domestique au bois. Le projet souligne l'importance de recourir à une métrologie adaptée aux particules ultrafines, combinant une étape de dilution dans des conditions contrôlées, des mesures en nombre, des distributions granulométriques, des profils temporels et des analyses physico-chimiques.

Les granulomètres DMS500 et ELPI+ ont montré leur utilité au cours des essais, car leur temps de réponse court permet de détecter les instabilités liées au comportement du combustible (chutes irrégulières de granulés, ouverture des bûches densifiées). Il est probable qu'un appareil à temps de réponse plus long (type SMPS) n'aurait pas permis de repérer ces phénomènes, dont le temps caractéristique est de l'ordre de la dizaine de secondes.

La sensibilité granulométrique du DMS500 est suffisante au vu des granulométries rencontrées. Les mesures réalisées par les deux appareils (DMS500 et ELPI+) sur un même essai (poêle à bûches) donnent des résultats très proches : profils temporels similaires et ordres de grandeur comparables, et ce malgré les principes de mesure différents mis en œuvre par ces deux instruments.

Le préleveur MPS permet d'accéder à des informations qualitatives sur la morphologie et la composition élémentaire via la microscopie électronique et le dispositif EDX.

Trois catégories de particules couramment rencontrées dans les effluents issus de la combustion du bois ont été observées :

- Les gouttelettes majoritairement organiques, les plus présentes sur les grilles ;
- Les particules de suie, constituées de carbone élémentaire, moins nombreuses ;
- Les cendres volantes, comprenant de nombreuses espèces minérales, très peu nombreuses.

Aucune différence notable n'a été observée entre les particules en fonction du type de combustible, de l'appareil utilisé, du régime de fonctionnement ou de la distance de prélèvement par rapport à la sortie du poêle. Néanmoins, l'analyse élémentaire par EDX est limitée aux particules solides, car les gouttelettes ne résistent pas au faisceau de rayons X. L'impacteur DGI permet de contourner cette difficulté et de compléter les observations microscopiques, en donnant accès à d'autres moyens expérimentaux, notamment d'analyse chimique quantitative (par exemple ICP-AES, analyse EC-OC), mais ne permet pas de sélectionner spécifiquement les PUF (diamètre de coupure de 200 nm).

Le projet PERICLES met en évidence que **les particules ultrafines constituent une fraction dominante des émissions particulaires en nombre** issues du chauffage domestique au bois, pour les deux poêles étudiés (granulés et bûches). Les **conditions de fonctionnement influencent fortement les émissions**. Ainsi, pour le poêle à granulés, le fonctionnement à puissance réduite conduit à des émissions élevées de PUF et de PM₁ en nombre, en raison d'une dégradation des conditions de combustion. Pour le poêle à bûches, la phase d'allumage est la plus émissive en nombre de PM₁ ; durant cette phase, le nombre absolu de PUF ne diminue pas, mais les émissions de particules de diamètre supérieur à 100 nm augmentent, ce qui fait baisser la contribution du nombre de PUF au nombre de PM₁ émises.

En revanche, **pour un type de combustible donné** (bûche ou granulé), **l'influence de ses caractéristiques** (essence de bois pour les granulés, bûche naturelle avec ou sans écorce ou bûche densifiée) **sur les émissions de PUF est limitée**.

Concernant les granulés présentant des propriétés physicochimiques similaires, aucune influence significative sur les émissions de PUF n'a été observée.

Les comparaisons entre les différents types de bûches étudiées montrent que les facteurs d'émission en nombre de PM₁ et de PUF sont du même ordre de grandeur pour les phases de fonctionnement nominale et réduite. En revanche, lors de la phase d'allumage, les bûches densifiées émettent un nombre de PM₁ et de PUF plus élevé que les bûches de hêtre.

Les résultats montrent également **que la position du point de prélèvement influence les émissions mesurées**. Pour le poêle à bûches, des réductions de 45 % et de 62 % des quantités de PM₁ et de PUF mesurées sont respectivement observés à des distances de 4 et 12 diamètres de conduit. Avec les deux appareils, l'éloignement du point de prélèvement entraîne une diminution du nombre de PM₁ et de PUF associée, dans le cas du poêle à bûches, à un décalage de la granulométrie vers des diamètres plus élevés. Ces observations soulignent la difficulté de comparer les résultats entre appareils et entre études lorsque les configurations de prélèvement diffèrent.

Des travaux complémentaires sont nécessaires afin d'approfondir la connaissance de la composition chimique des PUF en l'associant à des approches biologiques intégrant les effets toxicologiques du mélange, en particulier à l'échelle moléculaire. Pour garantir une bonne comparabilité des résultats obtenus, il sera nécessaire de tester les appareils (anciens vs performants) dans des conditions de combustion analogues et représentatives d'un usage réel des appareils de combustion (prise en compte des phases transitoires, allure réduite etc.), en appliquant des protocoles de mesure et de prélèvement harmonisés. Il apparaît également pertinent de poursuivre les investigations sur le devenir des particules ultrafines après leur émission, en étudiant leur vieillissement et leurs transformations physico-chimiques dans l'atmosphère. Enfin, l'étude de combustibles plus diversifiés ainsi que de technologies et de générations d'appareils supplémentaires permettrait de renforcer la robustesse des conclusions du présent projet et d'améliorer la compréhension globale des émissions de PUF du chauffage domestique au bois.

Références bibliographiques

- [1] M. Garcia-Marlès *et al.*, “Source apportionment of ultrafine particles in urban Europe,” *Environment International*, vol. 194, p. 109149, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.envint.2024.109149.
- [2] P. K. Hopke, Y. Feng, and Q. Dai, “Source apportionment of particle number concentrations: A global review,” *Science of The Total Environment*, vol. 819, p. 153104, May 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153104.
- [3] A. GAVEL, “Rapport Secten éd. 2024,” Citepa. Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.citepa.org/fr/secten/>
- [4] B. Brandelet, C. Rose, J. Landreau, L. Druette, and Y. Rogaume, “Toward a cleaner domestic wood heating by the optimization of firewood stoves?,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 325, p. 129338, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129338.
- [5] F. Ozil, F. Haas, and G. Trouvé, “SIZE DISTRIBUTIONS AND EMISSION FACTORS OF PM1 AND PM2.5 DURING WOOD COMBUSTION IN DOMESTIC FIREPLACES”.
- [6] A. Kuye and P. Kumar, “A review of the physicochemical characteristics of ultrafine particle emissions from domestic solid fuel combustion during cooking and heating,” *Science of The Total Environment*, vol. 886, p. 163747, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163747.
- [7] T. Lei, W. Xiang, B. Zhao, C. Hou, M. Ge, and W. Wang, “Advances in analysis of atmospheric ultrafine particles and application in air quality, climate, and health research,” *Science of The Total Environment*, vol. 949, p. 175045, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175045.
- [8] D. E. Schraufnagel, “The health effects of ultrafine particles,” *Exp Mol Med*, vol. 52, no. 3, pp. 311–317, Mar. 2020, doi: 10.1038/s12276-020-0403-3.
- [9] M. J. Nieuwenhuijsen *et al.*, “Air pollution and human fertility rates,” *Environment International*, vol. 70, pp. 9–14, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.envint.2014.05.005.
- [10] A. L. Moreno-Ríos, L. P. Tejada-Benítez, and C. F. Bustillo-Lecompte, “Sources, characteristics, toxicity, and control of ultrafine particles: An overview,” *Geoscience Frontiers*, vol. 13, no. 1, p. 101147, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.gsf.2021.101147.
- [11] “Directive air ambiant DIRECTIVE (UE) 2024/2881 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 octobre 2024 concernant la qualité de l’air ambiant et un air pur pour l’Europe (refonte).” Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng>
- [12] *Commission Regulation (EU) 2015/1189 of 28 April 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel boilers (Text with EEA relevance)*, vol. 193. 2015. Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/reg/2015/1189/oj>
- [13] L. S. Båfver, B. Leckner, C. Tullin, and M. Berntsen, “Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 8, pp. 3648–3655, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.05.027.
- [14] C. Boman, E. Pettersson, R. Westerholm, D. Boström, and A. Nordin, “Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 1: Pellet Stoves,” *Energy Fuels*, vol. 25, no. 1, pp. 307–314, Jan. 2011, doi: 10.1021/ef100774x.
- [15] H. Lamberg *et al.*, “Physicochemical characterization of fine particles from small-scale wood combustion,” *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 7635–7643, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.072.
- [16] M. Kortelainen *et al.*, “Time-resolved chemical composition of small-scale batch combustion emissions from various wood species,” *Fuel*, vol. 233, pp. 224–236, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.06.056.
- [17] P. Martens *et al.*, “Brown Coal and Logwood Combustion in a Modern Heating Appliance: The Impact of Combustion Quality and Fuel on Organic Aerosol Composition,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 14, pp. 5532–5543, Apr. 2023, doi: 10.1021/acs.est.2c08787.
- [18] F. Fachinger, F. Drewnick, R. Gieré, and S. Borrmann, “How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions,” *Atmospheric Environment*, vol. 158, pp. 216–226, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.027.
- [19] E. Pettersson, C. Boman, R. Westerholm, D. Boström, and A. Nordin, “Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 2: Wood Stove,” *Energy Fuels*, vol. 25, no. 1, pp. 315–323, Jan. 2011, doi: 10.1021/ef1007787.

RÉSUMÉ

Les particules ultrafines (PUF, diamètre < 100 nm) présentes dans l'air constituent un enjeu majeur de santé publique. Bien que leur contribution massique aux émissions de PM_{2,5} et de PM₁ soit négligeable, elles peuvent dominer les émissions en nombre de particules issues du chauffage domestique au bois.

Les objectifs de ce projet sont d'identifier les techniques adaptées à la mesure des émissions de PUF des appareils de chauffage domestique au bois et d'étudier les paramètres influençant ces émissions, grâce à des essais réalisés sur deux appareils récents (poêles à bûches et à granulés) avec des protocoles simulant un usage réel.

Les résultats montrent que :

- Les PUF dominent les émissions en nombre de PM₁ pour les deux poêles étudiés ;
- Les émissions de PUF en nombre sont du même ordre de grandeur ;
- Le type de combustible exerce une influence limitée sur les facteurs d'émission en nombre de PUF et de PM₁ ;
- La caractérisation des émissions de PUF nécessite non seulement leur caractérisation physique (taille et nombre), mais également leur caractérisation chimique.

Des travaux complémentaires sont nécessaires pour approfondir la caractérisation des PUF émises par le chauffage domestique au bois. L'étude d'une plus grande diversité de technologies et de générations d'appareils dans des conditions de combustion et de mesure comparables, permettrait de renforcer la robustesse des conclusions de cette étude.

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 : 2162D0007

Étude réalisée par le LNE, l'INERIS et le Lermab pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Simon DELCOUR (LNE)

Appel à projet de recherche : AQACIA (Amélioration de la Qualité de l'Air : Comprendre, Innover, Agir)

Coordination technique - ADEME : Isabelle AUGÉVENBOUR

Direction villes et territoires durables / Service qualité de l'air

CITATION DE CETTE SYNTHÈSE

HARB S., FRABOULET I., DELCOUR S., MUCCILLI R., 2025. Emissions de particules ultrafines du chauffage domestique au bois – PERICLES : Mesures sur un poêle à bûches et un poêle à granulés. Synthèse, 14 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne

<https://bibrairie.ademe.fr/>

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