

# EMISSIONS DE PARTICULES ULTRAFINES DU CHAUFFAGE DOMESTIQUE AU BOIS

---



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

---

**RAPPORT**

Octobre 2025



**EXPERTISES**

# REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME pour l'aide financière accordée à la réalisation de ce projet, ainsi que Mme Isabelle AUGEVEN-BOUR et Mme Manon VITEL pour le suivi technique. Les auteurs remercient toutes les personnes qui ont participé aux essais, analyses et à la relecture de ce rapport.

## Essais et analyses :

Pour l'Ineris : Sergio HARB, Jason BARDOU, Adrien DERMIGNY, Nicolas KAROSKI, Vincent FUVEL, Benjamin CEA, Ahmad EL-MASRI, Yohann BAILLON, Sylvain BAILLEUL

Pour le LNE : Simon DELCOUR

Pour le LERMAB : Roman MUCCILLI, Benoit BRANDELET

## Rédaction, vérification et approbation :

Rédaction : Sergio HARB (Ineris), Simon DELCOUR (LNE), Roman MUCCILLI (LERMAB)

Vérification : Isaline FRABOULET (Ineris), Yann ROGAUME (LERMAB)

Approbation : Anne MORIN (Ineris)

# CITATION DE CE RAPPORT

**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. Rapport, 78 pages.

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

**Ce document 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 : AUGEVEN-BOUR Isabelle**  
Direction villes et territoires durables / Service qualité de l'air

# SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
1.1. Contexte général .....	7
1.2. Positionnement et objectifs du projet .....	8
<b>2. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>9</b>
2.1. Les particules ultrafines .....	9
2.2. Principaux moyens de mesure et de caractérisation des PUF .....	9
<b>3. MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>13</b>
3.1. Suivi de la masse du combustible .....	13
3.2. Mesure de pression, de température et de vitesse du flux .....	13
3.5. Mesure des gaz de combustion .....	15
3.6. Caractérisation des aérosols .....	15
3.6.1. Distribution granulométrique en nombre des particules .....	15
3.6.2. Morphologie et composition chimique des particules .....	15
3.6.2.1. Microscopie électronique couplée à l'EDX.....	15
3.6.2.2. Prélèvement par impacteur gravimétrique DGI et analyses chimiques .....	16
3.8. Protocole d'essai .....	17
3.8.1. Protocole d'essai pour l'appareil à granulés .....	17
3.8.2. Protocole d'essai pour l'appareil à bûches .....	18
3.9. Traitement des données .....	19
3.9.1. Données temporelles .....	20
3.9.2. Moyennes .....	20
3.9.3. Microscopie électronique couplée à l'EDX .....	20
3.9.4. Exploitation des données sous forme de facteurs d'émission .....	20
<b>4. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>21</b>
4.1. Essais sur la combustion de granulés .....	21
4.1.1. Données temporelles .....	21
4.1.2. Distributions granulométriques moyennes .....	25
4.1.3. Facteurs d'émission.....	26
4.1.3.1. Comparaison des granulés étudiés .....	27
4.1.3.2. Comparaison en fonction de la position du point de prélèvement dans le conduit .....	28
4.1.4. Observations microscopiques.....	30
4.1.5. Récapitulatif des résultats d'émissions de particules avec les granulés .....	34
4.1.5.1. Influence du combustible et de l'allure sur les émissions de particules en nombre (PM <sub>1</sub> et PUF) .....	34
4.1.5.2. Effet de la hauteur du point de prélèvement .....	35
4.1.5.3. Microscopie électronique couplée à l'EDX.....	35

<b>4.2. Essais sur la combustion de bûches</b> .....	<b>35</b>
4.2.1. Données temporelles .....	36
4.2.2. Pic ponctuel d'émission en nombre de particules en allure nominale pour les essais avec les deux bois densifiés .....	39
4.2.3. Facteurs d'émission.....	40
4.2.4. Observations microscopiques.....	47
4.2.5. Composition chimique des PM <sub>0,2</sub> .....	50
4.2.6. Récapitulatif des résultats d'émissions de particules issues de la combustion de bûches	51
<b>4.3. Comparaison bûches/granulés</b> .....	<b>52</b>
<b>5. CONCLUSION</b> .....	<b>57</b>
5.1. Métrologie pour la mesure des PUF à l'émission .....	57
5.2. Mécanismes de production et d'évolution des PUF .....	58
5.3. Comparaison combustion bûches/granulés .....	58
5.4. Effet des conditions de combustion et des caractéristiques des combustibles sur les émissions des PUF.....	58
<b>6. PERSPECTIVES</b> .....	<b>59</b>
<b>ANNEXE 1 : CARACTERISATION DES COMBUSTIBLES UTILISES DANS LE PROJET</b> .....	<b>60</b>
Méthodologie .....	60
Les granulés .....	61
Les bûches .....	64
Comparaison des résultats .....	69
<b>ANNEXE 2</b> .....	<b>70</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>71</b>
<b>INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES</b> .....	<b>74</b>
<b>SIGLES ET ACRONYMES</b> .....	<b>76</b>

## Résumé

Les particules ultrafines (PUF, diamètre < 100 nm) présentes dans l'air constituent un enjeu majeur de santé publique, car elles pénètrent profondément dans le système respiratoire et peuvent atteindre la circulation sanguine. Bien que leur contribution massique aux émissions de PM<sub>2,5</sub> et de PM<sub>1</sub> soit négligeable, elles peuvent dominer les émissions en nombre de particules issues du chauffage domestique au bois. En France, le chauffage domestique au bois est une source majeure de particules atmosphériques, mais les émissions de PUF restent encore mal caractérisées et non réglementées.

Le projet PERICLES a pour objectif d'étudier les émissions de PUF issues de deux appareils de chauffage domestique au bois récents (un poêle à granulés et un poêle à bûches), grâce à des essais réalisés sur deux plateformes expérimentales dédiées et à des protocoles adaptés à leur caractérisation, visant à simuler des usages réels. Une métrologie adaptée aux spécificités des PUF, qui nécessitent un mesurage en nombre plutôt qu'en masse, a été mise en œuvre. Par exemple, une dilution, idéalement à deux niveaux (chaud puis froid), est nécessaire en amont pour une caractérisation fiable.

Trois types de granulés (deux granulés composés à 100 % de bois résineux et un composé d'un mélange de feuillus et résineux) et quatre types de bûches (hêtre avec et sans écorce, ainsi que des bûches densifiées) ont été testés. Les distributions granulométriques en nombre de particules ont été mesurées en temps réel, puis complétées par des analyses qualitatives de la morphologie des particules et de leur composition chimique élémentaire. Les mesures ont été réalisées à différentes hauteurs le long du conduit de fumées. Les émissions sont présentées sous forme de facteur d'émissions (FE) en nombre de particules, c'est-à-dire ramenées à la consommation de bois/ à l'énergie entrante, qui permet de comparer les résultats des deux appareils entre eux.

Les résultats montrent que les PUF dominent les émissions en nombre de PM<sub>1</sub> pour les deux poêles étudiés (42 à 93 %, selon la phase de combustion et l'appareil). Pour le poêle à granulés, le fonctionnement à faible puissance génère les FE en nombre de PUF et de PM<sub>1</sub> les plus élevés. Pour le poêle à bûches, l'allumage à froid est la phase la plus émissive en termes de nombre de PM<sub>1</sub> ; le nombre absolu de PUF reste stable par rapport aux allures nominales et réduites, mais la fraction de particules > 100 nm augmente par rapport au nombre total de particules émises. Le type de combustible exerce une influence limitée sur les FE en nombre de PM<sub>1</sub> et de PUF : les trois types de granulés testés ne montrent pas de différences significatives. Pour le poêle à bûches, les FE sont similaires entre les phases nominales et réduites pour les différents types de bûches, tandis que les bûches densifiées émettent davantage de particules lors de l'allumage.

La comparaison des émissions entre les deux appareils montre que les émissions de PUF sont du même ordre de grandeur (environ 10<sup>13</sup> #.MJ<sup>-1</sup>). Certains résultats sont spécifiques aux appareils et aux conditions testées dans le cadre du projet (conditions de combustion et de mesure) et ne peuvent être généralisés à l'ensemble des appareils à bûches et à granulés. Les différences observées ne reflètent pas uniquement l'effet du combustible et peuvent également être liées aux caractéristiques des appareils (échangeur, configuration du prélèvement, refroidissement des fumées) ainsi qu'aux plateformes de mesure (équipes et instrumentations distinctes). Ainsi, le poêle à granulés testé présente des FE pour les PUF trois à quatre fois plus élevés que le poêle à bûches testé. 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.

La position du point de prélèvement au niveau du conduit influence significativement les FE en nombre de PM<sub>1</sub> et de PUF. Pour les deux appareils, l'éloignement du point de prélèvement entraîne une diminution du nombre de PM<sub>1</sub> et de PUF, associée, dans le cas du poêle à bûches, à un décalage de la distribution granulométrique 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.

Les résultats obtenus au cours de ce projet confirment que la caractérisation des émissions de PUF nécessite non seulement leur caractérisation physique (taille et nombre), mais également leur caractérisation chimique.

Des travaux complémentaires seront nécessaires pour mieux caractériser la composition chimique et leur devenir atmosphérique. L'étude d'une plus grande diversité de combustibles, 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 et d'améliorer la compréhension globale des émissions de PUF issues du chauffage domestique au bois.

## Abstract

Ultrafine particles (UFPs, diameter <100 nm) in air are a major public health concern, as they penetrate deeply into the respiratory system and enter the bloodstream. Although their mass contribution to PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> emissions is negligible, they can dominate atmospheric particle number emissions from domestic wood combustion. In France, residential wood heating is a major source of atmospheric particulate matter, yet UFP emissions remain poorly characterized and unregulated.

The PERICLES project aims to study UFP emissions from two modern stoves (pellet and logwood), by conducting experiments on two dedicated test platforms and using protocols designed to simulate real-use conditions. Adapted metrology for UFPs characterization, requiring particle number rather than mass quantification, was developed. For example, dilution, ideally performed in two stages (hot followed by cold), is required upstream to ensure reliable characterization.

Three pellet types (two composed of 100% softwood and one consisting of a mixture of 80% hardwood and 20% softwood) and four log types (beech with and without bark, and densified logs) were tested. Particle number size distributions were measured in real time, complemented by qualitative analyses of particle morphology and elemental chemical composition. Measurements were performed at different heights along the flue gas duct. Emissions were expressed as particle number-based emission factors (EFs), i.e., normalized to wood consumption or input energy, allowing comparison between the two appliances.

Results show that UFPs dominated PM<sub>1</sub> number emissions for both stoves (42 to 93%, depending on the combustion phase and appliance). For the pellet stove, low-power operation produced the highest EFs in terms of UFP and PM<sub>1</sub> number. For the logwood stove, cold ignition was the most emissive phase in terms of PM<sub>1</sub> number; while the absolute number of UFPs remained stable compared to nominal and reduced phases, the fraction of particles > 100 nm increased relative to the total number of emitted particles. Fuel type showed a limited influence on PM<sub>1</sub> and UFP number EFs: no significant differences were observed among the three pellet types. For logwood stove, EFs were similar during nominal and reduced phases across log types, whereas densified logs emitted higher particle numbers during ignition.

Comparison of emissions between the two stoves showed that UFP emissions are of the same order of magnitude (around 10<sup>13</sup> #.MJ<sup>-1</sup>). However, some results are specific to the tested appliances and experimental conditions (combustion and measurement conditions) and cannot be generalized to all pellet and logwood stoves. The observed differences do not solely reflect fuel effects but may also be related to appliance characteristics (heat exchanger, sampling configuration, flue gas cooling) as well as measurement platforms (different teams and instrumentation). Thus, the tested pellet stove exhibited UFP EFs three to four times higher than the logwood stove. In contrast, the logwood stove emitted finer particles, with a mode centered around 20 nm, while the pellet stove showed a mode centered around 60 nm.

Sampling position along the flue gas duct significantly affected PM<sub>1</sub> and UFP number EFs. For both stoves, increasing the distance of the sampling point led to a decrease in PM<sub>1</sub> and UFP number, associated, in the case of the logwood stove, with a shift in particle size distribution toward larger diameters. These observations highlight the difficulty of comparing results between appliances and across studies when sampling configurations differ.

The results of this project confirm that characterizing UFP emissions requires not only physical characterization (size and number) but also chemical characterization.

Further research is required to better understand the chemical composition and atmospheric fate of UFPs. Studying a wider range of fuels, as well as different technologies and appliance generations under comparable combustion and measurement conditions, would help strengthen the robustness of this study's conclusions and improve the overall understanding of UFP emissions from residential wood combustion.

# 1. Introduction

---

## 1.1. Contexte général

Les particules fines (dont le diamètre est inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$  pour les  $\text{PM}_{2,5}$  et à 1  $\mu\text{m}$  pour les  $\text{PM}_1$ ) et ultrafines ou PUF ( $\text{PM}_{0,1}$  – Diamètre inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ ) 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]. Les principales sources d'émissions anthropiques de particules sont le trafic routier [2], le transport aérien [3], [4], et le secteur résidentiel, via le chauffage et notamment le chauffage domestique au bois [5]. Le bois énergie constitue la première énergie renouvelable utilisée en France, et près d'un quart des ménages français ont recours au chauffage domestique au bois pour se chauffer. Toutefois, ce mode de chauffage est une source significative d'émissions de polluants gazeux et particulaires (particules organiques et inorganiques). Le parc français d'appareils de chauffage domestiques au bois est majoritairement constitué d'appareils à bûches et à granulés. Les appareils à bûches restent prédominants, bien que le nombre d'appareils à granulés installés ait fortement augmenté ces dernières années.

En France, en 2024, le secteur « Usage/activités des bâtiments », auquel le chauffage domestique au bois contribue très majoritairement, était à l'origine de 67 % des émissions en masse de  $\text{PM}_{2,5}$  et 82 % des émissions en masse de  $\text{PM}_1$ . L'importance du chauffage domestique au bois dans les émissions est d'autant plus marquée que la granulométrie considérée est fine. Ainsi, bien que les émissions de PUF ne soient pas prises en compte dans les inventaires nationaux d'émissions du fait d'une méconnaissance de leurs facteurs d'émission pour les différentes sources, la contribution du chauffage au bois est probablement importante.

Les particules ultrafines suscitent un intérêt croissant en raison des risques sanitaires qui leur sont associés. En 2018, l'ANSES a recommandé de surveiller ces particules dans l'air ambiant [6]. 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 [7]. A cela s'ajoute le fait que la caractérisation physico-chimique des PUF issues du chauffage domestique au bois demeure encore mal connue, alors même qu'elles peuvent également présenter une composition chimique différente de celle des particules plus grosses.

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 [8], [9], [10], [11]). D'autre part, ces particules ont un rapport surface/masse élevé qui leur permet d'absorber, par unité de masse, de grandes quantités de composés organiques (notamment les HAP) ou inorganiques (métaux).

Il n'existe actuellement pas de valeur limite réglementaire en France et en Europe concernant les particules ultrafines, que ce soit en termes de concentration dans l'air ambiant ou d'émission. Cependant, la réglementation française exige dorénavant que les polluants atmosphériques d'intérêt national (dont les PUF) fassent l'objet d'une surveillance spécifique et pérenne déterminée au niveau national. De plus, la nouvelle directive européenne air ambiant 2024/2881 [12] impose aux Etats membres une obligation de surveillance des PUF dans l'air ambiant.

Les PUF présentes dans l'air ambiant peuvent être divisées en deux catégories principales selon leur origine [1] :

- Celles directement émises par les sources naturelles ou anthropiques,
- Celles produites dans l'atmosphère par des processus secondaires de nucléation, condensation ou coagulation, notamment à partir de composés organiques.

Des politiques publiques ont été mises en place depuis plusieurs années pour réduire les émissions de polluants atmosphériques associées au chauffage domestique au bois. Ainsi, le 23 juillet 2021, le Ministère de la Transition écologique (MTE) a lancé un plan d'actions sur le chauffage au bois (« plan air bois ») visant à réduire, entre 2020 et 2030, de plus de 30 % les émissions annuelles de  $\text{PM}_{2,5}$  issues

du chauffage au bois à l'échelle nationale et de 50 % dans les territoires les plus pollués (zones dites PPA [Plans de protection de l'atmosphère]), en encourageant l'usage d'équipements performants et de combustible de qualité [13]. En France, le label Flamme Verte<sup>1</sup> définit des exigences de performances énergétiques et environnementales pour les appareils domestiques de chauffage au bois, parmi lesquelles figure une valeur limite sur les émissions de particules qui s'est récemment alignée sur le règlement européen Ecoconception 2015/1189 [14]. Cependant ces deux référentiels se focalisent sur les émissions massiques de particules totales en suspension (TSP). Les systèmes de chauffage domestique au bois ont fait l'objet de nombreux travaux qui ont permis d'améliorer leurs performances en termes d'émissions de particules fines (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) en masse, cependant très peu d'entre eux se sont intéressés spécifiquement aux émissions de PUF.

Ainsi, bien que des efforts aient été réalisés pour réduire les émissions massiques de particules via la réglementation, les travaux de recherche, l'amélioration des performances des appareils de combustion et de la qualité des combustibles, l'efficacité de ces stratégies pour réduire les émissions en nombre, notamment celles des PUF, restait incertaine. Il est donc essentiel d'approfondir les connaissances sur les émissions de PUF.

## **1.2. Positionnement et objectifs du projet**

Dans ce contexte, l'objectif du projet PERICLES est d'étudier les émissions de particules ultrafines issues d'appareils domestiques de chauffage au bois à l'aide d'une métrologie adaptée aux spécificités des PUF : mesurage en nombre plutôt qu'en masse, nécessité de diluer en amont des mesurages, utilisation de la microscopie électronique. Le projet traite en particulier, dans différentes conditions de fonctionnement, de l'impact des caractéristiques des combustibles bûches et granulés sur ces émissions, parmi lesquelles leur humidité et leur nature. Les essais ont été réalisés sur deux appareils : un poêle à bûches et un poêle à granulés.

Les données produites incluent notamment : la distribution granulométrique, la concentration en nombre, les profils temporels d'émission, la nature chimique des particules ultrafines.

Ce projet a pour objectif d'étudier les émissions de particules ultrafines issues des appareils de chauffage domestique au bois et de répondre 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 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 ?

Le projet PERICLES est structuré en trois phases principales :

- Phase 1 : dédiée à la réalisation d'une étude bibliographique et d'un état de l'art, fondés sur des rapports et des études nationales et internationales portant sur les émissions de particules ultrafines issues des appareils de chauffage domestique au bois ;
- Phase 2 : consacrée à la sélection et à la caractérisation des combustibles ;
- Phase 3 : incluant la définition des protocoles d'essai, la réalisation des essais, ainsi que le traitement et l'analyse des données.

Ces différentes parties seront détaillées dans les sections qui suivent.

---

<sup>1</sup> Label français lancé par l'Agence de la transition écologique (ADEME) et les professionnels de la filière du chauffage en bois en 2000, il labellise les appareils de chauffage indépendants : foyers fermés / inserts, poêles, cuisinières et chaudières domestiques fonctionnant au bois bûche, à la plaquette forestière et aux granulés de bois

## 2. Analyse bibliographique

Dans un premier temps, une analyse de la littérature existante a été réalisée afin d'identifier les données disponibles sur les émissions de particules ultrafines issues du chauffage domestique au bois, à travers une étude bibliographique portant, entre autres, sur les rapports de projets de recherche antérieurs et les articles scientifiques sur le sujet, aux niveaux national et international. Cette étude a permis de fixer un cadre pour la réalisation des autres tâches. Plus particulièrement, cette phase visait à :

- Réaliser un état des lieux du chauffage domestique au bois en France, incluant le parc d'appareils (nombre et âge des installations), les types de combustibles utilisés ainsi que les émissions de polluants associées à ce type de chauffage ;
- Établir un état des connaissances sur les émissions de PUF liées au chauffage domestique au bois, incluant leur définition, leur composition chimique ;
- Identifier les technologies les plus adaptées pour la mesure et le conditionnement des particules ultrafines ;
- Analyser les paramètres influençant les émissions de PUF issues du chauffage domestique au bois, ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques.

Les résultats de cette étude bibliographique font l'objet d'un rapport dédié dont une synthèse est proposée ci-après, mettant en évidence les principales observations et conclusions.

### 2.1. Les particules ultrafines

La définition retenue pour les PUF est celle de l'ANSES, c'est-à-dire des particules de diamètre équivalent inférieur à 100 nm [15]. Ces particules doivent être caractérisées par une mesure de granulométrie en nombre, car leur faible taille rend leur masse négligeable.

Ces particules sont majoritairement issues de procédés de combustion, via des mécanismes de condensation de vapeurs organiques. Leur composition est donc majoritairement carbonée (sous forme organique ou élémentaire), mais peut aussi inclure des sels minéraux.

La faible taille de ces particules leur permet de pénétrer jusqu'au fond des alvéoles pulmonaires et de passer dans la circulation sanguine. Elles peuvent donc affecter les systèmes cardiaques et respiratoires, mais également le système nerveux. Les risques évoqués par la littérature incluent les décès prématurés, les troubles cardiaques, les inflammations pulmonaires, les troubles de la fertilité et du développement foetal [8], [9], [10], [11].

Les principales activités sources de PUF dans l'atmosphère sont le chauffage des bâtiments [5] et le transport routier [2], qui sont deux activités impliquant des processus de combustion. Il n'existe pas de valeur limite réglementaire en France ou en Europe pour les PUF, néanmoins la surveillance de leur concentration en air ambiant est obligatoire depuis 2021.

### 2.2. Principaux moyens de mesure et de caractérisation des PUF

Il existe diverses manières de caractériser les PUF 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, 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 émissions de PUF sont :

- L'impaction en cascade avec ou sans détection électrique : cette technique permet de séparer les particules sur la base de leur inertie, puis de les mesurer en masse par pesée (exemple : DGI ou DLPI) ou en nombre (exemple : ELPI+) par détection électrique. Cette technique permet également de collecter les particules pour procéder à des analyses chimiques.
- La mobilité électrique : il s'agit d'une technique de séparation des particules, basée sur leurs propriétés électriques. C'est le cas du DMS500, qui présente l'avantage d'un temps de réponse très court (inférieur à une seconde), ou du SMPS, qui offre une sensibilité granulométrique élevée, mais un temps de réponse de plusieurs minutes.
- La microscopie Electronique à Balayage/Transmission (MEB/MET) : cette technique permet d'observer les particules prélevées dans le conduit (via un préleveur MPS), et donne ainsi accès à des informations sur la taille et la morphologie des particules. Ces microscopes peuvent également être couplés à un analyseur de dispersion des rayons X (EDX), permettant d'obtenir des informations qualitatives sur la composition élémentaire des particules.

**Il est important de noter que la caractérisation des PUF requiert de mesurer 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.**

### **2.3. Paramètres influençant les émissions de PUF issues du chauffage domestique au bois**

Les principaux paramètres identifiés dans la littérature comme pouvant influencer sur les émissions de PUF issues du chauffage domestique au bois sont les suivants :

#### **Le type de combustible (bûches/granulés) :**

- Plusieurs études de la littérature se sont intéressées aux facteurs d'émission de particules en nombre pour des systèmes de combustion de bûches et de granulés, sans toutefois cibler spécifiquement les PUF :
  - Il est difficile de comparer les facteurs d'émission en nombre de particules issus des différentes études disponibles en raison de différences importantes dans les conditions expérimentales (technologie des appareils de combustion, essence du bois, taux de dilution, protocole de combustion, méthodologie de mesure, etc.).
  - Les résultats de ces études montrent que les PUF sont émises en quantités importantes (en nombre), que ce soit au travers de distributions granulométriques centrées sur des diamètres inférieurs à 100 nm, ou des valeurs de diamètre moyen géométrique (Geometric Mean Diameter : GMD<sup>2</sup>) rapportées inférieures à 100 nm.
  - 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 FE en nombre de particules déterminés dans ces études sont de l'ordre de 10<sup>13</sup> à 10<sup>14</sup> particules.MJ<sup>-1</sup>.
- Nous n'avons identifié que trois études comparant les émissions de PUF issues de combustion de bûches et de granulés (poêles et chaudières **datant d'avant 2017**), dont seulement deux comparant des poêles entre eux. Parmi ces études aucune n'a fourni de comparaison de FE de PUF obtenus dans les mêmes configurations de prélèvement et de conditionnement de l'effluent. Les conclusions suivantes sont donc à prendre avec précaution :

<sup>2</sup> Le diamètre géométrique moyen (ou GMD) est calculé comme la moyenne logarithmique des diamètres, pondérée par le nombre de particules. Il est défini par la formule suivante :  $GMD = e^{\left(\frac{\sum n_i \ln d_i}{\sum n_i}\right)}$  avec  $d_i$  : le diamètre moyen des particules de la classe de taille  $i$  ;  $n_i$  : le nombre de particules dans la classe de taille  $i$ .

- 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.
- Il est nécessaire que les protocoles appliqués soient plus représentatifs d'un usage réel des appareils de combustion (prise en compte des phases transitoires, allure réduite etc.) et que les études couvrent une plus grande variété de technologie d'appareils, y compris les technologies les plus récentes afin de confirmer les tendances observées.

#### **L'essence de bois :**

- Les études sur l'effet de l'essence du bois sur les émissions de PUF (en nombre et en masse) et sur leur composition restent trop limitées (dont une seule identifiée sur des poêles) pour l'établissement de conclusions robustes.
- Les études ont été réalisées sur des dispositifs expérimentaux spécifiques en laboratoire (four tubulaire) ou sur des poêles à bûches et à granulés.
- 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 ni en masse, mais pourrait influencer leur composition chimique. Pour les bûches, l'essence de bois peut affecter à la fois les émissions des PUF en nombre et en masse, 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 a été 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 s'intéressent à l'effet des différentes générations de systèmes de chauffage domestique au bois sur les émissions de PUF. Trois études ont été identifiées avec les conclusions suivantes :
  - Les générations d'appareils testées sont antérieures à 2012.
  - Aucune donnée quantitative n'est disponible concernant la composition chimique des PUF.
  - Une tendance à l'augmentation de la contribution relative des PUF au nombre total de particules est observée, mais il reste difficile de conclure sur les nombres absolus émis.
  - Il est nécessaire de tester les appareils (anciens vs performants) dans des conditions de combustion identiques, représentatives d'un usage réel, en appliquant des protocoles de mesure et de prélèvement harmonisés.
- D'autres études existent, mais elles ne fournissent pas de données spécifiques aux PUF (elles portent principalement sur le nombre total de particules et le GMD). Aucune tendance générale ne se dégage quant à l'effet de la génération des appareils sur le nombre total de particules émises.

En plus des paramètres précédemment cités, d'autres paramètres 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 sur 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.

## **2.4. Conclusion de l'analyse bibliographique**

Plusieurs études se sont intéressées aux émissions de particules et de PUF par les systèmes de chauffage domestique au bois. Néanmoins, la grande variété des appareils et des protocoles de mesure fait qu'il est difficile de tirer des conclusions générales. Une tendance semble néanmoins se dessiner sur le fait que l'amélioration des conditions de combustion conduit à une réduction de la production d'espèces organiques imbrulées et tend à augmenter la contribution relative des PUF au nombre total de particules émises, mais il reste difficile de conclure sur les nombres absolus.

La comparaison entre les différentes études est difficile, en raison de la diversité des technologies des appareils testés, des modes de fonctionnement, des types de bois, des instruments de mesure des PUF, ainsi que des méthodes et des taux de dilution appliqués. Il faut également noter que peu d'études ont été réalisées dans des conditions représentatives d'un usage réel.

Les informations issues de l'étude bibliographique ont néanmoins permis d'affiner les objectifs fixés pour le projet PERICLES :

- Identifier les technologies les plus adaptées pour mesurer les PUF émises par le chauffage domestique au bois
- Etudier la formation et l'évolution de ces PUF
- Identifier les impacts des caractéristiques des combustibles et des conditions de combustion sur les émissions de PUF.

### 3. Matériels et méthodes

Les essais ont été menés sur deux plateformes différentes :

- 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.

Ces bancs d'essai (présentés à la Figure 1) permettent d'effectuer les mesures dans des conditions contrôlées (notamment de température et de tirage), garantissant une réalisation des essais la plus reproductible possible ainsi qu'une exploitation aisée des données. 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.

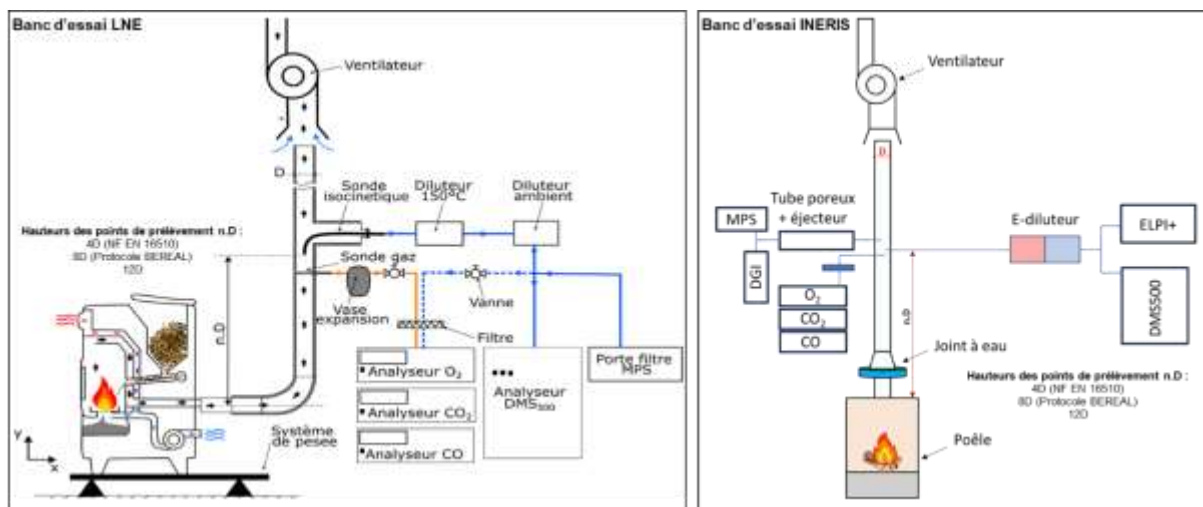


Figure 1 : Représentation schématique du banc d'essai du LNE utilisé pour l'appareil à granulés (à gauche) et du banc d'essai de l'Ineris utilisé pour l'appareil à bûches (à droite)

#### 3.1. Suivi de la masse du combustible

Sur les deux bancs, une mesure de la masse du combustible est effectuée, mais seulement sur le banc LNE un suivi en continu est réalisé à l'aide d'une balance (KERN BID 600K-1DS) pouvant mesurer jusqu'à 300 kg avec une précision de 50 g. L'acquisition est effectuée toutes les cinq secondes via un ordinateur relié au terminal de la balance (logiciel Keysight BenchVue). Un plateau de découplage permet de séparer physiquement la balance et le poêle afin de réaliser la mise à zéro avant chaque essai. Sur le banc Ineris, en raison d'un problème technique, il n'a pas été possible d'assurer un suivi continu de la masse du combustible. La charge de bois était donc pesée avant chaque introduction, et les cendres récupérées en fin de journée étaient pesées puis réparties proportionnellement entre les différents essais.

#### 3.2. Mesure de pression, de température et de vitesse du flux

Sur les deux bancs, des mesures de température des fumées et de pression dans le conduit ont été effectuées.

Le banc d'essai LNE comprend un capteur de pression statique, un capteur de température des gaz et un tube de Pitot associé à un second capteur de température (non représentés sur le schéma). Les capteurs de pression utilisés pour la pression statique et le tube de Pitot sont identiques, avec une plage de mesure de 0–25 Pa. Tous les capteurs sont raccordés à une centrale d'acquisition (KEYSIGHT), avec une fréquence d'acquisition de cinq secondes.

Pour le banc d'essai Ineris, des mesures de la température des fumées en sortie de foyer (thermocouple type K) et du tirage (pression dynamique) sont également réalisées. Le temps d'acquisition pour les capteurs de pression et de température est de dix secondes.

### **3.3. Hauteur du point de prélèvement**

La littérature existante décrit de multiples configurations expérimentales pour réaliser des mesures des particules émises par les appareils de chauffage au bois. Les configurations les plus rencontrées sont issues de la norme NF EN 16510 et du protocole BeReal<sup>3</sup>. La norme NF EN 16510 décrit la mesure des TSP par filtration à chaud et pesée, basée sur un prélèvement à 4 diamètres en aval de la sortie de l'appareil (ou du coude dans le cas des poêles à granulés). Le protocole BeReal propose un point de prélèvement situé à 8 diamètres en aval.

**Cette question de la position du point de mesure est importante car les particules ultrafines sont sensibles aux phénomènes d'agglomération et d'agrégation qui conduisent à modifier leur granulométrie.**

Afin d'étudier l'évolution des particules dans le conduit, les essais sur les deux bancs sont réalisés à trois hauteurs de prélèvement différentes sur le conduit d'évacuation des fumées : 4D (conformément à la norme NF EN 16510), 8D (selon le protocole BeReal) 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 (voir Figure 1).

### **3.4. Systèmes de prélèvement, de dilution et de conditionnement des phases gazeuse et particulaire**

Des mesures en phases gazeuse et particulaire ont été réalisées au niveau du conduit d'évacuation des fumées sur les deux bancs d'essais.

- **Phase gazeuse**

Sur le banc LNE (poêle à granulés), les gaz sont prélevés via une sonde à trous (face vers l'aval) chauffée à 150°C, à un débit de 3 L.min<sup>-1</sup>, puis passent à travers un vase d'expansion placé dans un bac d'eau froide, afin de forcer la condensation. Les gaz passent ensuite dans un sécheur en Chlorure de Calcium et un filtre, avant d'arriver aux analyseurs (CO/CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>).

Sur le banc Ineris (poêle à bûches), les gaz sont prélevés via une sonde chauffée à 180°C à un débit de 10 L.min<sup>-1</sup>. L'effluent est filtré (filtre M&C), puis passe à travers un condenseur (ampoule en verre refroidi), avant d'atteindre les analyseurs.

- **Phase particulaire**

Sur le banc LNE (poêle à granulés), les aérosols sont prélevés par une sonde isocinétique de diamètre 10,7 mm. L'échantillon passe par un premier diluteur éjecteur à chaud (DEKATI DI1000 – 5,4 L.min<sup>-1</sup>) avec une température de consigne de 150°C, choisie sur la base d'un essai préliminaire. Cette dilution est immédiatement suivie d'une dilution à température ambiante (PALAS VKL10 – 3,5 L.min<sup>-1</sup>). Les facteurs de dilutions théoriques à l'ambiante sont de 8 et 10, respectivement. Les aérosols sont ensuite caractérisés en nombre et en taille par le DMS500 (Cambustion). Un préleveur MPS est également présent en aval de la dilution. Les prélèvements MPS sont réalisés pendant 45 secondes à 1 L.min<sup>-1</sup>, en dehors des phases transitoires.

Sur le Banc Ineris (poêle à bûches), les aérosols sont prélevés à travers une sonde chauffée à 160°C, équipée d'une buse de 10 mm de diamètre et connectée au diluteur eDiluter Pro Dekati, comprenant un système de dilution à deux étages : le premier chauffé à 160°C et le deuxième à température

---

<sup>3</sup> 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=AOvVaw1uWjXURJppSEaBpM80mETy&opi=89978449](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=AOvVaw1uWjXURJppSEaBpM80mETy&opi=89978449)

ambiante. Ces deux étages, de type éjecteur, utilisent une grande buse d'éjection et un air de balayage pour réduire le besoin de nettoyage et minimiser les pertes de particules dans le système. Une unité de contrôle intégrée compense activement les fluctuations de la pression de l'échantillon, en veillant à ce que le facteur de dilution choisi reste constant dans toutes les conditions. À la suite des essais préliminaires, les facteurs de dilution théoriques retenus sont :

- 250 (15:15) pour la phase d'allumage
- 100 (10:10) pour un fonctionnement en régime nominal ou réduit.

Les aérosols sont ensuite caractérisés en nombre et en taille via le DMS500 et l'ELPI+.

Pour les analyses différées, des prélèvements manuels supplémentaires sont réalisés lors de certains essais. Pour ce faire, un second système de dilution, constitué d'un tube poreux et d'un éjecteur, est utilisé aux mêmes ratios de dilution que l'eDiluter Pro Dekati. En aval de ce système sont installés :

- Le préleveur MPS (prélèvements à des durées différentes : 10, 20 et 30 secondes, à 1 L.min<sup>-1</sup>),
- L'impacteur gravimétrique haut débit (DEKATI DGI).

Sur les deux bancs, l'air comprimé utilisé pour la dilution est préalablement filtré et séché afin d'éviter toute introduction de contaminants. Les taux de dilution sont vérifiés lors des essais par des mesures de CO<sub>2</sub> réalisées dans l'effluent brut, dans l'air de dilution et dans l'effluent dilué.

### **3.5. Mesure des gaz de combustion**

Des analyses automatiques en ligne d'O<sub>2</sub>, CO et CO<sub>2</sub> sont réalisées sur les deux bancs, après un prélèvement via une sonde chauffée et une étape de traitement (condensation, filtration). Les analyseurs sont calibrés chaque jour à l'aide de bouteilles étalon.

Sur le banc LNE, le pas de temps d'acquisition est de cinq secondes. Les points zéros des analyseurs sont calibrés à l'azote pur. Les valeurs des bouteilles étalon utilisées pour la calibration sont de 10,022 %vol pour le CO<sub>2</sub> et 4700 ppm pour le CO, l'O<sub>2</sub> étant calibré à l'air ambiant (20,95 %vol).

Sur le banc Ineris, l'acquisition des données est réalisée toutes les dix secondes. Les valeurs des bouteilles étalon pour la calibration sont 10 %vol, 0,76 %vol et 400 ppm pour le CO<sub>2</sub>, 906 ppm pour le CO et 10,09 %vol pour l'O<sub>2</sub>.

### **3.6. Caractérisation des aérosols**

En parallèle des mesures des gaz de combustion, la caractérisation physico-chimique des particules est réalisée à l'aide de plusieurs instruments placés en aval d'un système de dilution, d'une part pour tenir compte des phénomènes de condensation et de re-volatilisation des composés semi-volatils, et d'autre part pour protéger les instruments de mesure, généralement trop sensibles pour être utilisés directement sur un effluent fortement chargé en particules, chaud et humide.

#### **3.6.1. Distribution granulométrique en nombre des particules**

La distribution en taille et en nombre des particules a été mesurée en continu sur les deux installations à l'aide d'un DMS500 (Cambustion) (diamètre de mobilité électrique, plage de mesure : 5 nm à 1 µm, dont 20 classes pour les particules inférieures à 100 nm). Sur le banc Ineris, cette mesure était complétée par un impacteur électrique basse pression ELPI+ (diamètre aérodynamique, plage de mesure : 6 nm à 10 µm, dont six classes pour les particules inférieures à 100 nm). Le temps d'acquisition de ces instruments est d'une seconde.

#### **3.6.2. Morphologie et composition chimique des particules**

##### **3.6.2.1. Microscopie électronique couplée à l'EDX**

Des prélèvements d'aérosols ont également été réalisés sur les deux bancs à l'aide de préleveurs de nanoparticules MPS, en vue d'analyses par microscopie électronique (MEB/MET couplée à l'EDX). Ces techniques fournissent des informations qualitatives sur la forme, la taille, la structure et l'organisation des particules, telles que l'agrégation des suies ou la présence de couches condensées et de dépôts

minéraux. L'association de la microscopie électronique à une analyse élémentaire par spectroscopie à dispersion d'énergie des rayons X (EDX) permet d'identifier la composition chimique élémentaire des particules observées. Cette information est cruciale pour distinguer les fractions carbonées, minérales ou métalliques, pour détecter la présence de potassium, calcium, chlore ou soufre, typiques de la combustion de biomasse, ou encore pour identifier des signatures spécifiques permettant de retracer les mécanismes de formation des particules, tels que la nucléation, la condensation, la fragmentation ou l'enrichissement en minéraux volatils. L'utilisation de ces techniques impose des conditions spécifiques de prélèvement. Les grilles doivent être conductrices pour éviter l'accumulation de charges sous le faisceau électronique ; des grilles de microscopie en cuivre recouvertes de carbone sont généralement utilisées. En raison de leur faible capacité de charge et de la saturation rapide de la surface collectrice, les prélèvements doivent être ponctuels, de courte durée, et réalisés sur des périodes précisément choisies afin de cibler des phases représentatives du fonctionnement (allumage, fin de flambée, rechargement, etc.). Ces analyses fournissent ainsi des données importantes qui permettent de mieux comprendre les mécanismes de formation des particules, d'évaluer l'impact des conditions de combustion, et de compléter les approches quantitatives (DMS, ELPI+, DGI) par une description qualitative détaillée.

### 3.6.2.2. Prélèvement par impacteur gravimétrique DGI et analyses chimiques

Des prélèvements supplémentaires sur filtres, réalisés à l'aide d'un impacteur gravimétrique haut débit (DEKATI DGI), ont été effectués sur le banc de l'Ineris uniquement, puis suivis d'analyses chimiques quantitatives de la composition des particules PM<sub>0,2</sub> (EC/OC, ions, métaux). Le prélèvement DGI commence après l'introduction de la charge dans le foyer et se poursuit tout au long de l'essai. Le débit de prélèvement est ajusté à 70 L.min<sup>-1</sup>. Au débit choisi, les diamètres de coupure sont les suivants : D<sub>1</sub> (0,2 µm), D<sub>2</sub> (0,5 µm), D<sub>3</sub> (1,0 µm), D<sub>4</sub> (2,5 µm). Un filtre terminal permet de collecter la fraction < 0,2 µm. Les filtres utilisés sont en quartz (Palfex, Tissuquartz) de 47 mm de diamètre, à l'exception du filtre terminal de 75 mm. Ces filtres ont été pré-conditionnés. Après prélèvement, ils sont stockés dans des boîtes de Pétri, à froid. Seul le filtre terminal a fait l'objet d'analyses chimiques, incluant la détermination de la fraction carbonée des particules (carbone élémentaire et organique) par méthode thermo-optique à l'aide d'un analyseur Sunset Laboratory, l'analyse des cations (Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) par chromatographie d'échange d'ions (CEI) avec détection conductimétrique après extraction aqueuse selon la norme NF EN ISO 14911, la mesure des anions (Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) par chromatographie d'échange d'ions avec détection conductimétrique après extraction dans l'éluant conformément à la norme NF EN ISO 10304, ainsi que l'analyse des métaux (Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sr, Ti, V, Zn) par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-MS) selon la norme NF EN 17294-2. Le même filtre a été réparti entre ces différentes analyses. Pour l'analyse EC-OC, trois poinçons rectangulaires de 1,5 cm<sup>2</sup> (15x10 mm) ont été prélevés dans trois zones de surface équivalentes mais distinctes du filtre, puis analysés individuellement (Figure 2). Une moyenne des trois analyses est calculée afin d'obtenir la composition globale moyenne du filtre en OC et EC. Après ce prélèvement, le filtre restant a été découpé en trois parties : une moitié dédiée à l'analyse des métaux, un quart pour l'analyse des anions, et un quart pour l'analyse des cations. Un filtre « blanc » a également été analysé après avoir été soumis aux mêmes conditions de préparation et de stockage que les autres filtres. Ce blanc permet d'évaluer les teneurs en polluants présents, et pouvant être associés au matériau du filtre lui-même et aux différentes étapes de préparation et de stockage.

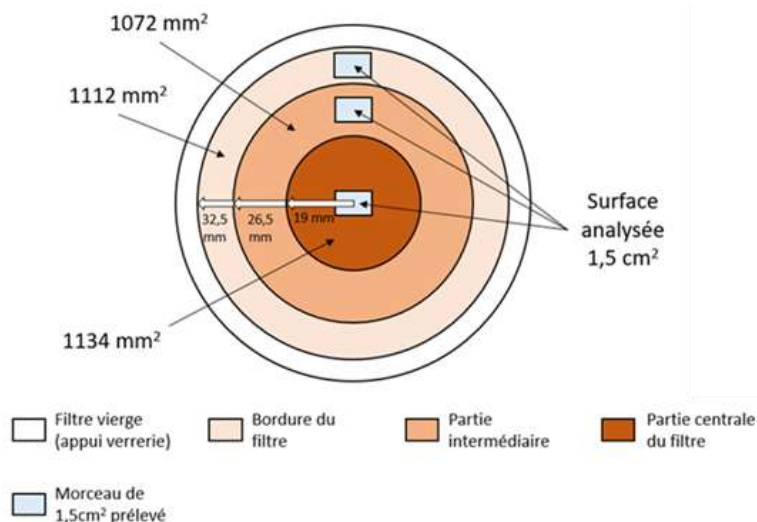


Figure 2 : Schéma des zones de prise de poinçons sur le filtre pour l'analyse EC/OC

### 3.7. Caractérisation des combustibles

À la suite de l'étude bibliographique, une phase de caractérisation des combustibles a été réalisée. En effet, la composition et les caractéristiques des combustibles sont des éléments primordiaux à connaître avant la réalisation des essais, puisqu'elles peuvent influencer l'émission de certains polluants.

Au total, quinze combustibles ont été analysés : sept types de granulés différents, présents sur le marché national ; huit bûches de hêtre : avec écorce (n = 5) et sans écorce (n = 3) ; ainsi que deux bûches densifiées. Les caractérisations réalisées portaient sur l'humidité, la teneur en cendres, le pouvoir calorifique et la composition chimique. De manière globale, les sept types de granulés présentaient des caractéristiques similaires. Toutefois, certaines différences ont conduit à la sélection de trois types de granulés parmi les sept analysés, afin d'être utilisés pour la suite de l'étude, selon les critères suivants :

- Le granulé présentant globalement 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. Ce critère se justifie par l'enjeu de diversifier les essences composant les granulés. Ces granulés, encore peu utilisés, ont vocation à se développer ;
- Le granulé présentant la teneur en carbone la plus faible. Ce choix s'est justifié par une teneur en carbone de 46,8 % pour ce granulé (contre 50 % minimum pour les autres). Cependant, ce granulé a finalement présenté une teneur en carbone similaire aux deux autres granulés utilisés lors de la caractérisation finale pour le projet.

La sélection des trois granulés destinés à la réalisation des essais de combustion s'est appuyée sur une première caractérisation de sept granulés. Une fois les trois types de granulés choisis selon les critères précédemment exposés, une nouvelle caractérisation a été réalisée sur les lots de granulés utilisés pour le projet. En effet, la fabrication des granulés peut varier en fonction de la période de production, des arrivages de bois ou d'autres paramètres. Ainsi, certaines caractéristiques peuvent différer pour un même type de granulés.

Les résultats de la caractérisation des combustibles sélectionnés (bûches et granulés) pour la réalisation des essais du projet PERICLES sont présentés en détail dans l'Annexe 1.

### 3.8. Protocole d'essai

#### 3.8.1. Protocole d'essai pour l'appareil à granulés

Pour le poêle à granulés, les essais sont réalisés en se basant sur le protocole BeReal. Ce protocole comporte plusieurs phases (Figure 3) : la phase 1a correspond à un allumage à froid à puissance maximale.

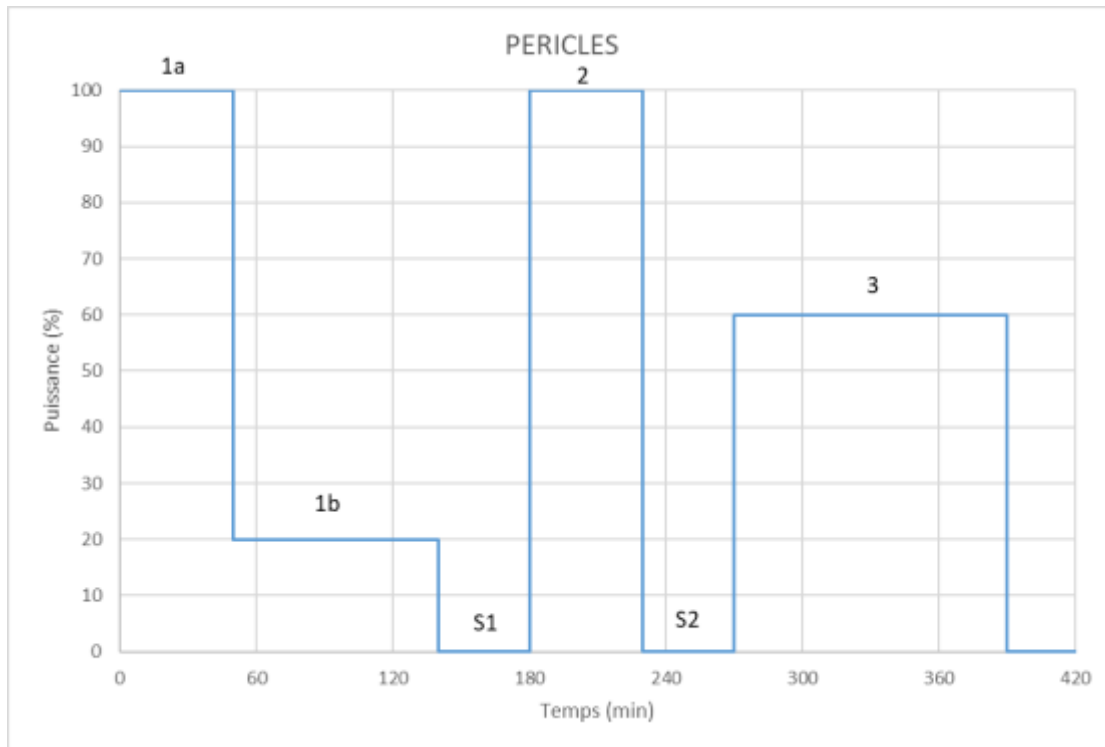


Figure 3 : Profil de puissance suivant le protocole BeReal pour l'appareil à granulés

La durée de cette phase débute à l'apparition d'une valeur de CO supérieure à 10 ppm. Cette phase est ensuite suivie de la phase 1b, réalisée à puissance minimale (soit 20 % de la puissance nominale de l'appareil). La phase 2 correspond à un allumage à chaud à puissance maximale, tandis que la phase 3 représente un fonctionnement à puissance intermédiaire (60 % de la puissance nominale). Les séquences S1 et S2 sont des périodes courtes durant lesquelles l'appareil est complètement éteint. Au cours du protocole d'essai, la vitesse du ventilateur est ajustée manuellement pour maintenir le tirage à 12 +/- 2 Pa. Le protocole appliqué requiert que le système de régulation de température du poêle soit désactivé.

En phases 1a, 1b et 3, des prélèvements MPS sont réalisés pour analyse par MEB et EDX, pour avoir accès aux informations morphologiques et de composition élémentaire.

En fin de séquence d'essai, avant l'extinction du poêle, les vannes sont basculées pendant 10 minutes pour vérifier le taux de dilution effectif sur la base de la mesure CO<sub>2</sub>. Le poêle et les équipements de mesure (diluteurs et DMS500) sont nettoyés après chaque journée d'essai.

Pour la réalisation des essais de combustion, trois granulés différents sont utilisés pour explorer les différences entre les combustibles, avec un prélèvement positionné à 8 diamètres en aval du coude (conformément au protocole BeReal). Afin d'évaluer l'effet de la position du point de prélèvement, des essais avec prélèvement à 4 et 12 diamètres en aval sont réalisés, uniquement avec le granulé 1.

### 3.8.2. Protocole d'essai pour l'appareil à bûches

Les essais sont réalisés sur la base du protocole BeReal pour les appareils à bûches (Figure 4), avec quelques ajustements. Notamment, l'allure partielle est remplacée par une allure réduite. En effet, la dégradation de la combustion du bois peut survenir dans deux situations : lorsqu'elle est réalisée avec un défaut d'air (allure réduite, en intervenant directement sur les entrées d'air), ou avec un excès d'air trop important (allure partielle, en réduisant la charge en combustible introduite dans la chambre de combustion, généralement sans modifier les entrées d'air).

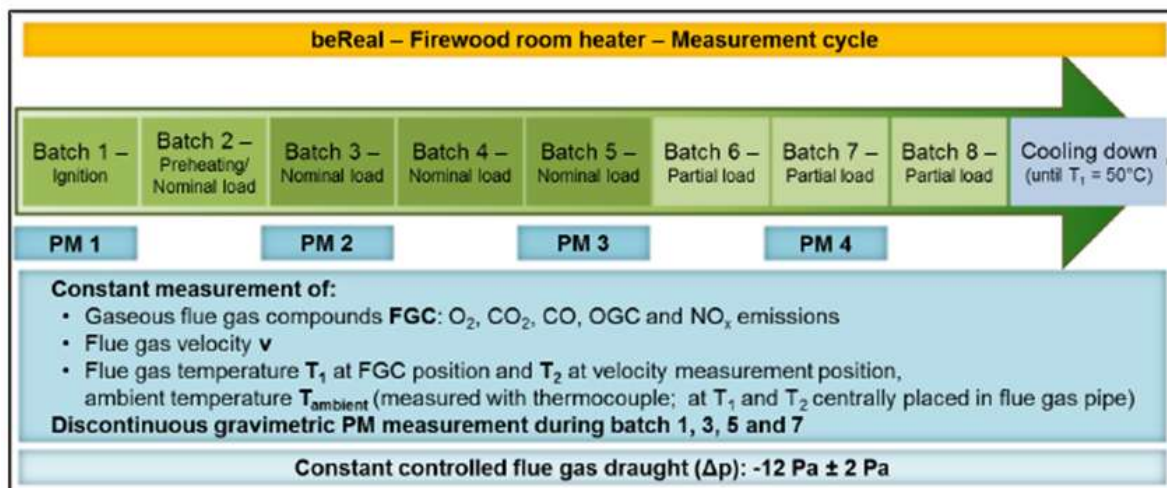


Figure 4 : Protocole BeReal pour les appareils à bûches

Quatre types de combustible sous forme de bûches sont testés : deux bois bûches (hêtre avec et sans écorce) et deux bois compressés (bûches densifiées A & bûches densifiées B). La charge de bois est déterminée en fonction de la puissance de l'appareil et des indications de sa notice d'utilisation. Lors du démarrage à froid, le foyer est chargé avec 3 kg de bois sec (le même bois que celui utilisé pour l'ensemble de l'essai). Lors d'un démarrage à chaud, 1,5 à 2 kg de bois sous forme de deux demi-bûches sont introduits. Lorsque le poêle fonctionne à allure nominale, l'entrée d'air est réglée en position de puissance nominale. En allure réduite, l'arrivée de l'air est réduite en changeant la position du loquet de l'entrée de l'air primaire. 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  $\text{CO}_2$  atteint maximum 4 %, et qu'une réserve suffisante de braises est atteinte (lit de braises d'environ 3 cm). Les prélèvements de particules débutent immédiatement après l'introduction de la charge dans l'appareil. Afin de protéger les instruments de mesure en continu (DMS500 et ELPI+) contre les fortes concentrations de particules, les prélèvements de particules sont arrêtés lors des batch 2, 4, et 6.

Un préchauffage du DMS500 et des diluteurs pendant 30 minutes est nécessaire avant de démarrer les mesures. Un auto-zéro du DMS500 a été effectué à la fin de chaque batch de mesure. Un nettoyage des instruments (DMS500, ELPI+, eDiluteur) a été réalisé tous les 3 à 4 jours d'essais.

Lors des essais, la vitesse du ventilateur est ajustée manuellement pour maintenir le tirage à  $12 \text{ Pa} \pm 2$ . La masse de bois brûlé au cours de chaque essai est relevée. A la fin de chaque journée, les cendres sont récupérées et pesées, et les taux de dilution sont vérifiés.

Au total, 20 jours d'essais ont été réalisés au cours de deux campagnes de mesures successives :

- Première campagne : des prélèvements ont été effectués à une hauteur de 8D (hauteur définie par le protocole Be Real), avec trois jours de répétition par type de bois. Les mesures par DMS500 et ELPI+ ainsi que les mesures des gaz de combustion sont effectuées chaque jour. Les prélèvements DGI et MPS ne sont réalisés que le troisième jour de répétition pour chaque type de bois.
- Deuxième campagne : cette campagne visait à étudier l'effet de la hauteur de prélèvement sur les émissions de particules en nombre. Des prélèvements ont été réalisés à deux hauteurs différentes, 4D et 12D, avec trois jours de répétition à chaque hauteur. Un seul type de bois a été utilisé pour cette campagne : du hêtre avec écorce. Les prélèvements MPS ont été effectués uniquement le troisième jour de chaque série.

### 3.9. Traitement des données

Étant donné le volume de données important, le LNE et l'Ineris ont automatisé leur traitement de données. Les données sont présentées comme suit.

### 3.9.1. Données temporelles

- Évolution temporelle des grandeurs mesurées pendant l'essai :
  - Concentration des gaz de combustion dans les fumées
  - Masse du combustible consommée (LNE)
  - Concentration en nombre de particules PM<sub>1</sub> dans les fumées (en intégrant la dilution)
  - Concentration en nombre de particules ultrafines dans les fumées (en intégrant la dilution)
  - Granulométries instantanées sur les transitoires et les instabilités observées (LNE), ainsi que pendant les différentes allures de fonctionnement (Ineris)

### 3.9.2. Moyennes

- Granulométries moyennes sur les différentes phases (avec 1σ expérimental associé pour le LNE et l'Ineris)
- Débit massique de combustible pour chaque phase (LNE)
- Taux de dilution calculé
- Concentration massique des composants chimiques étudiés (EC/OC, sels, métaux) de la fraction PM<sub>0,2</sub> en fonction du type de bois bûche et de l'allure de combustion (Ineris)

### 3.9.3. Microscopie électronique couplée à l'EDX

Le traitement des données issues de la microscopie électronique (MET ou MEB) couplée à l'EDX repose sur plusieurs étapes essentielles. Dans un premier temps, chaque grille est évaluée en fonction de la quantité de matière déposée (faiblement, moyennement ou fortement chargée), afin d'assurer une comparaison pertinente entre échantillons. Les particules observées sont ensuite classées en différentes catégories selon leur taille et leur morphologie (particules amorphes, agrégats de particules fines, particules sphériques, etc.). Une cartographie élémentaire est réalisée pour les particules préalablement classées, de manière à caractériser leur composition chimique. Enfin, la comparaison des grilles provenant de différents types de combustibles ou de diverses allures de combustion est effectuée en s'appuyant sur ces critères - quantité de matière (charge), morphologie et composition chimique - afin d'identifier d'éventuelles différences significatives entre conditions d'essai.

### 3.9.4. Exploitation des données sous forme de facteurs d'émission

Afin de comparer les émissions particulaires 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<sup>-1</sup>), permettent de rapporter les émissions en nombre de PM<sub>1</sub> ou 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<sub>1</sub> ou PUF dans les fumées (particules.m<sup>-3</sup>), « D<sub>v</sub> » le débit volumique des fumées (m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>), « M<sub>h</sub> » la masse brute de combustible consommée par heure (kg.h<sup>-1</sup>) et « PCI » le pouvoir calorifique inférieur du combustible brut (kJ.kg<sup>-1</sup>). Le facteur 1000 permet la conversion de l'énergie de kJ en MJ.

Les concentrations en particules et le débit massique de combustible sont mesurés expérimentalement pour chaque phase de fonctionnement. En revanche, la détermination du débit basée sur une mesure de la vitesse d'éjection des fumées présente des difficultés et des incertitudes importantes lorsque celle-ci est inférieure à 2 m.s<sup>-1</sup>, comme c'est le cas dans le conduit de fumées de poêles à bûches ou à granulés. Dans ce cas, le débit de fumées est estimé à partir d'autres paramètres mesurés, selon la

méthode décrite dans la norme NF EN 16510. Cette approche permet d'assurer la comparabilité des facteurs d'émission entre les différents appareils et conditions de fonctionnement.

## 4. Résultats expérimentaux et discussions

Dans cette partie, les résultats expérimentaux obtenus sur l'ensemble des combustibles sont présentés. Les profils temporels d'émissions sont d'abord décrits, avec un focus sur les phases transitoires observées. Les distributions granulométriques moyennes pour chaque phase sont ensuite présentées, puis les facteurs d'émission sont calculés. Enfin, les observations en microscopie électronique sont également rapportées et discutées.

### 4.1. Essais sur la combustion de granulés

Pour rappel, 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 % feuillu – 20 % résineux, granulé 2).

Une analyse de la composition des granulés révèle :

- Une humidité très similaire pour tous les granulés (5 à 6 %) ;
- Un taux de cendres un peu plus élevé pour le granulé 3 (0,6 %) que pour les deux autres (0,29 et 0,48 % pour les granulés 1 et 2 respectivement) ;
- Un PCI similaire pour tous les granulés (17,5 MJ.kg<sup>-1</sup>).

Le protocole d'essais comprend un allumage à froid (Puissance 100 %), suivi d'une phase de puissance réduite (Puissance 20 %). S'ensuit une phase d'attente avec extinction du poêle, puis un démarrage à chaud (Puissance 100 %). Après une seconde phase d'extinction, le poêle est redémarré à puissance intermédiaire (Puissance 60 %).

Ce protocole a été réalisé pour chacun des trois granulés testés, avec trois répétitions par combustible. Les prélèvements sont effectués à une hauteur de 8D au niveau du conduit d'évacuation des fumées (D étant le diamètre interne du conduit), conformément au protocole BeReal.

Des essais supplémentaires sont réalisés à 4D (conformément à la norme NF EN 16510) et à 12D, en utilisant uniquement le granulé 1, afin d'étudier l'influence de la hauteur de prélèvement sur l'émission des PUF en particulier.

Les mesures par DMS500, ainsi que les mesures des gaz de combustion, sont effectuées en continu pendant la journée d'essai. Les prélèvements MPS ne sont réalisés que sur une seule des trois journées de répétition pour chaque type de granulé (un prélèvement par niveau de puissance).

Les résultats de ces essais sont présentés dans les parties suivantes.

#### 4.1.1. **Données temporelles**

Lors des essais, les profils temporels d'émissions de gaz et de particules ont montré des tendances similaires pour les paramètres mesurés entre les différentes journées d'essais, pour les trois types de granulés et aux trois hauteurs de points de prélèvement. Ainsi, pour ne pas alourdir inutilement le document, seul l'essai numéro 3 réalisé sur le granulé 1, avec un prélèvement à 8 diamètres en aval du coude sera détaillé extensivement dans cette partie.

La Figure 5 présente les profils temporels de concentrations en gaz et en particules (PM<sub>1</sub> et PUF), ainsi que la consommation de granulés. L'ombrage de la figure correspond aux différentes phases de la courbe de puissance présentée en Figure 3, et l'identification des différentes phases de chauffe est également rapportée sur la figure.

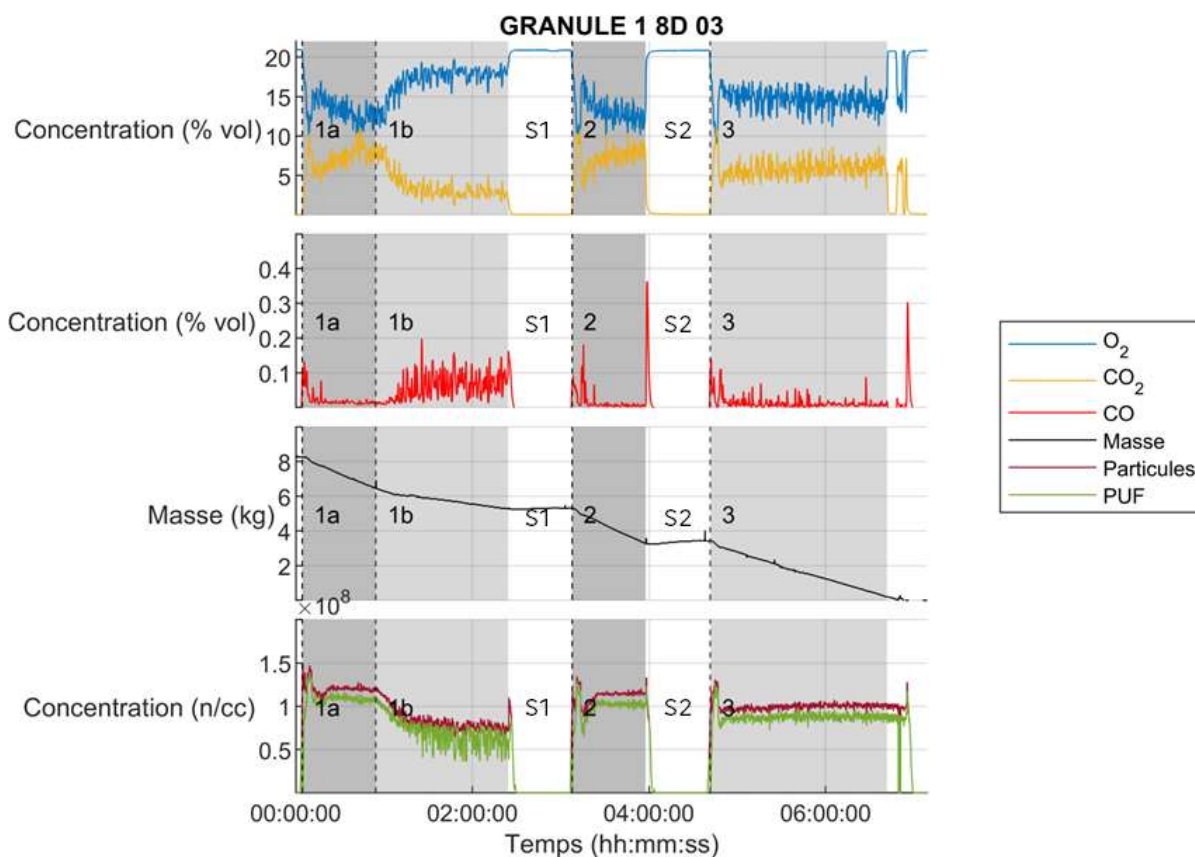
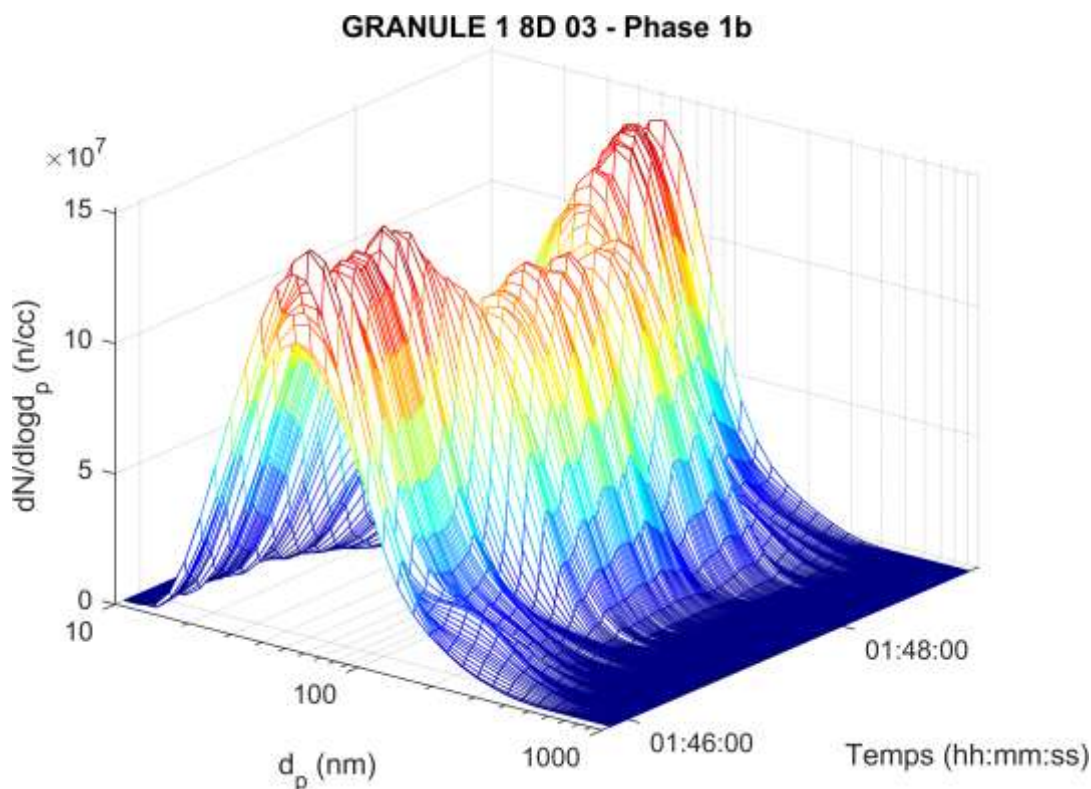


Figure 5 : Evolution temporelle des émissions de gaz et de nombre de particules (PUF et  $PM_{10}$ ), ainsi que de la consommation de granulés - Granulé 1 –  
 Prélèvement à 8 diamètres en aval - Essai n°3, avec le protocole constitué d'un allumage à froid (Phase 1a Puissance 100 %) ; d'une phase à puissance réduite (Phase 1b – Puissance 20 %) ; d'un démarrage à chaud (Phase 2 – Puissance 100 %) ; d'une phase à puissance intermédiaire (Phase 3 – Puissance 60 %) ; et de deux phases d'extinction du poêle (S1 et S2).

La dépendance des concentrations en particules au niveau de puissance du poêle est mise en évidence, ainsi que les transitoires de démarrage, d'extinction et de changement de niveau de puissance. Ces transitoires seront éliminés pour l'étude des grandeurs moyennes.

En phase 1b (phase réduite, puissance 20 %), des instabilités synchronisées des concentrations en CO et en particules sont observées. Ces instabilités sont également observées sur la distribution granulométrique, présentée à la Figure 6 sous forme d'un empilement de distributions granulométriques au cours du temps. Elles se manifestent par la baisse du premier mode (60 nm) et l'apparition d'un second mode (200 nm), sur une durée de 30 à 60 secondes. Ce phénomène est observé en phase de puissance réduite pour tous les granulés et tous les points de prélèvement. Les concentrations en CO mesurées lors de ces instabilités augmentent fortement (plusieurs milliers de ppm), signe d'une dégradation de la combustion.

Une explication possible de ce phénomène est une instabilité de l'alimentation en combustible du poêle. Les granulés sont transportés du réservoir vers la chambre de combustion par une vis sans fin, et tombent dans le foyer par gravité. A puissance réduite, la vis tourne très lentement, et il est possible que les granulés tombent par paquet dans le foyer. Le poêle ne disposant pas de moyen de détecter ces phénomènes, il maintient le même niveau d'alimentation en air, ce qui conduit à une combustion ponctuellement sous-ventilée. Cette sous-ventilation génère de grandes quantités de matières organiques imbrûlées, qui se condensent en aval sous forme de particules. Cette combustion sous-ventilée génère également de grandes quantités de monoxyde de carbone.



*Figure 6 : Evolution temporelle de la distribution granulométrique des particules lors d'une instabilité de combustion du poêle à granulés – Granulé 1 – Prélèvement à 8 diamètres en aval – Essai n°3 – Phase 1b (puissance 20 %)*

La Figure 7 représente la variation de la granulométrie instantanée au cours du démarrage du poêle, sous forme d'un empilement de distribution granulométriques au cours du temps. Les particules émises sont initialement très petites (environ 20 nm) et peu nombreuses. Cette phase correspond visuellement à une absence de flamme dans le foyer. Une augmentation soudaine du nombre de particules est ensuite observée, ainsi que de leur diamètre (mode à 200 nm) après environ 5 minutes. Cette augmentation est liée à l'apparition d'une flamme stable dans le foyer. La granulométrie se stabilise ensuite, après quelques oscillations liées à la régulation du poêle.

La Figure 8 présente l'évolution temporelle du ratio entre la concentration de PUF et de PM<sub>1</sub> dans les fumées. Ce ratio permet d'évaluer la proportion de PUF dans les particules émises. Il est globalement stable durant chacune des phases, aux alentours de 90 %, à l'exception de la phase 1b (phase réduite, puissance 20 %). Durant cette phase, les instabilités de combustion identifiées précédemment réduisent ponctuellement le ratio, jusqu'à environ 50 %.

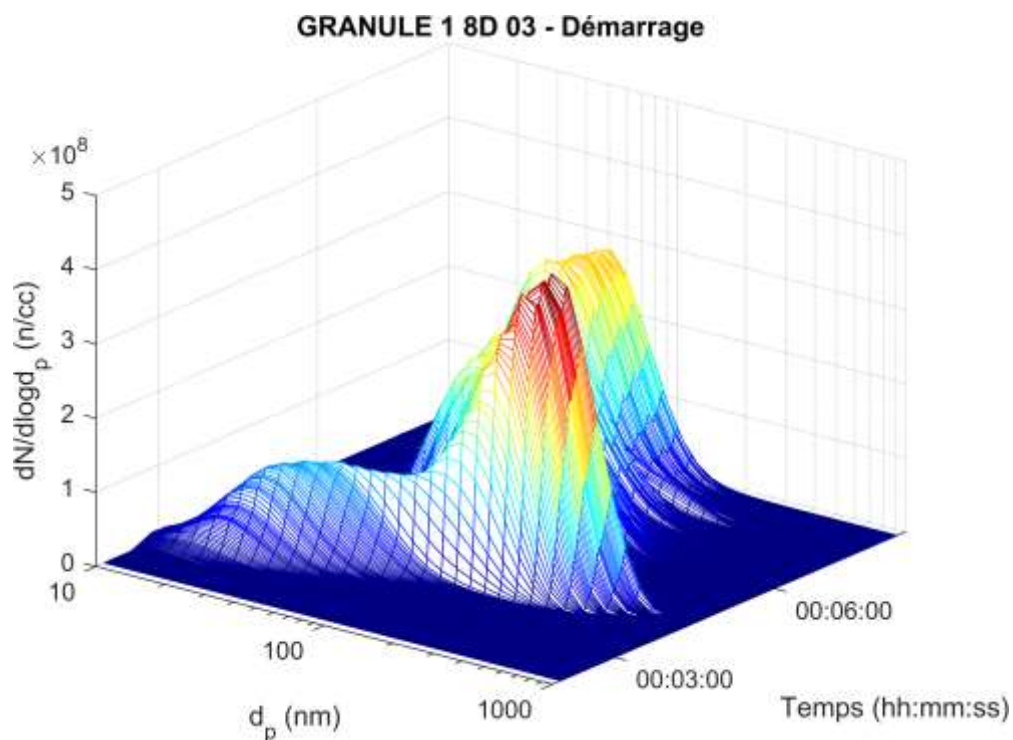


Figure 7 : Évolution temporelle de la distribution granulométrique des particules émises pendant le transitoire de démarrage – Granulé 1 – Prélèvement à 8 diamètres en aval – Essai n°3

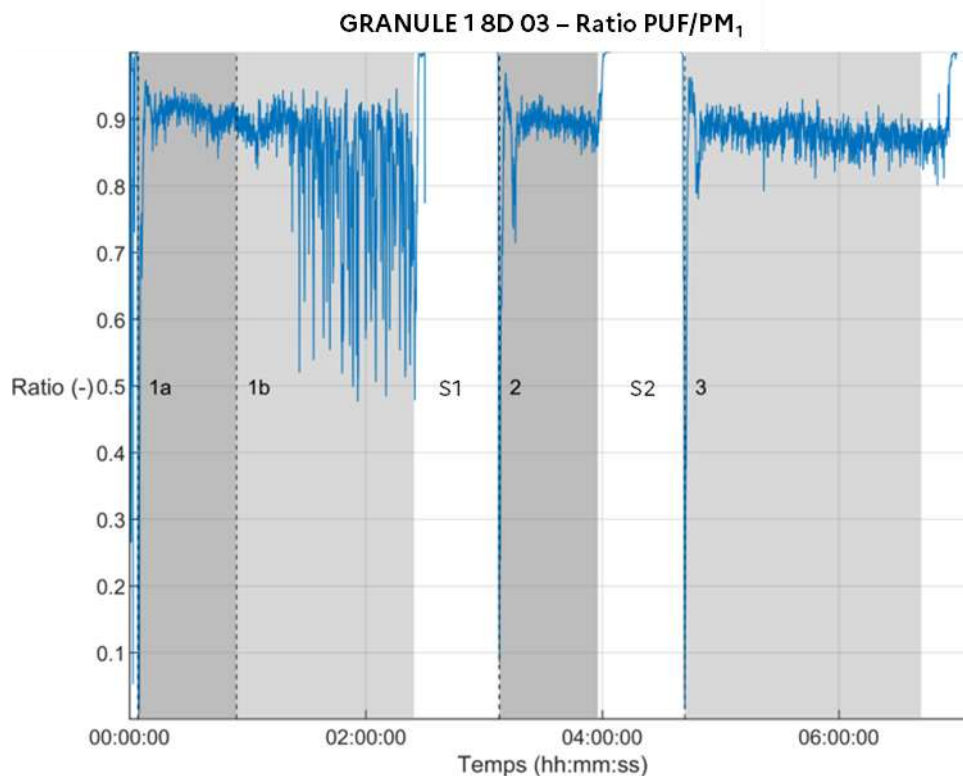


Figure 8 : Ratio PUF/Particules PM<sub>1</sub> en fonction du temps – Granulé 1 – Prélèvement à 8 diamètres en aval – Essai n°3, avec le protocole constitué d'un allumage à froid (Phase 1a Puissance 100 %) ; d'une phase à puissance réduite (Phase 1b – Puissance 20 %) ; d'un démarrage à chaud (Phase 2 – Puissance 100 %) ; d'une phase à puissance intermédiaire (Phase 3 – Puissance 60 %) ; et de deux phases d'extinction du poêle (S1 et S2).

### 4.1.2. Distributions granulométriques moyennes

La Figure 9 représente les distributions granulométriques moyennes mesurées par le DMS500 pendant chacune des phases stables de l'essai n°3 du granulé 1. La durée minimale d'une phase stable est de 1000 secondes, la ligne pleine est la moyenne sur cette phase stable et la bande correspond à l'écart-type sur la durée de la phase stable, reflétant ainsi la variation temporelle des mesures.

Les granulométries observées sont différentes en fonction des niveaux de puissance du poêle. Les phases 1a et 2 (100 % de la puissance nominale) sont très similaires en termes de position du mode (environ 60 nm) et d'amplitude de la distribution, la variation temporelle étant très faible et la distribution est monomodale.

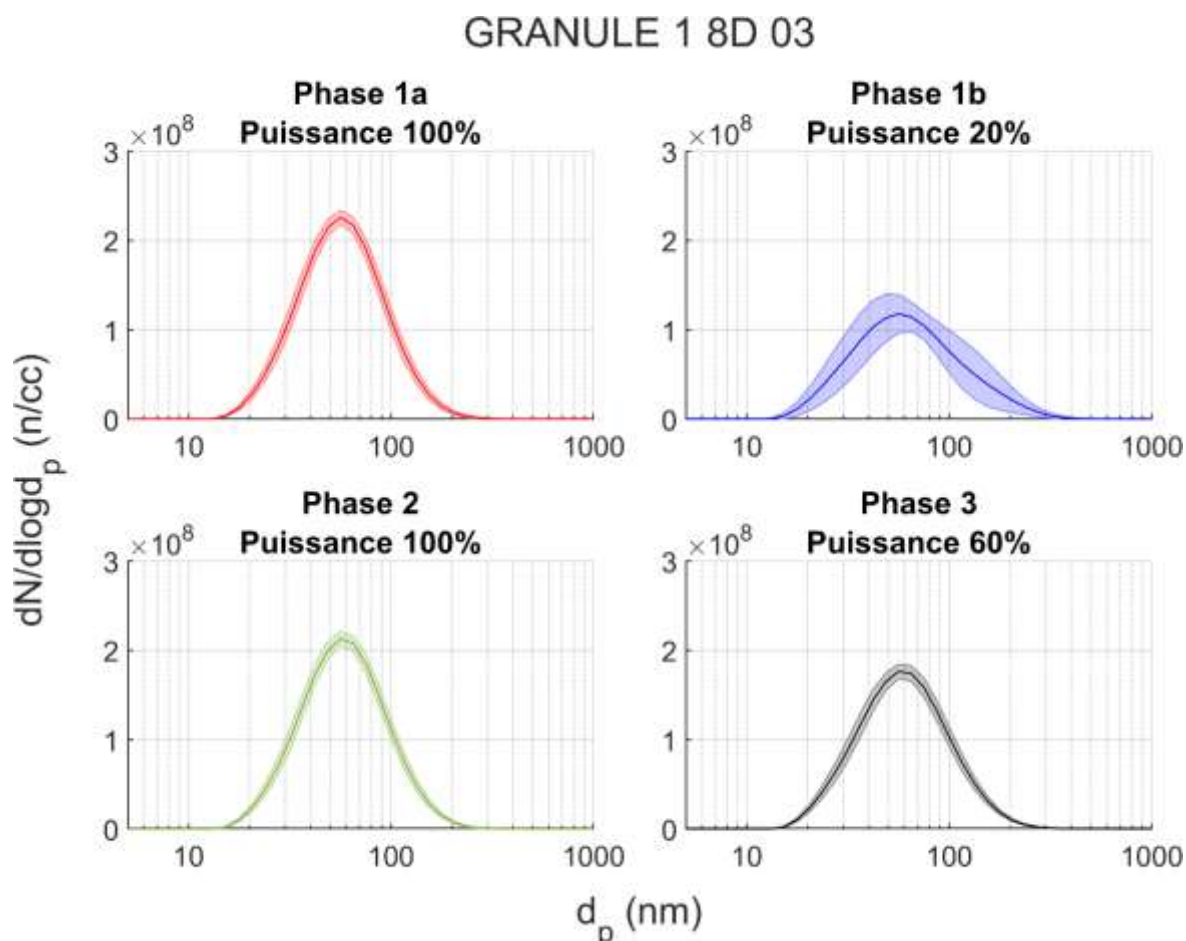


Figure 9 : Distribution granulométriques moyennes par phases – Granulé 1 – Prélèvement à 8 diamètres en aval – Essai n°3 – De gauche à droite et de haut en bas : Phase 1a (Puisance 100 %) – Phase 1b (Puisance 20 %) – Phase 2 (Puisance 100 %) – Phase 3 (Puisance 60 %).

En phase 1b (20 % de la puissance nominale), la distribution granulométrique reste centrée sur 60 nm, mais présente un étalement marqué vers les grands diamètres, ainsi qu'une dispersion temporelle importante, liés aux phénomènes d'instabilités évoqués précédemment.

Durant la phase 3 (60 % de la puissance nominale), la distribution reste centrée sur 60 nm.

Le Tableau 1 présente les débits massiques moyens de combustible consommé pour chacune des phases (moyenne sur trois essais) avec le granulé 1, ainsi que les écart-types associés. Les valeurs obtenues sont en accord avec la déclaration de performance du poêle et sont similaires pour les autres combustibles.

Phase	Débit moyen de combustible (kg.h <sup>-1</sup> ) 1)	Ecart-type
1a – Puissance 100 %	2,15	0,13
1b – Puissance 20 %	0,73	0,03
2 – Puissance 100 %	2,47	0,09
3 – Puissance 60 %	1,47	0,04

Tableau 1 : Consommation de combustible par phases de combustion pour le granulé 1 (moyenne sur trois essais répétés)

La contribution des PUF au nombre de particules PM<sub>1</sub> a également été calculée pour chaque phase (sur trois essais répétés) (Tableau 2). Pour l'ensemble des granulés testés, les valeurs sont relativement proches, comprises entre 83 et 91 %.

Phase	Granulé 1	Granulé 2	Granulé 3
	PUF/PM <sub>1</sub> (%)	PUF/PM <sub>1</sub> (%)	PUF/PM <sub>1</sub> (%)
1a – Puissance 100 %	90,9	86,2	87,0
1b – Puissance 20 %	83,6	84,3	85,2
2 – Puissance 100 %	90,4	85,9	86,0
3 – Puissance 60 %	88,4	83,0	83,1

Tableau 2 : Contribution des PUF au nombre de particules PM<sub>1</sub> obtenue pour différents granulés et phases de combustion

#### 4.1.3. Facteurs d'émission

Afin de pouvoir comparer les émissions particulières des différents combustibles et des différentes configurations de prélèvements, des facteurs d'émission en nombre de particules (PM<sub>1</sub> et PUF) par énergie entrante ont été calculés selon la méthode décrite précédemment (section 3.8.2). Les résultats seront présentés et discutés dans les sections suivantes.

### 4.1.3.1. Comparaison des granulés étudiés

Les facteurs d'émission en nombre de particules  $PM_{10}$ , exprimés en moyennes journalières dans les fumées, pour les trois types de granulés testés ont été calculés. Ils varient entre  $8 \times 10^{13} \#.MJ^{-1}$  et  $1 \times 10^{14} \#.MJ^{-1}$  (mesures réalisées à 8D) et sont comparables aux données issues de la littérature, qui rapportent des valeurs comprises entre  $10^{13}$  et  $10^{14} \#.MJ^{-1}$  notamment les travaux de Bäfver et al. (2011) ( $3$  à  $5 \times 10^{13} \#.MJ^{-1}$ ) [16], Boman et al. (2011) ( $4 \times 10^{13}$  à  $3 \times 10^{14} \#.MJ^{-1}$ ) [17] et Lamberg et al (2011) ( $3.5 \times 10^{13} \#.MJ^{-1}$ ) [18].

La Figure 10 présente les valeurs moyennes de facteurs d'émission en nombre des particules  $PM_{10}$  obtenues sur trois essais, pour les différents granulés testés et pour chaque phase de combustion. Les barres représentent l'écart-type associé à ces trois essais.

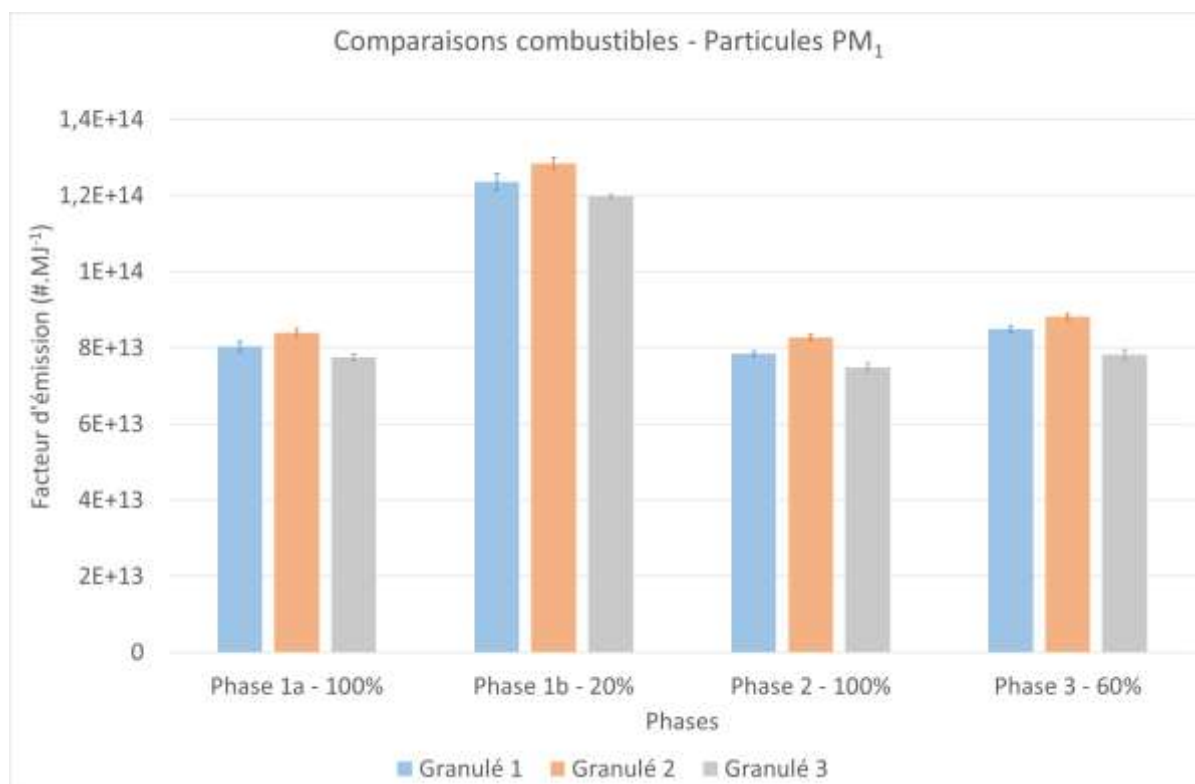


Figure 10 : Facteurs d'émission en nombre par phases – Poêle à granulés – Particules  $PM_{10}$

Les facteurs d'émission associés aux granulés testés sont comparables, le granulé 3 présentant un facteur d'émission légèrement plus faible que les deux autres. Le fonctionnement du poêle à puissance réduite (phase 1b – puissance 20 %) conduit à des facteurs d'émission plus élevés que lors du fonctionnement à puissance nominale (+50 % par rapport à la phase 1a).

La Figure 11 présente la même mesure, mais en ne considérant que les particules ultrafines. Les résultats sont assez similaires à ce qui a été observé plus haut, avec notamment des facteurs d'émission légèrement inférieurs pour le granulé 3. Ce résultat est cohérent avec le fait que les PUF représentent une large majorité en nombre des particules émises (83 à 91 % - cf. Tableau 2).

Ces résultats indiquent que le niveau de puissance du poêle est le principal facteur influençant l'émission de particules. Le fonctionnement à puissance réduite favorise la formation de particules  $PM_{10}$ , via notamment les instabilités de combustion (Figure 10). De plus, quand on ne considère que les PUF (Figure 11), la phase de faible puissance reste de très loin la plus émissive.

Le choix du combustible granulé semble avoir une importance secondaire vis-à-vis des émissions de PUF. Les granulés ayant généralement des propriétés très similaires entre eux, il est difficile de relier

la légère différence à la baisse du facteur d'émission du granulé 3 par rapport aux autres granulés à une différence en termes de propriétés.

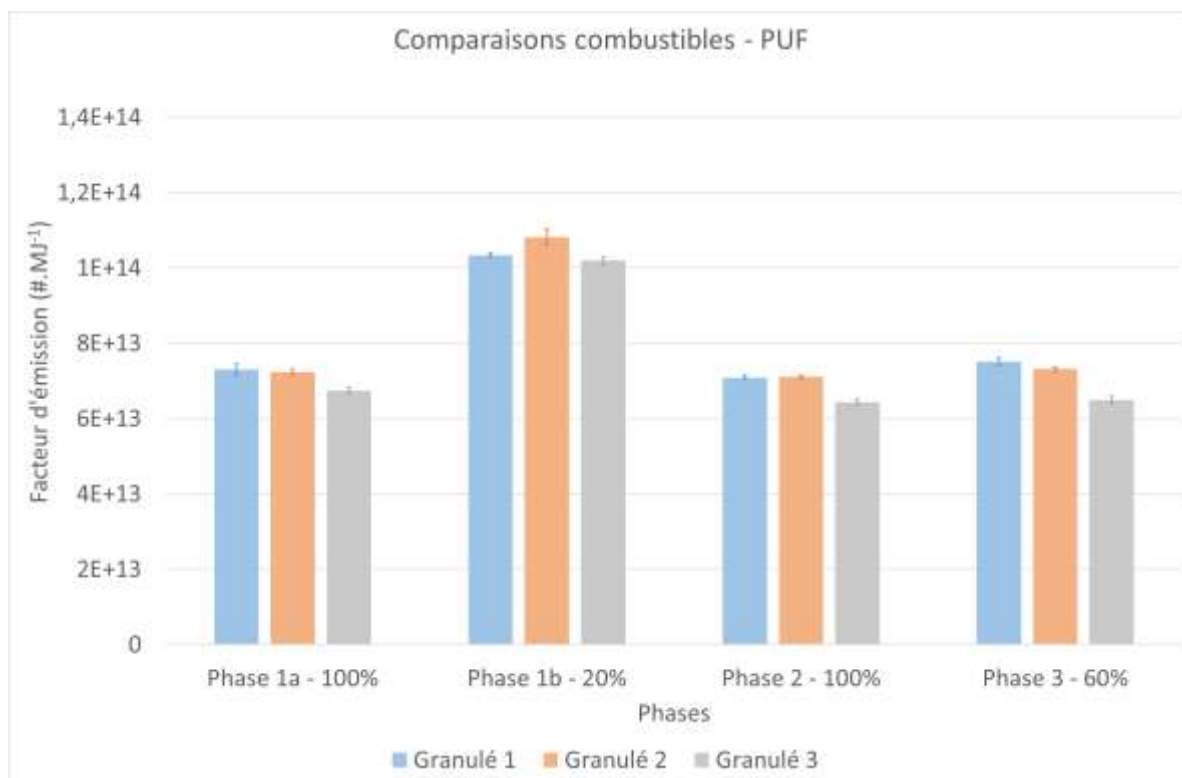


Figure 11 : Facteurs d'émission en nombre de PUF par phases – Poêle à granulés

#### 4.1.3.2. Comparaison en fonction de la position du point de prélèvement dans le conduit

Les essais réalisés avec le granulé 1 ont été répétés en déplaçant le point de prélèvement plus près (4 diamètres) et plus loin (12 diamètres) du coude du conduit en sortie du poêle (voir Figure 1). Le but de ces essais est d'évaluer l'impact de la position du point de prélèvement sur les mesures de particules.

La Figure 12 permet de comparer les facteurs d'émission en nombre de particules PM<sub>1</sub> aux trois positions de prélèvement étudiées, situées respectivement à 4, 8 et 12 diamètres en aval du coude (cf. Figure 1). Les facteurs d'émission mesurés tendent à diminuer lorsque le point de prélèvement se trouve plus en aval du coude, et ce pour tous les niveaux de puissance. Les mêmes tendances sont observées pour les facteurs d'émission en nombre de PUF (Figure 13).

Cependant, les granulométries mesurées à 4 et 12 diamètres en aval (Figure 14) sont comparables en termes de position du mode. Ceci indique que la diminution du nombre de particules entre ces deux points, exprimée par la baisse du facteur d'émission, n'est pas un phénomène sélectif en taille de particules. Il s'agit donc probablement d'un mécanisme générique de dépôt des particules sur les parois du conduit indépendamment de leur taille.

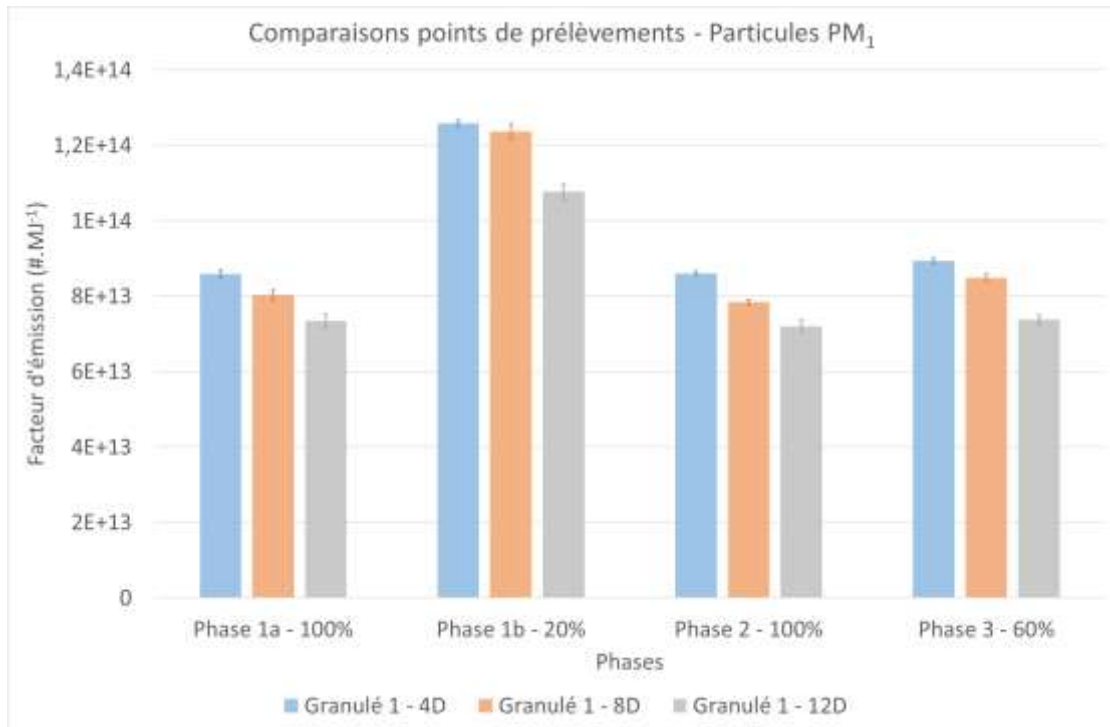


Figure 12 : Facteurs d'émission en nombre de particules PM<sub>1</sub> à différents points de prélèvements pour le granulé 1

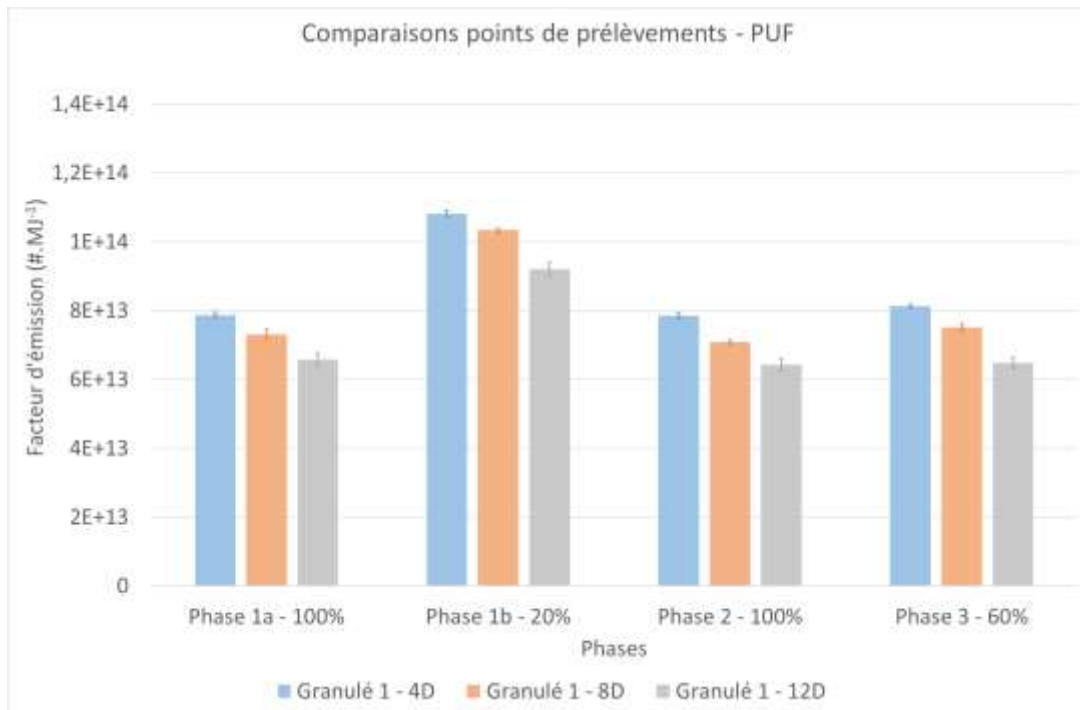


Figure 13 : Facteurs d'émission en nombre de PUF à différents points de prélèvements pour le granulé 1

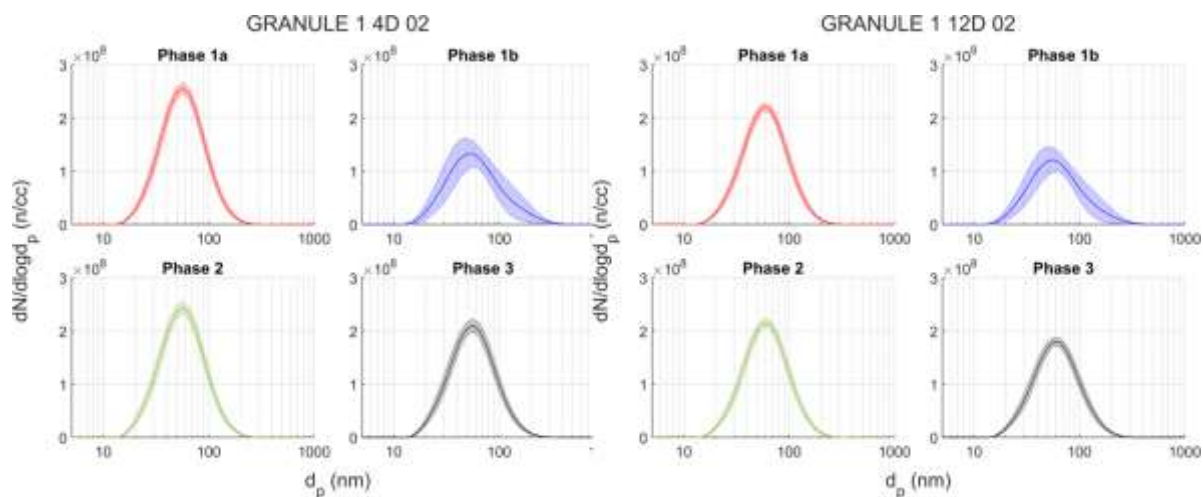


Figure 14 : Comparisons des distribution granulométriques mesurées à 4 (gauche) et 12 (droite) diamètres en aval – Poêle à granulés – Granulé 1. Avec Phase 1a (Puissance 100 %) – Phase 1b (Puissance 20 %) – Phase 2 (Puissance 100 %) – Phase 3 (Puissance 60 %).

#### 4.1.4. Observations microscopiques

Les observations microscopiques n'ont pas mis en évidence de différences marquées entre les particules selon les granulés utilisés et les points de prélèvement. Les figures ci-dessous illustrent les différentes catégories de particules observées au MEB, ainsi que leur composition élémentaire par mesure EDX. Les trois catégories de particules identifiées sont cohérentes avec celles définies par Trojanowski and Fthenakis (2019) [19] :

- Cendres volantes
- Particules de suies
- Carbone organique

La première catégorie de particules observée est du type cendres volantes. Il s'agit de particules relativement grandes (plusieurs micromètres) et présentant une structure en plaquettes, comme présenté sur la Figure 15. La composition élémentaire de ces particules est majoritairement minérale, avec la présence d'éléments comme le Calcium, le Magnésium, le Phosphore et le Silicium. On observe parfois des inclusions de particules de sels (Potassium, Chlore et Sodium), avec une morphologie spécifique liée à la structure cristalline (angles vifs) (voir Figure 16). Ces particules sont assez peu présentes sur les grilles de prélèvement.

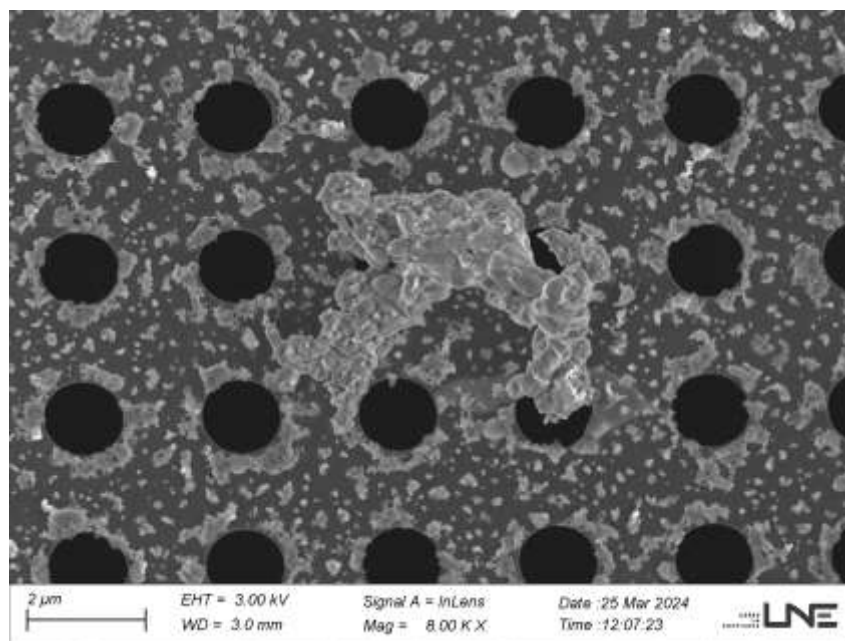


Figure 15 : Observation microscopique de cendres – Poêle à granulés

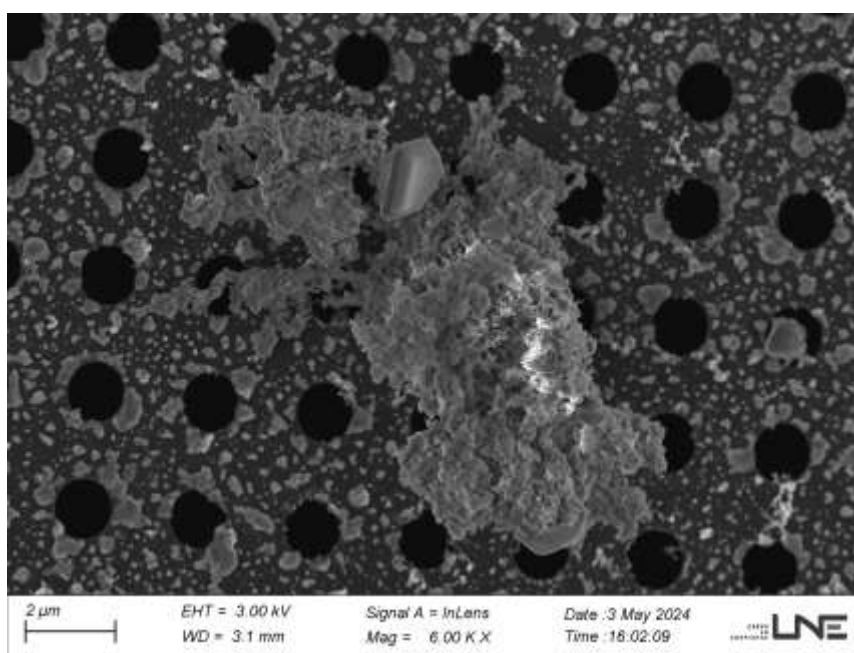


Figure 16 : Observation microscopique de cendres – Poêle à granulés

Une seconde catégorie de particules est constituée de particules de suie. Ces particules sont présentes sous formes d'agrégats de petites particules primaires (diamètre 20 nm). Ces agrégats présentent une structure fractale plus ou moins dense (Figure 17) ou aérée (Figure 18), et peuvent atteindre plusieurs micromètres dans leur plus grande dimension. Ces particules sont très majoritairement composées de carbone, sous forme amorphe, et peuvent parfois comporter une couche de carbone organique adsorbé, ainsi que des cristaux de sels inclus dans l'agrégat.

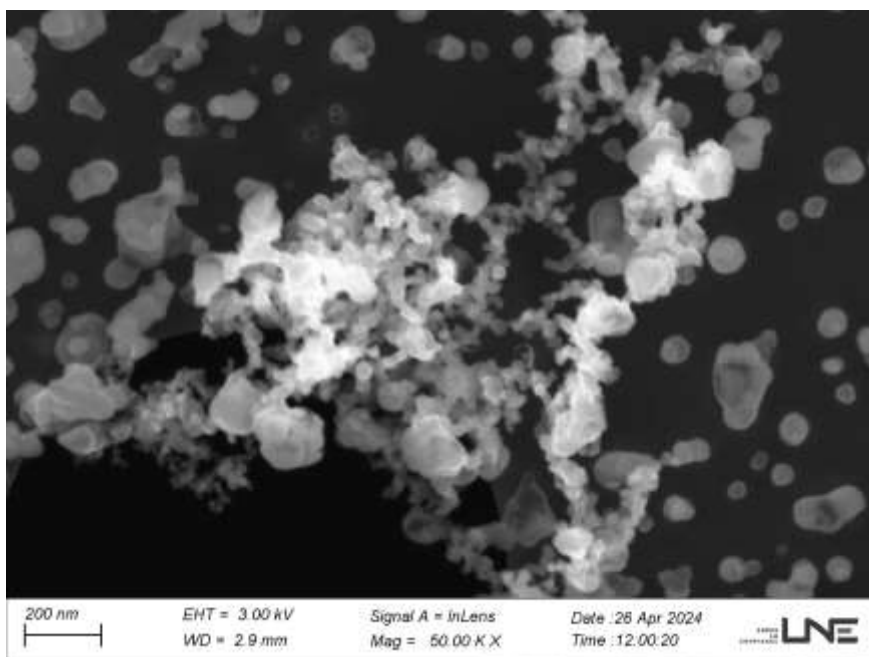


Figure 17 : Observation microscopique de suies – Poêle à granulés

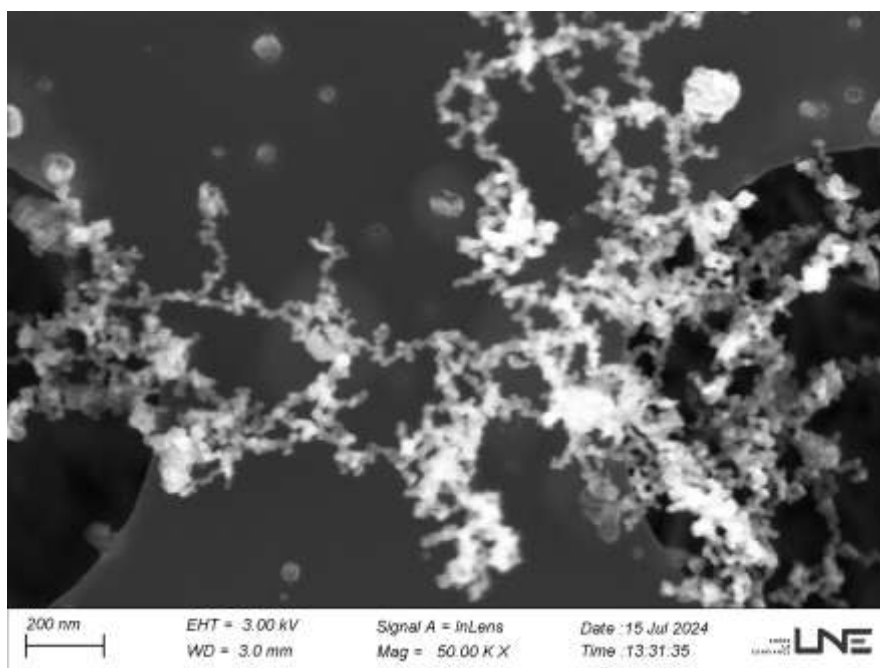


Figure 18 : Observation microscopique de suies – Poêle à granulés

Une troisième catégorie de particules est constituée de particules organiques. Cette catégorie est la plus représentée dans tous les prélèvements réalisés. Ces particules se présentent sous la forme de gouttes plus ou moins grosses (de 20 nm à quelques micromètres, comme présenté dans les Figure 19 et Figure 20), composées majoritairement de carbone et d'oxygène. Ces gouttes se forment par condensation des espèces organiques imbrûlées issues de la chambre de combustion du poêle. Le Potassium et le Soufre sont des éléments également rencontrés dans ces particules, probablement sous la forme de sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ).

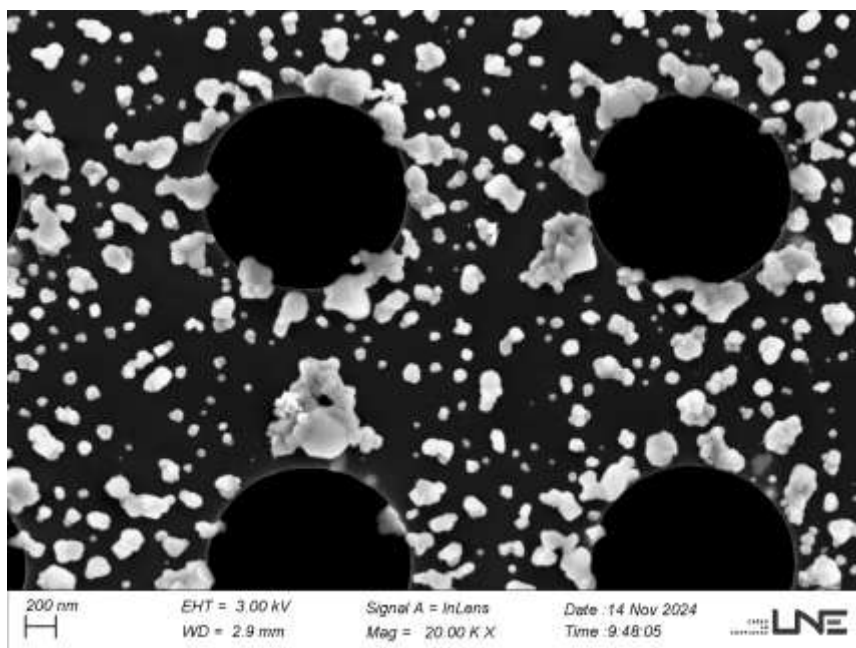


Figure 19 : Observation microscopique de particules organiques – Poêle à granulés

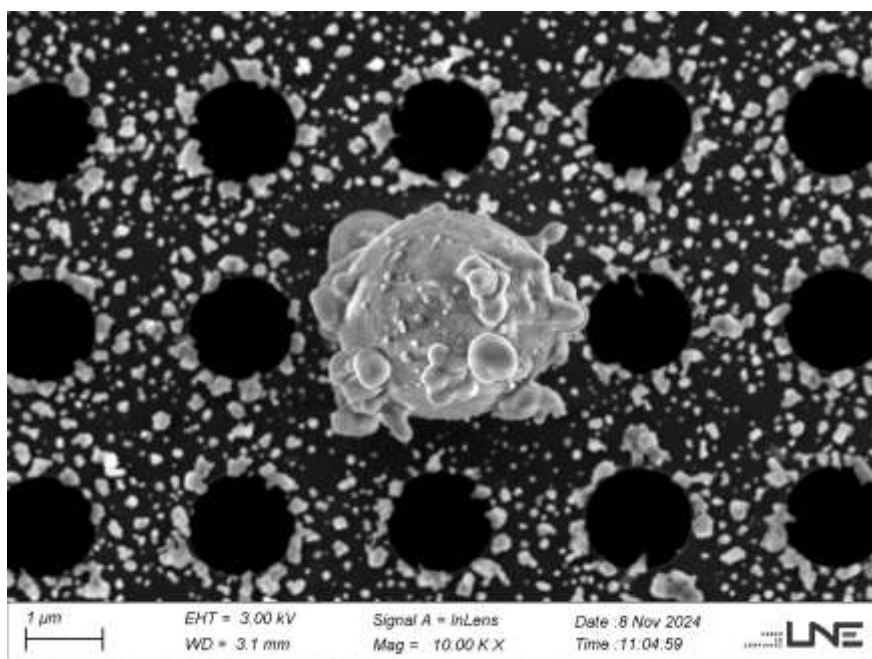


Figure 20 : Observation microscopique de particules organiques – Poêle à granulés

Ces gouttes sont difficiles à étudier avec l'EDX, en particulier les plus fines. En effet, le faisceau de rayon X utilisé tend à disperser les gouttes voire à les évaporer, particulièrement pour les plus petites. Un exemple est présenté Figure 21, où un cliché MEB a été pris avant et après analyse EDX, mettant en évidence l'effet destructeur du faisceau. Ainsi, il est difficile de réaliser spécifiquement une analyse élémentaire exhaustive (incluant les particules de nature organique) par EDX de la fraction de particules ultrafines. Cette difficulté avait été notée dans la revue de littérature de Trojanowski and Fthenakis (2019) [19].

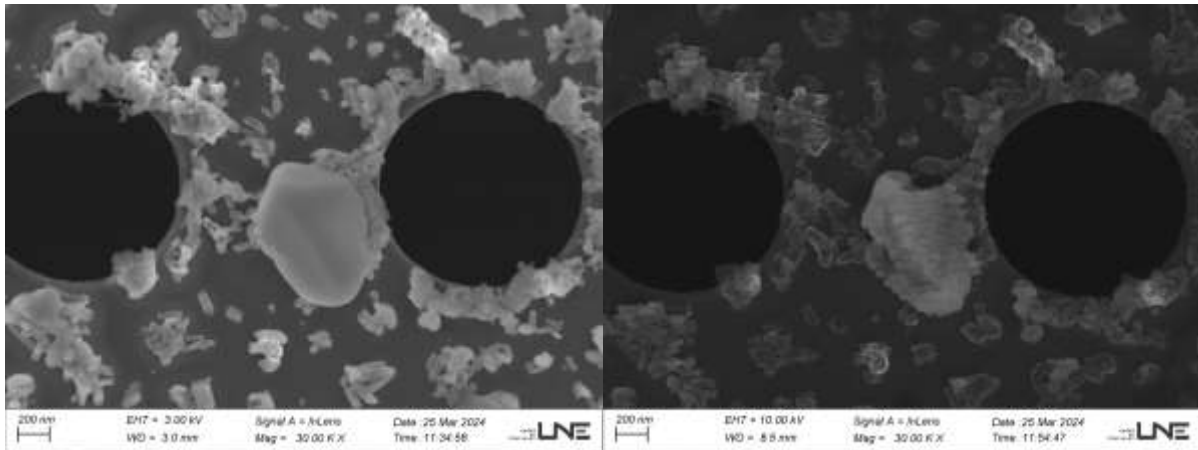


Figure 21 : Effet du faisceau de rayons X sur les particules organiques (gauche : avant analyse EDX – droite : après analyse EDX) – Poêle à granulés

### Conclusion sur les observations microscopiques

Les observations de microscopie électronique ont permis d'identifier les trois catégories de particules usuellement rencontrées dans des effluents de combustion de bois :

- Cendres volantes, comprenant beaucoup d'espèces minérales
- Particules de suies, à base de carbone élémentaire
- Gouttelettes de carbone organique

La microscopie électronique couplée à l'EDX permet en outre d'obtenir des informations de composition atomique des différentes particules observées, mais les particules de carbone organique sont difficiles à étudier par cette méthode, car celles-ci ne supportent pas bien le faisceau de rayons X. Une autre limitation intrinsèque de la méthode EDX est qu'il s'agit uniquement d'une analyse élémentaire. Il serait intéressant de disposer d'un moyen d'analyse de la composition moléculaire des PUF.

### 4.1.5. Récapitulatif des résultats d'émissions de particules avec les granulés

#### 4.1.5.1. Influence du combustible et de l'allure sur les émissions de particules en nombre (PM<sub>1</sub> et PUF)

- Le niveau de puissance du poêle à granulés est le principal facteur d'influence des émissions de particules en nombre : la phase de faible puissance (20 %) est la plus émissive en termes de nombre de particules PM<sub>1</sub> et PUF.
- Les émissions de particules en nombre sont très majoritairement composées de PUF (83 à 91 %), quelle que soit la phase de combustion. La distribution granulométrique est monomodale centrée à 60 nm, quelle que soit la phase de combustion, mais sa variabilité temporelle est très faible en puissance nominale et augmente lors du fonctionnement du poêle à faible puissance.
- Les facteurs d'émission en nombre de particules sont cohérents avec la littérature existante ( $10^{13} - 10^{14} \# \cdot \text{MJ}^{-1}$ ).
- Les propriétés des granulés ne semblent pas avoir d'effet significatif sur les émissions de PUF. Le granulé 3 donne des facteurs d'émission légèrement plus faibles que les deux autres granulés.
- Les instabilités de combustion à faible puissance provoquent des transformations granulométriques, avec l'apparition d'un second mode autour de 200 nm et une diminution du premier mode (60 nm). 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.

#### 4.1.5.2. Effet de la hauteur du point de prélèvement

- Plus le point de prélèvement est placé loin en aval du poêle à granulés, plus les facteurs d'émission en nombre de PUF et PM<sub>1</sub> diminuent.
- Le déplacement du point de prélèvement ne provoque pas de modification significative de la répartition granulométrique des particules mesurées mais une baisse de l'ensemble des classes de taille.

#### 4.1.5.3. Microscopie électronique couplée à l'EDX

- La microscopie électronique couplée à l'EDX permet d'obtenir des informations de composition atomique des différentes particules observées. Elle présente toutefois deux limitations principales : d'une part, les particules de carbone organique sont difficiles à étudier par cette méthode, car elles supportent mal le faisceau de rayons X ; d'autre part, il s'agit uniquement d'une analyse élémentaire qualitative. Il serait donc intéressant de disposer d'un moyen d'analyse quantitative de la composition moléculaire des PUF.
- Aucune différence n'est observée (en termes de morphologie des particules, de taille, de nombre et de composition chimique) lors des observations microscopiques des particules (PUF et non-PUF), en fonction des différentes configurations testées (type de granulés, point de prélèvement, phase de combustion)
- Les particules émises par le poêle se classent en trois catégories :
  - o Particules de cendres, peu nombreuses, de dimensions importantes (plusieurs micromètres) et de composition majoritairement minérale (Ca, Mg, P, Si)
  - o Particules de suies, peu nombreuses, agrégats fractals (micrométriques) de particules carbonées (C, O)
  - o Particules organiques, plus nombreuses, gouttes de carbone organique (C, O, K) formées par condensation, de 20 nm à plusieurs micromètres
- Les PUF sont majoritairement composées de carbone organique sous forme de gouttes, formées par condensation des imbrûlés

## 4.2. Essais sur la combustion de bûches

Pour rappel, les essais sont réalisés sur le banc d'essai de l'Ineris en utilisant quatre types de bûches différentes : du bois bûche de hêtre avec et sans écorce, du bois bûche densifié A (vendu comme 100 % bois sans écorce) et du bois bûche densifié B (vendu comme 100 % bois à partir de copeaux, sciures et connexes industriels de pin maritime).

Une analyse de la composition du bois révèle :

- Une humidité similaire pour les bûches de hêtre (environ 15 %), plus faible pour les bûches densifiées (environ 10 %) ;
- Un taux de cendres plus élevé pour les bûches de hêtre avec écorce que pour les bûches de hêtre sans écorce (0,71 % contre 0,36 %) ;
- Un taux de cendres des bûches densifiées plus élevé que celui des bûches de hêtre, en particulier pour la bûche densifiée A (1,7 %) ;
- Un PCI similaire pour les bûches de hêtre (14 MJ.kg<sup>-1</sup>), et plus élevé pour les bûches densifiées (16 MJ.kg<sup>-1</sup>).

Les essais sont réalisés suivant un protocole similaire au protocole BeReal, avec quelques modifications. Il comprend un allumage à froid, suivi de quatre charges nominales et de deux charges réduites (même charge de bois qu'en allure nominale mais avec une réduction de l'arrivée d'air).

Afin d'étudier l'influence du combustible et de l'allure de fonctionnement, trois jours de répétition ont été réalisés pour chaque type de bois. Les prélèvements sont effectués à une hauteur de 8D au niveau du conduit d'évacuation des fumées (D étant le diamètre interne du conduit), conformément au protocole BeReal.

Des essais supplémentaires sont réalisés à 4D (conformément à la norme NF EN 16510) et à 12D, en utilisant du bois de hêtre avec écorce, afin d'étudier l'influence de la hauteur de prélèvement sur l'émission des PUF en particulier.

Les mesures par DMS500 et ELPI+, ainsi que les mesures des gaz de combustion, sont effectuées chaque jour. Les prélèvements DGI et MPS ne sont réalisés que le troisième jour de répétition pour chaque type de bois. Il n'y a pas de prélèvement DGI le troisième jour pour les essais réalisés à 4D et 12D.

Les résultats de ces essais sont présentés dans les parties suivantes.

#### 4.2.1. Données temporelles

Les essais réalisés ont montré des profils temporels présentant des tendances globalement similaires pour les paramètres mesurés, entre les différentes journées d'essais pour les quatre types de bûches et aux trois hauteurs de points de prélèvement. Malgré certaines variations (notamment pour les bûches densifiées concernant la concentration en nombre des particules dans les fumées lors des essais à allure nominale, point qui sera détaillé à part dans la section 4.2.2), une seule journée type est présentée ici à titre d'illustration. La Figure 22 montre l'évolution temporelle des différentes grandeurs mesurées, ainsi que la contribution des PUF aux particules PM<sub>1</sub> en fonction de l'allure de fonctionnement (ou phase) de l'appareil testé et de l'avancement de la combustion au cours de chaque phase, lors de la combustion de bois hêtre avec écorce (avec un prélèvement à 8D).

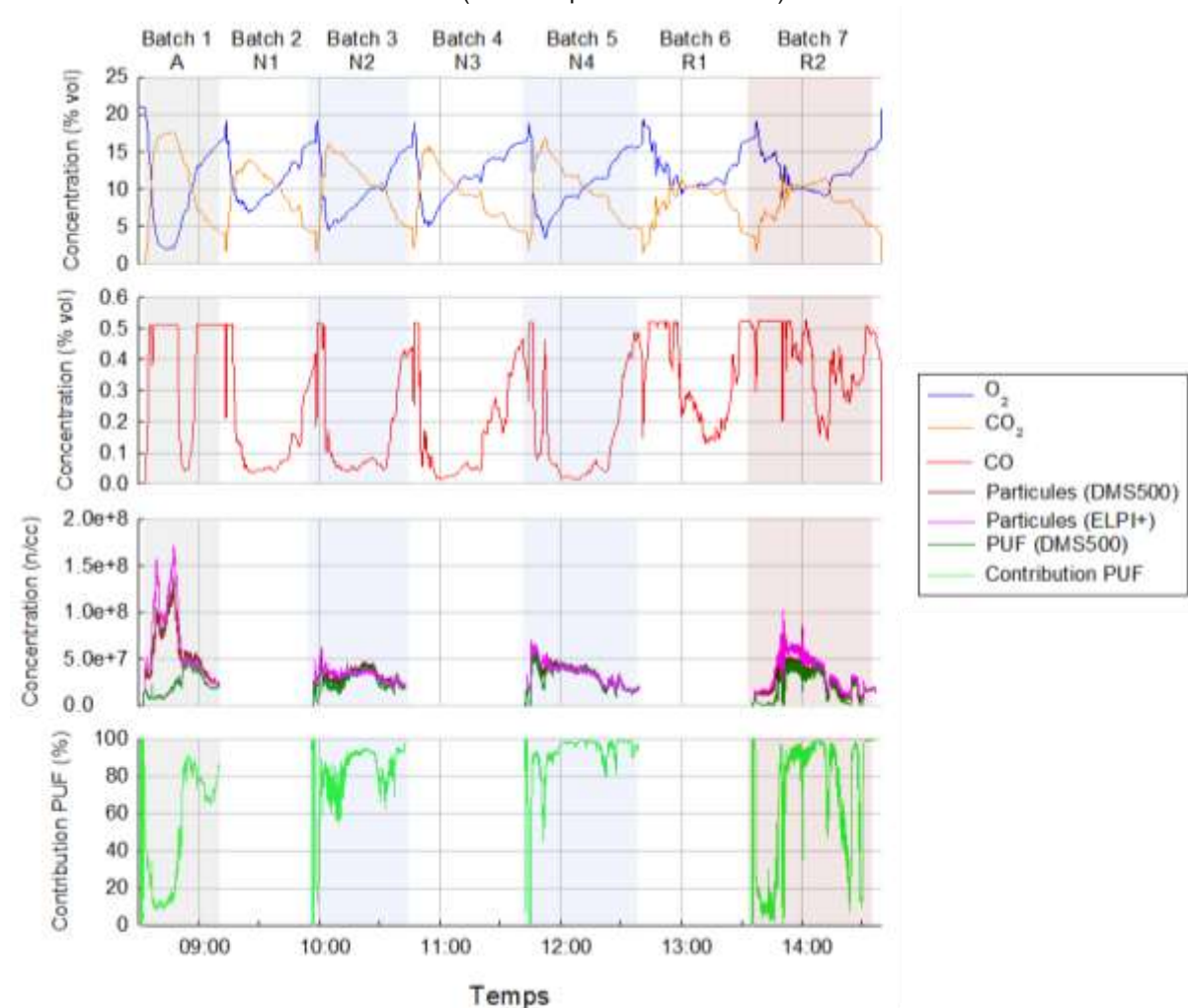


Figure 22 : Évolution temporelle des différentes grandeurs mesurées dans les fumées lors de la combustion de bois hêtre avec écorce ; Prélèvement à 8 diamètres du conduit à la sortie du poêle à bûches. A : allumage à froid, N : allure nominale, R : allure réduite.

La phase d'allumage (batch 1) se caractérise par une augmentation rapide et brutale des niveaux de CO dans les fumées dès la fermeture de la porte, avec une saturation de l'analyseur sur une grande partie de cette phase. Cela reflète des conditions de combustion dégradées, principalement liées à la température initialement plus basse dans la chambre de combustion. Les essais réalisés à allure nominale (batches 2 à 5) présentent des niveaux de CO plus faibles, indiquant une combustion plus complète. En revanche, les essais réalisés à allure réduite (batches 6 et 7) se distinguent par des émissions de CO plus élevées et une instabilité marquée des concentrations dans les fumées.

Des variations notables sont également observées sur les concentrations en nombre de particules dans les fumées, traduisant une forte sensibilité des émissions aux conditions de combustion. Ces concentrations dans les fumées varient non seulement selon l'allure de fonctionnement, mais également au sein même d'une phase, c'est-à-dire entre le rechargement du bois et la fin de la combustion avant la recharge suivante.

L'allumage constitue la phase la plus émissive de la journée d'essai en termes de concentration en nombre de particules PM<sub>1</sub> dans les fumées, avec un pic brusque et intense durant environ 10 à 20 minutes (flamme très importante), majoritairement constitué de particules de diamètre supérieur à 100 nm. Ce pic est suivi d'une chute rapide vers des niveaux comparables à ceux observés durant les autres phases. Toutefois, la concentration des PUF dans les fumées reste faible lors de ce pic de particules PM<sub>1</sub> (avec une contribution inférieure à 20 %), puis augmente progressivement jusqu'à atteindre un niveau similaire à celui observé au cours des autres phases, avec une contribution majoritaire au nombre de particules PM<sub>1</sub>, d'environ 80 %.

Au cours de cette journée, et également lors des autres essais réalisés avec du bois de hêtre, avec ou sans écorce (ce qui n'est pas le cas pour les essais menés avec du bois densifié, voir §4.2.2), les profils temporels du nombre de particules PM<sub>1</sub> sont très comparables entre les essais réalisés aux allures nominale et réduite. Pour les essais à allure nominale, un pic ponctuel (constitué principalement de particules de taille supérieure à 100 nm) est observé dans les cinq premières minutes suivant le rechargement, avant que la concentration en nombre de particules dans les fumées ne se stabilise. Par la suite, les émissions sont dominées par les PUF, avec une contribution généralement supérieure à 80 %. La fin de la combustion est marquée par une diminution progressive du nombre de particules, suivie d'un pic ponctuel dans les toutes dernières minutes, composé majoritairement de PUF.

À allure réduite, le démarrage de la combustion peut prendre plus de temps (5 à 10 minutes) et nécessite parfois l'ouverture momentanée de la porte pour initier les flammes. Pendant cette étape, les émissions en nombre de particules restent faibles et dominées par des particules de taille supérieure à 100 nm. Une fois les flammes bien établies, les concentrations en nombre de particules dans les fumées augmentent rapidement, selon un profil similaire à celui observé aux allures nominales, bien que parfois plus instable. La contribution des PUF dépasse également les 80 % durant la majeure partie de la phase. Toutefois, contrairement aux essais à allure nominale, les dernières minutes avant la fin de la combustion peuvent être marquées par une contribution très variable des PUF aux émissions totales en nombre de particules, comme illustré ici.

Comme mentionné dans la section 3.6.1, l'Ineris a déployé deux instruments distincts pour mesurer la distribution granulométrique en nombre de particules : l'ELPI+ et le DMS500. Pour rappel, ces deux appareils reposent sur des principes de fonctionnement différents. Le DMS500 classe les particules en fonction de leur diamètre de mobilité électrique, c'est-à-dire leur comportement dans un champ électrique après neutralisation de leur charge. À l'inverse, l'ELPI+ détermine la taille des particules selon leur diamètre aérodynamique, en les classant par inertie lors de leur impact sur une série d'étages. Malgré ces différences de principe, les résultats obtenus avec les deux instruments ont montré un bon accord : profils temporels similaires et ordres de grandeur comparables. Quelques écarts sont cependant observés selon les conditions de combustion, celles-ci pouvant influencer la forme, la densité ou la composition des particules - et donc leur classification selon le principe de mesure utilisé. Sur l'ensemble des essais, le rapport ELPI+/DMS500 des concentrations totales en nombre dans les fumées est en moyenne de  $1,1 \pm 0,3$  ( $\pm 1\sigma$ ). Ce résultat confirme la cohérence globale entre les deux méthodes de mesure.

Toujours sur la journée d'essai type, la variation de la granulométrie instantanée au cours des différentes phases est présentée dans la Figure 23 (à gauche), ainsi que la distribution granulométrique

moyenne (à droite) mesurée par le DMS500 pour chaque phase, avec la bande correspondant à une fois l'écart-type sur la durée de la phase.

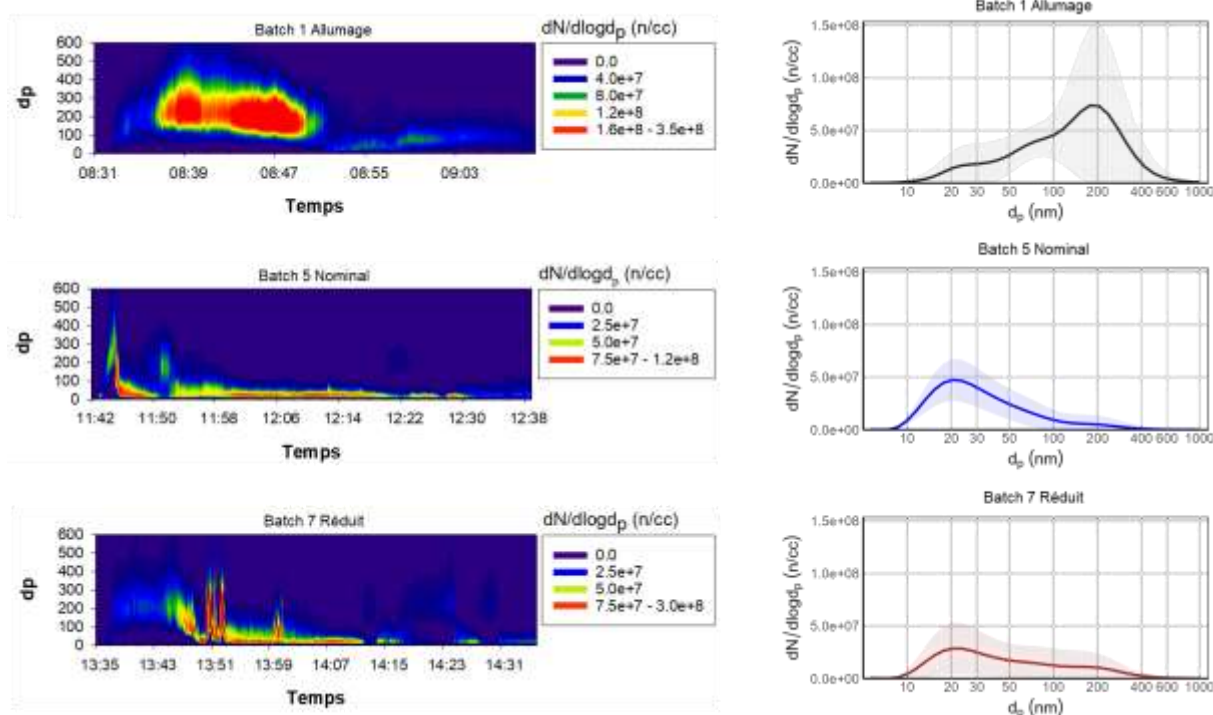


Figure 23 : Variation de la granulométrie instantanée au cours des différentes phases de combustion (à gauche) et distribution granulométrique moyenne (à droite), lors des essais réalisés avec du bois de hêtre avec écorce.

Lors du démarrage à froid (Batch 1), un nombre important de particules de taille majoritairement comprise entre 100 et 400 nm, se forme pendant les vingt premières minutes. Ensuite, le nombre de particules diminue brusquement, tout comme leur diamètre, pour devenir majoritairement inférieur à 100 nm, tandis que les particules de taille > 100 nm disparaissent. La distribution granulométrique est bimodale, avec un pic d'émission principal autour de 180 nm et un pic secondaire autour de 25 nm.

Pour les essais à allure nominale (ici, seul le Batch 5 est présenté), un pic ponctuel de particules de diamètre compris principalement entre 100 et 400 nm est observé durant les cinq premières minutes de combustion. Toutefois, contrairement à la phase d'allumage, cette situation ne dure pas : la taille des particules diminue rapidement pour devenir majoritairement inférieure à 100 nm. La distribution granulométrique est alors monomodale, centrée autour de 20 nm.

En allure réduite, en raison du démarrage plus lent au cours de cette journée d'essai (phénomène courant, dû à la réduction de l'arrivée d'air), les particules émises sont initialement comprises entre 100 et 400 nm. Elles deviennent ensuite majoritairement inférieures à 100 nm, à l'exception de quelques pics ponctuels. Durant les dernières minutes de combustion, une instabilité de la granulométrie est observée, avec des particules de diamètres variables, à la fois inférieurs à 100 nm et compris entre 100 et 300 nm. La distribution granulométrique est plutôt monomodale, centrée autour de 20 nm, mais présente un étalement vers des tailles plus importantes ainsi qu'une dispersion temporelle importante, liée aux phénomènes d'instabilité.

Ces observations rejoignent celles décrites dans plusieurs études menées avec des poêles à bûches, malgré quelques différences dans la granulométrie instantanée ([16], [20], [21]). Ces travaux de la littérature reposent le plus souvent sur un protocole comprenant une phase d'allumage à froid suivie de plusieurs essais à allure nominale. À titre d'exemple, Poláčik et al. (2021) [21] ont mené des essais avec du bois de hêtre en utilisant un poêle à bûches équipé d'arrivées d'air primaire, secondaire et tertiaire. Deux essais successifs, incluant un allumage à froid suivi d'un fonctionnement à allure nominale, sont présentés dans la Figure 24. Le profil temporel observé lors de la phase d'allumage est comparable à celui de nos essais : pendant environ 20 minutes après l'allumage, les émissions sont

importantes et les diamètres des particules élevés (principalement de l'ordre de 100 à 200 nm). Au fur et à mesure que la combustion se stabilise, les concentrations en nombre dans les fumées diminuent progressivement, avec des diamètres compris entre 30 et 80 nm.

Contrairement à ce qui a été observé et décrit précédemment lors de nos essais à allure nominale, Poláček et al. (2021) [21] rapportent des émissions de particules majoritairement supérieures à 100 nm qui persistent plus longtemps (environ vingt minutes), avant que le diamètre ne chute rapidement pour devenir majoritairement inférieur à 100 nm. Les auteurs observent également que la phase de démarrage à chaud présente des concentrations en nombre dans les fumées plus faibles que celle à froid, ce qui est cohérent avec nos observations. Notons toutefois que cette évolution ne fait pas l'unanimité. D'autres études mettent en évidence des profils présentant des différences notables dans l'évolution du diamètre des particules en fonction de l'avancement de la combustion [20], [22]. Ainsi, lors de la combustion de bois de hêtre, Kortelainen et al. (2018) [20] observent un GMD plus faible au début de la combustion (environ 40 nm), qui augmente progressivement pour atteindre environ 150 nm en fin de cycle.

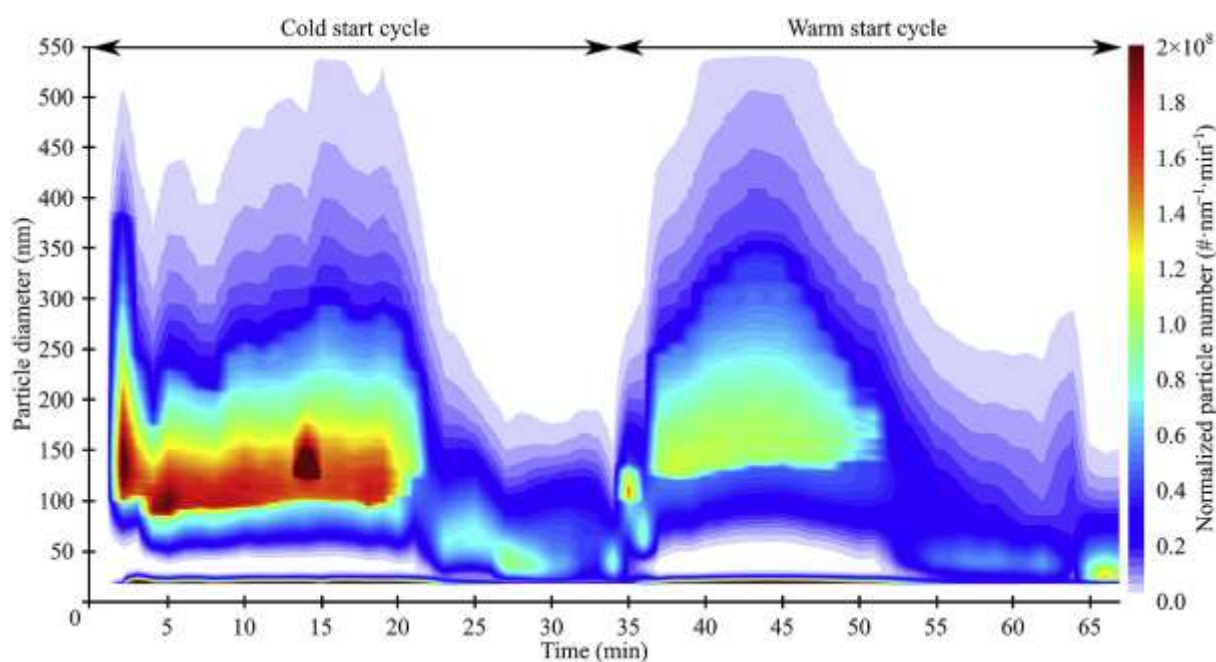


Figure 24 : Concentrations en nombre et distribution granulométrique des particules émises au cours de deux cycles de fonctionnement d'un poêle à bûches [21].

#### 4.2.2. Pic ponctuel d'émission en nombre de particules en allure nominale pour les essais avec les deux bois densifiés

Les profils temporels des concentrations en nombre de particules dans les fumées pour les essais menés avec les deux lots de bûches densifiées présentent une différence notable par rapport aux essais réalisés avec les deux lots de bûches de hêtre, avec et sans écorce, lors des essais réalisés à allure nominale. Cette différence se manifeste par un pic d'émission observé durant environ 5 à 10 minutes, principalement constitué de particules de diamètre supérieur à 100 nm (entre 100 et 300 nm). Ce phénomène coïncide avec l'ouverture soudaine des bûches densifiées pendant la combustion, susceptible d'engendrer une turbulence dans la chambre de combustion et une intensification des flammes. La Figure 25 illustre ce phénomène, avec à gauche les profils temporels des concentrations en nombre de particules  $\text{PM}_{10}$  et de particules ultrafines dans les fumées pour deux essais réalisés la même journée avec le bois densifié B (l'un à allure nominale, l'autre à allure réduite), et à droite, l'évolution instantanée de la granulométrie durant ces deux essais.

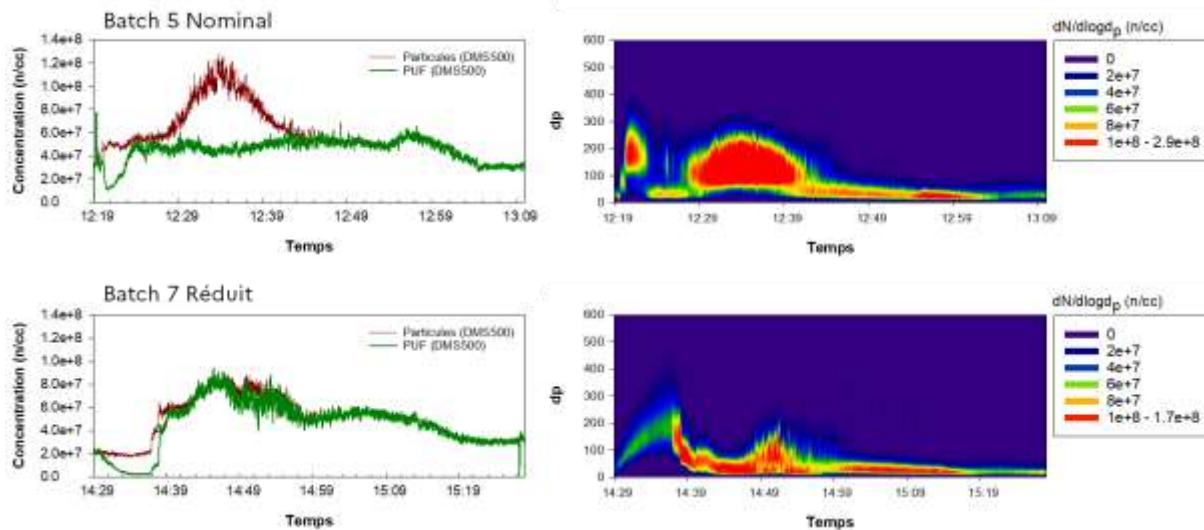


Figure 25 : Variation des profils temporels des concentrations en nombre de particules  $PM_1$  et de PUF dans les fumées (à gauche), et de la granulométrie instantanée (à droite), lors des essais réalisés avec le bois densifié B.

### 4.2.3. Facteurs d'émission

Comme pour les essais réalisés sur le poêle à granulés, les facteurs d'émission (exprimés en nombre de particules par mégajoule d'énergie introduite dans le poêle,  $\#.MJ^{-1}$ ) ont été calculés selon la méthode décrite précédemment (section 3.8.2).

#### 4.2.3.1. Comparaison des bûches étudiées

Les facteurs d'émission en nombre de particules  $PM_1$  dans les fumées pour les différentes bûches testées sont présentés dans la Figure 26-a (moyennes journalières) et dans la Figure 26-b (par phase de combustion). Il est important de rappeler que ces mesures ont été réalisées à une hauteur de prélèvement de 8D au niveau du conduit d'évacuation des fumées (conformément au protocole BeReal), et que les données ont été corrigées de la dilution. Pour chaque type de bois, deux à trois jours de répétition ont été effectués selon le même protocole, décrit précédemment (section 3.8.2). Les barres d'erreur représentent l'écart-type associé à ces répétitions.

Les moyennes journalières des facteurs d'émission en nombre de particules  $PM_1$  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 compris entre  $10^{13}$  et  $10^{14} \#.MJ^{-1}$  ([16], [18], [20], [22], [23], [24]), les valeurs mesurées dans cette étude s'inscrivent dans la limite inférieure de l'intervalle rapporté. La variabilité dans la littérature peut s'expliquer par plusieurs paramètres, notamment la génération et la technologie du poêle, les conditions de combustion [23], [25], les caractéristiques du bois (essence, humidité, taille, présence d'écorce, etc.) [20], [23], le système et le taux de dilution, ainsi que les méthodes de prélèvement et d'analyse [20], [26], [27]. Kortelainen et al. (2018) [20] ont réalisé des essais sur un poêle à bûches à accumulation de chaleur, en utilisant trois essences de bois, dont du hêtre. Ils ont appliqué un protocole de quatre heures comprenant un allumage à froid, suivi de cinq charges en allure nominale, puis d'une phase de post-combustion (refroidissement du poêle sans ajout de bois). Un SMPS a été utilisé pour mesurer la distribution granulométrique en nombre des particules, avec un taux de dilution de 400. La moyenne journalière des facteurs d'émission en nombre de particules, déterminée sur l'ensemble du protocole pour le hêtre, était de  $5,03 \times 10^{13} \pm 3,49 \times 10^{13} \#.MJ^{-1}$ . De leur côté, Fachinger et al. (2017) [23] ont mené des essais avec au moins dix essences de bois, dont le hêtre, selon un protocole similaire incluant un allumage à froid, trois charges en allure nominale, puis un refroidissement. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un CPC et d'un FMPS, avec un taux de dilution de 150. Pour le hêtre, les auteurs rapportent un facteur d'émission journalier moyen en nombre de particules de  $6,58 \times 10^{13} \pm 4,38 \times 10^{13} \#.MJ^{-1}$ .

Nos résultats sont du même ordre de grandeur que ceux rapportés pour le hêtre dans ces études, bien qu'un peu inférieurs. Il reste toutefois difficile de comparer directement les valeurs entre études, pour plusieurs raisons, telles que les différences de protocoles expérimentaux, de conditions de combustion, d'instruments utilisés et de méthodes de calcul, qui influencent significativement les résultats.

Les facteurs d'émission en nombre de particules PM<sub>1</sub> dans les fumées, mesurés lors de la phase d'allumage sont 1,4 à 1,8 fois supérieurs à ceux observés en allures nominales et réduites. De manière générale, la littérature indique que l'allumage à froid est plus émissif qu'un allumage à chaud en allure nominale, en termes de nombre de l'ensemble des particules mesurées dans les fumées [20], [21] [22], [28]. En comparant les facteurs d'émission entre les allures nominales et réduites, nous constatons qu'ils sont du même ordre de grandeur, sans différence significative. Cela suggère que le fonctionnement du poêle à bûche testé, en allure nominale ou réduite, n'a pas d'influence notable sur le nombre moyen de particules PM<sub>1</sub> émises.

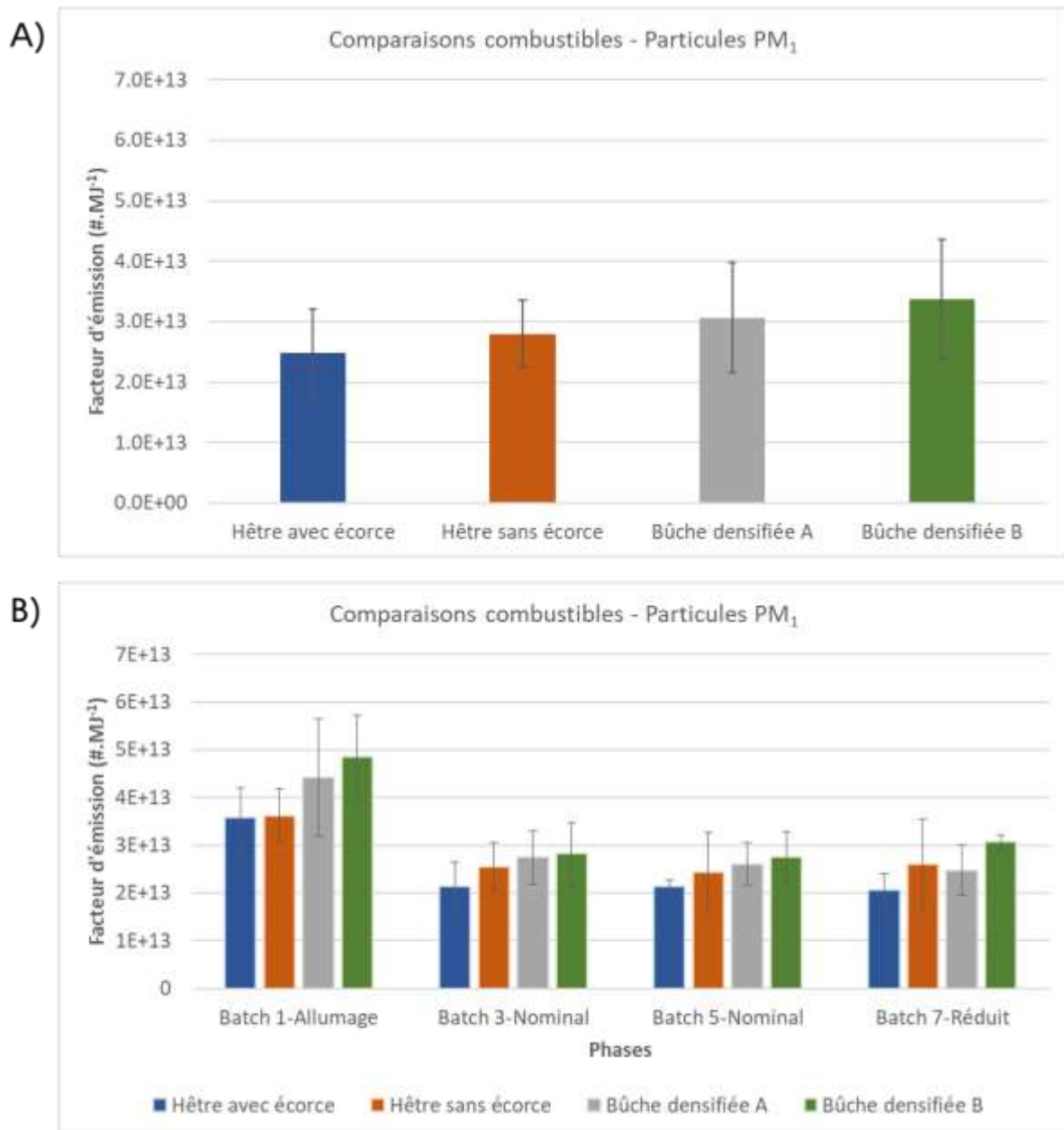


Figure 26 : Facteurs d'émission en nombre de particules PM<sub>1</sub> pour les différents combustibles bûches testés : A) moyennes journalières, B) par phase de combustion.

En comparant les différents types de bûches, nous observons que les facteurs d'émission en nombre de particules PM<sub>1</sub> dans les fumées sont du même ordre de grandeur pour les quatre combustibles testés. Toutefois, les deux bois densifiés semblent émettre 1,2 à 1,4 fois plus de particules PM<sub>1</sub> en nombre lors de phase d'allumage que les deux bois bûches de hêtre.

La Figure 27 présente les mêmes mesures, mais en ne considérant que les PUF. Les résultats sont globalement similaires, avec cependant des facteurs d'émission plus élevés en phase d'allumage pour les deux bois densifiés par rapport aux bois bûches de hêtre.

En comparant la contribution moyenne relative des PUF au nombre de particules PM<sub>1</sub> (Figure 28), nous remarquons que les PUF constituent la grande majorité des particules émises lors des allures nominales et réduites (avec une contribution moyenne allant de 65 à 93 %, dépassant les 80 % lors de la plupart des essais). Pendant la phase d'allumage, bien que leur contribution reste importante, elle est moindre (42 à 66 %). Cette diminution n'est pas due à une réduction du nombre des PUF en valeur absolue pendant l'allumage, mais plutôt à l'augmentation du nombre de particules > 100 nm émises lors de cette phase.

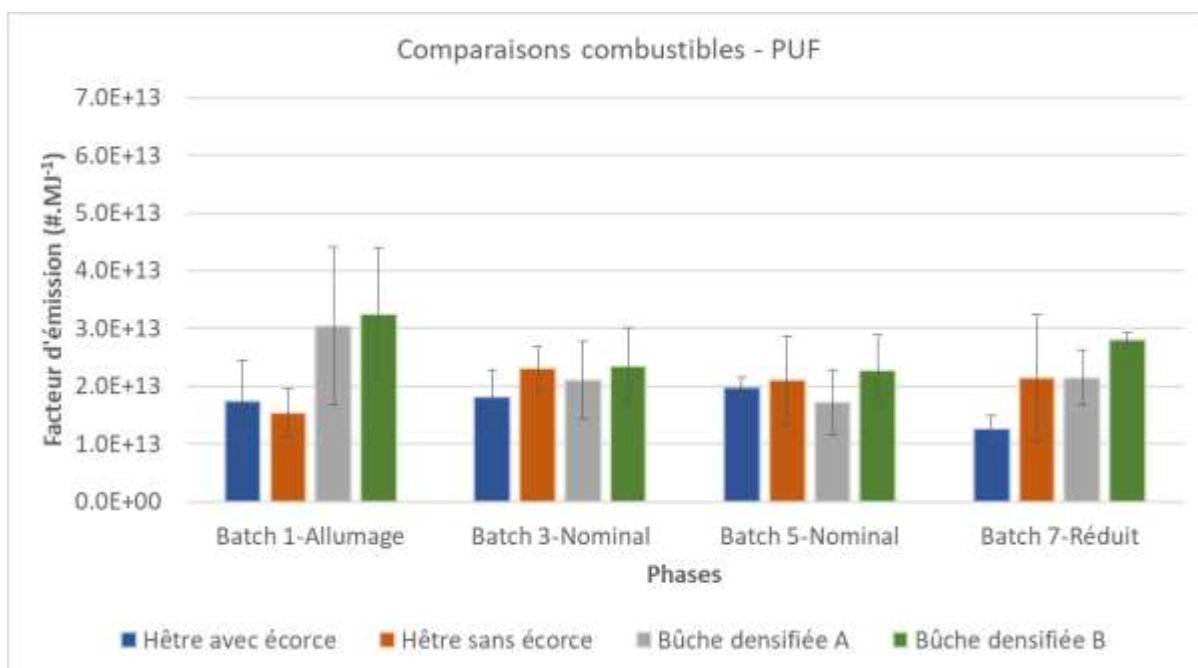


Figure 27 : Facteurs d'émission en nombre des PUF pour les différents combustibles testés, par phase de combustion.

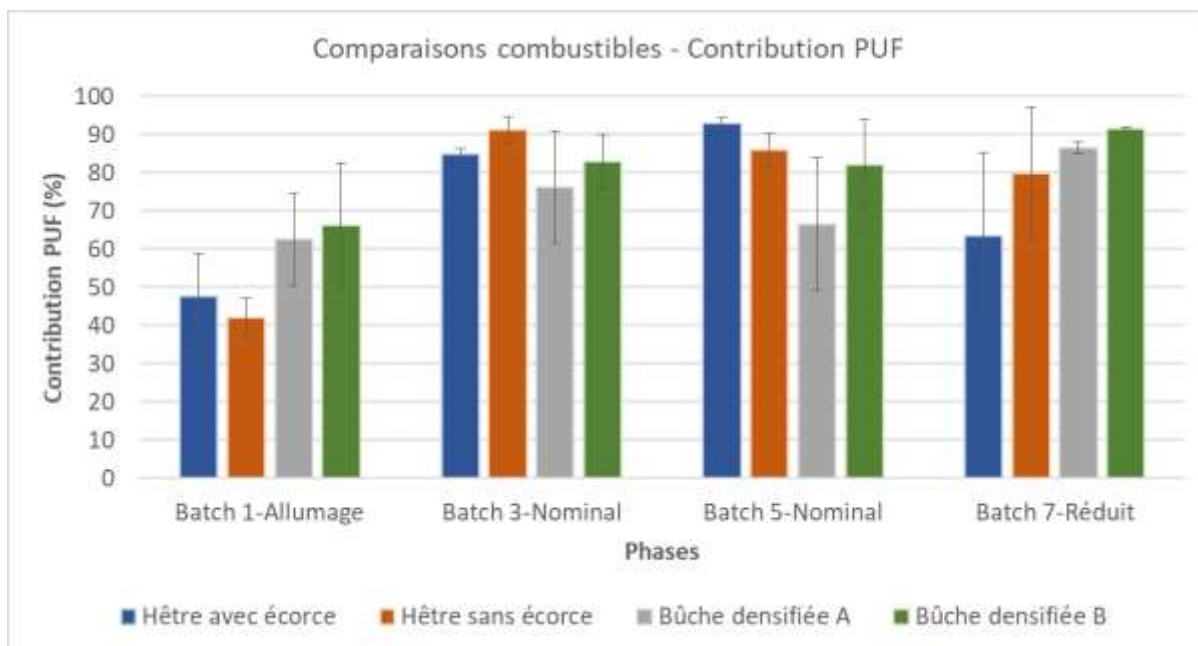


Figure 28 : Contribution moyenne relative des PUF au nombre total de particules par phase de combustion, pour les différents combustibles testés.

La Figure 29 présente les diamètres moyens géométriques (GMD, *geometric mean diameter*) des particules, déterminés à 8D pour les différents types de bûches testées, en fonction des phases de combustion. À noter que le GMD correspond au diamètre moyen des particules en nombre, calculé sur une échelle logarithmique ; il permet ainsi de caractériser la taille typique des particules émises. On observe des GMD plus faibles lors des phases nominales et réduites, avec des valeurs inférieures à 100 nm, sans différence significative entre les combustibles. En revanche, les GMD sont plus élevés en phase d'allumage, avoisinant 100 nm, avec des valeurs plus faibles pour les deux bois densifiés comparés aux bois de hêtre, avec ou sans écorce.

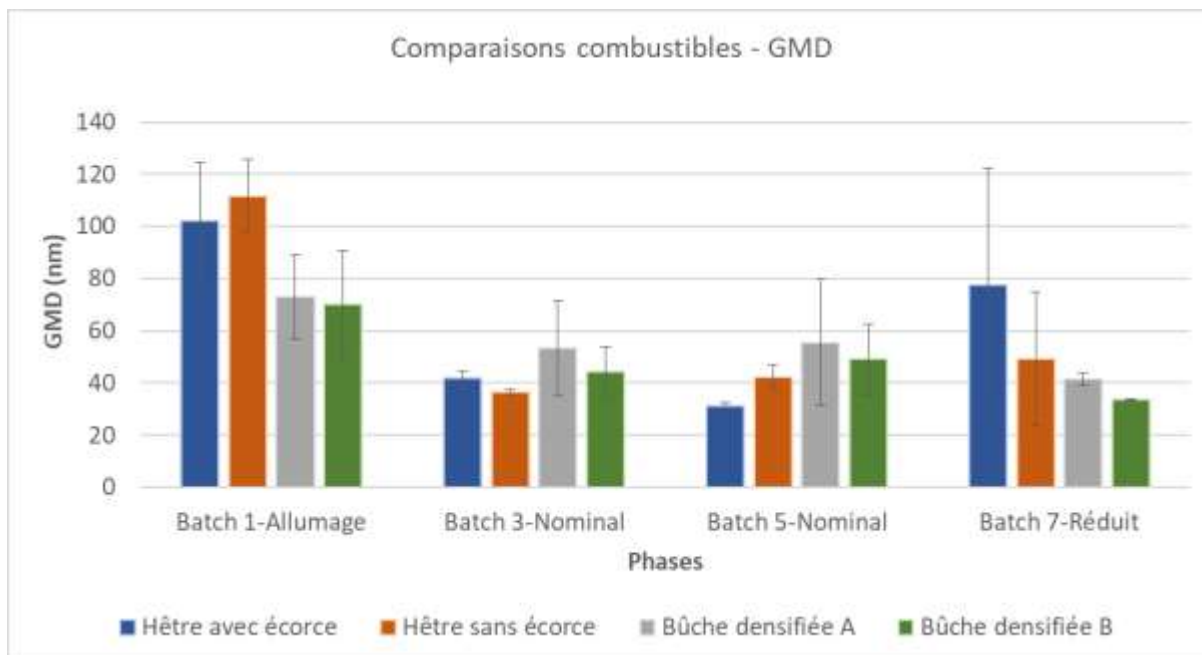


Figure 29 : GMD des particules mesurées à 8D pour les différents types de bûches testées, en fonction des phases de combustion.

La mesure et la quantification des PUF à l'émission, ainsi que l'étude de l'évaluation de ces émissions en fonction du combustible et de ses caractéristiques, de l'appareil de combustion, des conditions de fonctionnement, etc., ne sont pas toujours bien décrites dans la littérature. La majorité des travaux (bien que leur nombre reste limité) sont réalisés dans des conditions de combustion optimales. À cela s'ajoute le manque d'information concernant le type de poêles à bûches modernes testés (label Flamme Verte 7\*, Ecodesign).

Concernant la contribution des PUF au nombre total de particules, Carraci et al. (2022) [29] ont étudié les émissions de quatre poêles à bûches fonctionnant à puissance nominale. La distribution granulométrique moyenne observée est monomodale, centrée autour de 60 nm, indiquant qu'une grande partie des particules formées sont des PUF. La contribution des PUF au nombre total de particules n'est toutefois pas précisée. Brandelet et al. (2021) [30] ont, de leur côté, étudié les émissions de quatre poêles à bûches représentant quatre générations technologiques différentes (antérieures à 2012), selon un protocole incluant un allumage suivi de deux rechargements. Ils mettent en évidence une contribution importante des PUF au nombre total de particules, variant de 60,5 % à 90,2 %, en fonction de la technologie de l'appareil de combustion. Bäfver et al. (2011) [16] ont quant à eux étudié huit poêles à bûches dans une seule condition de combustion (allure nominale). Des mesures en nombre et de distribution granulométrique sont réalisées pour trois de ces appareils. Les auteurs ne fournissent pas de données spécifiques sur les PUF, mais indiquent que le nombre de particules est dominé par les particules fines, en particulier les PUF. Finalement, Ozil et al. (2007) [26] ont étudié les émissions de deux appareils testés à la fois en allure nominale et en allure réduite (cette dernière correspondant, pour l'un des deux appareils, à la fermeture de l'arrivée d'air secondaire). Ils trouvent une contribution des PUF au nombre total de particules entre 30 % et 87 %, selon l'appareil et le mode de fonctionnement. Ces différentes études confirment les résultats de notre étude, à savoir une contribution importante des PUF au nombre total de particules émises par la combustion domestique de bois bûche dans des poêles

Cependant, l'effet de la dégradation des conditions de combustion est plus difficile à décrire. Ozil et al. (2007) [26] observent une diminution du nombre total de particules, du nombre absolu de PUF, ainsi que de leur contribution relative en allure réduite par rapport à l'allure nominale. Toutefois, les auteurs précisent que les mesures sont effectuées avec un ELPI, à partir d'un tunnel de dilution, à température ambiante et sans chauffage, ce qui peut limiter la comparaison avec d'autres études où l'échantillonnage est généralement réalisé à température élevée. Dans une autre étude menée sur un poêle à bûches, Dyakov et al. (2016) [31] montrent que la mise en place d'une charge partielle (pas de précision dans la publication) conduit à une diminution des particules de plus gros diamètre, mais aussi à une augmentation des particules les plus fines. De leur côté, Petterson et al. (2011) [24] ont étudié les émissions issues d'un poêle à bûches en utilisant deux types de bois (bouleau et conifère), testés selon trois modes : le mode 1 correspond à un fonctionnement à allure nominale ; le mode 2 à une entrée d'air fermée, avec du bois humide et des bûches larges ; et le mode 3 à une augmentation du tirage, avec du bois sec et des bûches plus fines. Ils constatent que la concentration en nombre et la distribution granulométrique restent relativement similaires entre les différents combustibles et modes de fonctionnement du poêle.

Comme mentionné précédemment, il est difficile de comparer les résultats issus de différentes études, car les conditions de test ne sont pas homogènes et de nombreux paramètres sont étudiés, ce qui complique les comparaisons.

#### 4.2.3.2. Comparaison des hauteurs de prélèvement

La Figure 30 permet de comparer les facteurs d'émission en nombre de particules  $PM_{10}$  du bois de hêtre avec écorce à trois points de prélèvement d'aérosols situés au niveau du conduit d'évacuation des fumées, à 4D, 8D et 12D (D correspondant au diamètre interne du conduit), mesurés directement à la sortie du foyer. On observe que les facteurs d'émission sont du même ordre de grandeur, mais tendent à diminuer avec l'éloignement de la sortie du foyer, avec une réduction d'un facteur de  $1,45 \pm 0,12$  ( $1\sigma$ ) entre 4D et 12D. Les mêmes tendances sont observées pour les facteurs d'émission en nombre de PUF, avec une réduction d'un facteur de  $1,62 \pm 0,03$  ( $1\sigma$ ) entre 4D et 12D (Figure 31).

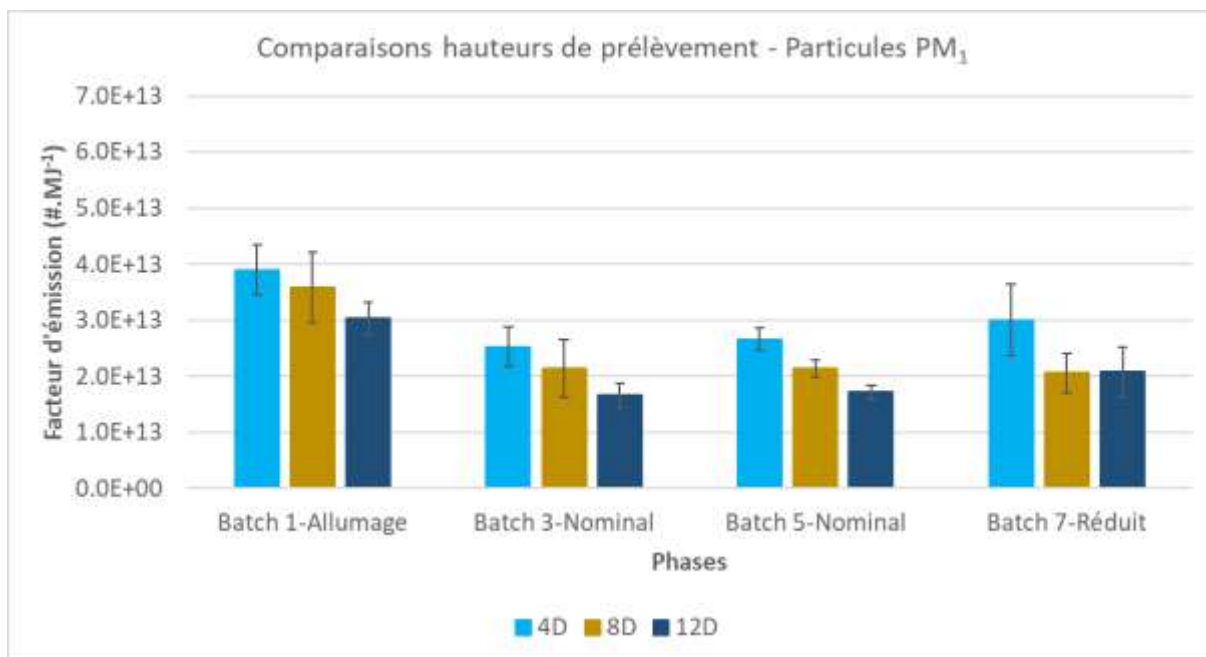


Figure 30 : Évolution du facteur d'émission en nombre total de particules PM<sub>1</sub> en fonction du point de prélèvement d'aérosols.

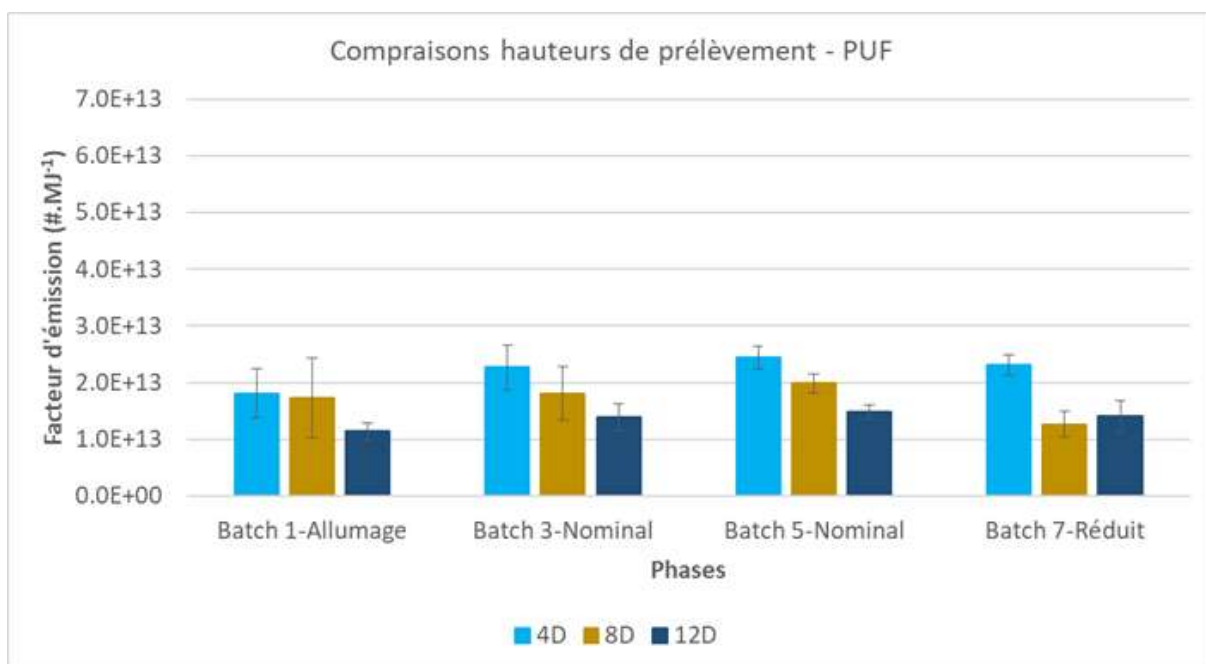


Figure 31 : Évolution du facteur d'émission en nombre de particules PUF en fonction du point de prélèvement d'aérosols.

Afin d'évaluer l'effet de la hauteur du point de prélèvement sur les distributions granulométriques des particules, les graphes ci-dessous (Figure 32) présentent les distributions moyennes obtenues pour chaque hauteur et chaque batch, en moyennant les essais réalisés sur trois jours de répétition, selon les hauteurs de 4D (en noir) et 12D (en bleu). La phase d'allumage à froid (batch 1) a été exclue de cette analyse. Seuls les essais réalisés à allure nominale et à allure réduite ont été retenus, car ils sont représentatifs de situations où la majorité des particules sont des PUF et où les conditions de combustion sont plus stables et contrôlées que lors de l'allumage à froid. Pour les batches 3 et 5 à allure nominale (graphes du haut et du milieu), les deux courbes présentent un mode principal situé entre 20

et 30 nm. La courbe noire (4D) est plus étroite, ce qui suggère une émission initiale concentrée autour d'une taille bien définie. En comparaison, la courbe bleue (12D) est plus aplatie et légèrement élargie, ce qui peut traduire la survenue de processus de coagulation ou de condensation entre 4D et 12D. Le pic de la distribution est également légèrement décalé vers des diamètres plus élevés (~30 nm). La forme de la courbe bleue indique une redistribution des tailles, accompagnée d'une évolution des dynamiques d'agglomération, sans exclure toutefois la possibilité d'une perte de matière sur les parois du conduit.

En allure réduite (batch 7, graphe du bas), la courbe noire (4D) présente deux modes distincts : un premier centré autour de 25 nm, et un second, plus large, autour de 80 à 120 nm. Ce caractère bimodal pourrait refléter la superposition de deux mécanismes : la formation primaire de PUF et la croissance secondaire par condensation ou agglomération. La courbe bleue (prélèvement à 12D) est plus aplatie et le caractère bimodal est atténué, ce qui pourrait s'expliquer par :

- Une augmentation du phénomène de coagulation qui tend à lisser les deux modes,
- Une évaporation partielle des particules les plus fines,
- Et/ou une évolution chimique de la phase particulaire (par exemple, condensation ou réorganisation de la matière organique).

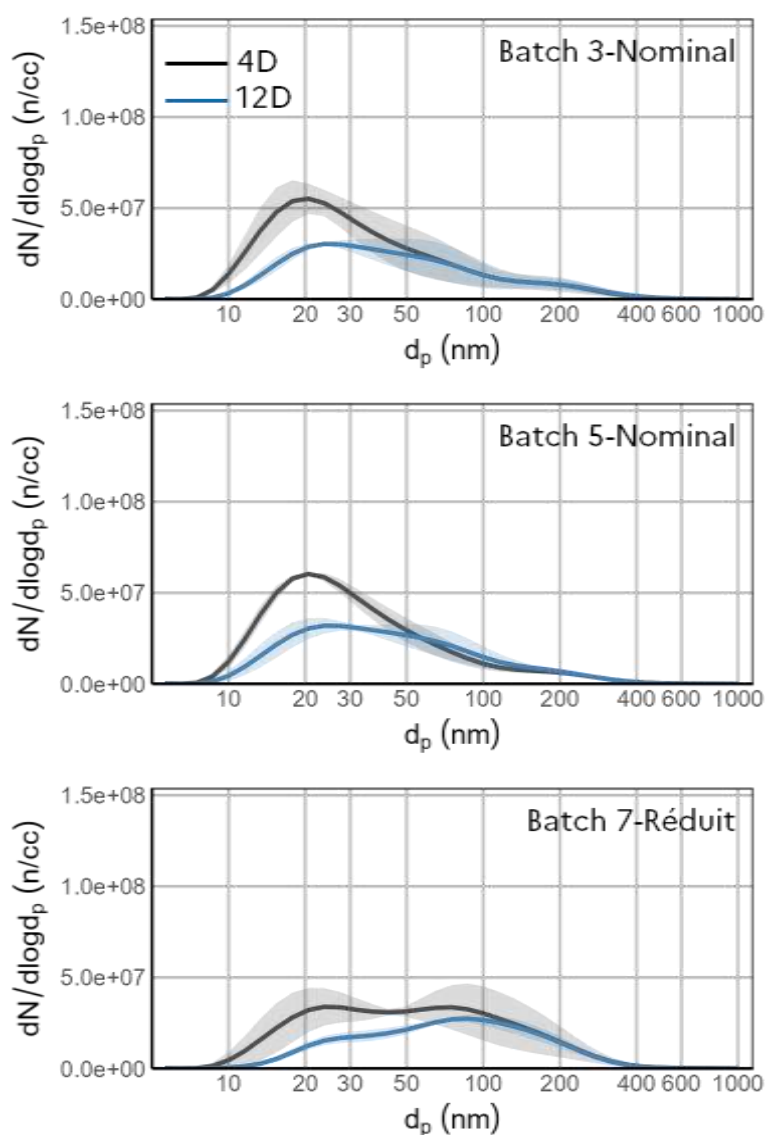


Figure 32 : Évolution de la granulométrie en fonction du point de prélèvement d'aérosols

#### 4.2.4. Observations microscopiques

Comme pour les essais réalisés sur les granulés, aucune différence notable n'est observée lors des observations microscopiques des particules en fonction des quatre types de combustibles bûches testés, de l'allure de combustion ou du point de prélèvement. Il est à noter que les prélèvements sur grilles MPS ont systématiquement été effectués au cours de la dernière partie de chaque batch de combustion, entre 5 et 15 minutes avant la fin de chaque essai.

En revanche, trois types de particules se distinguent sur la base de leur morphologie et de leur composition élémentaire :

Les particules « majoritairement » organiques, présentes de manière prépondérante dans les prélèvements. Elles apparaissent sous forme de gouttelettes de tailles variées, allant de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs microns. Les plus fines présentent une forte sensibilité au faisceau électronique, entraînant une dégradation rapide de leur structure lors des analyses MET, ce qui rend leur caractérisation élémentaire par EDX difficile, voire impossible. Cette instabilité suggère une composition majoritairement organique, peu résistante aux conditions d'analyse sous vide et au bombardement électronique. La Figure 33 (photo de gauche) illustre une particule amorphe compacte, riche en carbone et faiblement minéralisée, tandis que la photo de droite met en évidence l'effet destructeur du faisceau sur des particules plus fines. Ces observations ne sont pas surprenantes. Lors d'analyses MET de particules issues de la combustion de biomasse résidentielle, Mavrocordatos et al. (2002) [32] rapportent que, sous l'exposition au faisceau d'électrons, les particules de moins de 100 nm disparaissent après seulement quelques minutes, tandis que les plus grosses voient leur taille diminuer. De leur côté, Torvela et al. (2014) [33] observent que de nombreuses espèces s'évaporent, se décomposent ou se transforment au cours de l'analyse, formant des cristaux ou des bulles à l'intérieur des particules, ce qui suggère la présence d'hydrocarbures semi-volatils adsorbés à la surface des suies.

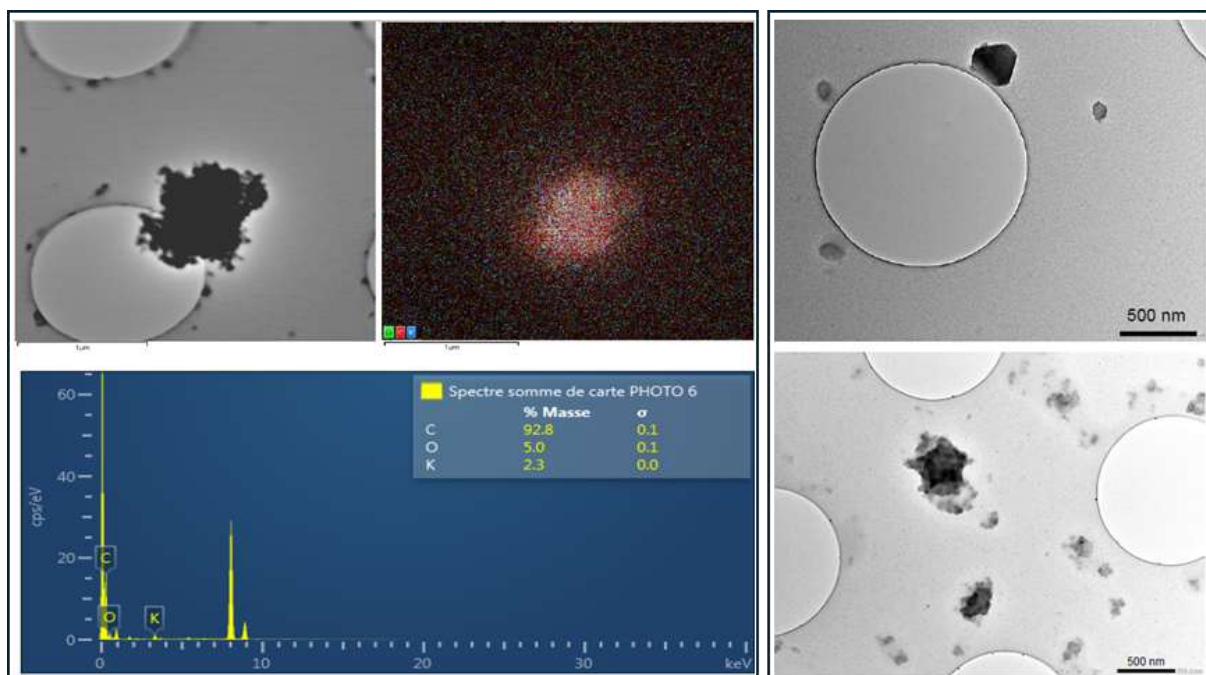
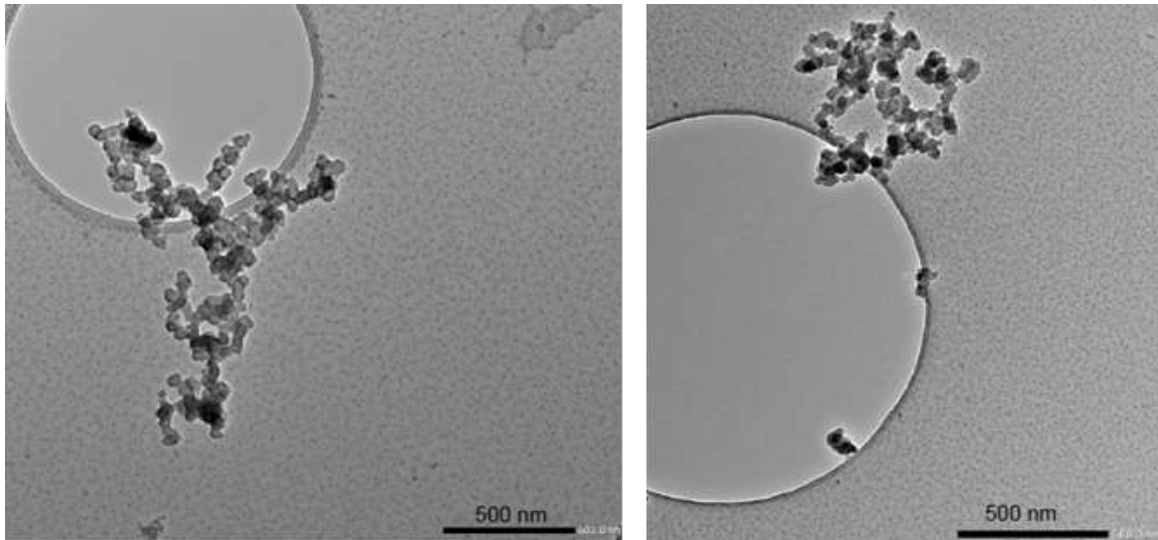


Figure 33 : Observation microscopique de particules « majoritairement » organiques – combustion de bûches

Les particules de suie, reconnaissables à leur morphologie caractéristique d'agrégats denses ou étalés, formés de petites sphères primaires de quelques nanomètres. Ces structures peuvent être enchevêtrées avec des particules minérales, dans lesquelles des éléments tels que le potassium et l'oxygène ont été détectés (Figure 34).



*Figure 34 : Observation microscopique de particules de suie – combustion de bûches*

Les particules inorganiques (sels ou cendres volantes), identifiées par la présence d'éléments tels que le calcium, le chlore, le potassium et le soufre. Ces particules sont globalement moins fréquentes sur les grilles de prélèvement. Elles présentent une morphologie compacte et dense, avec des tailles comprises entre quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres (Figure 35).

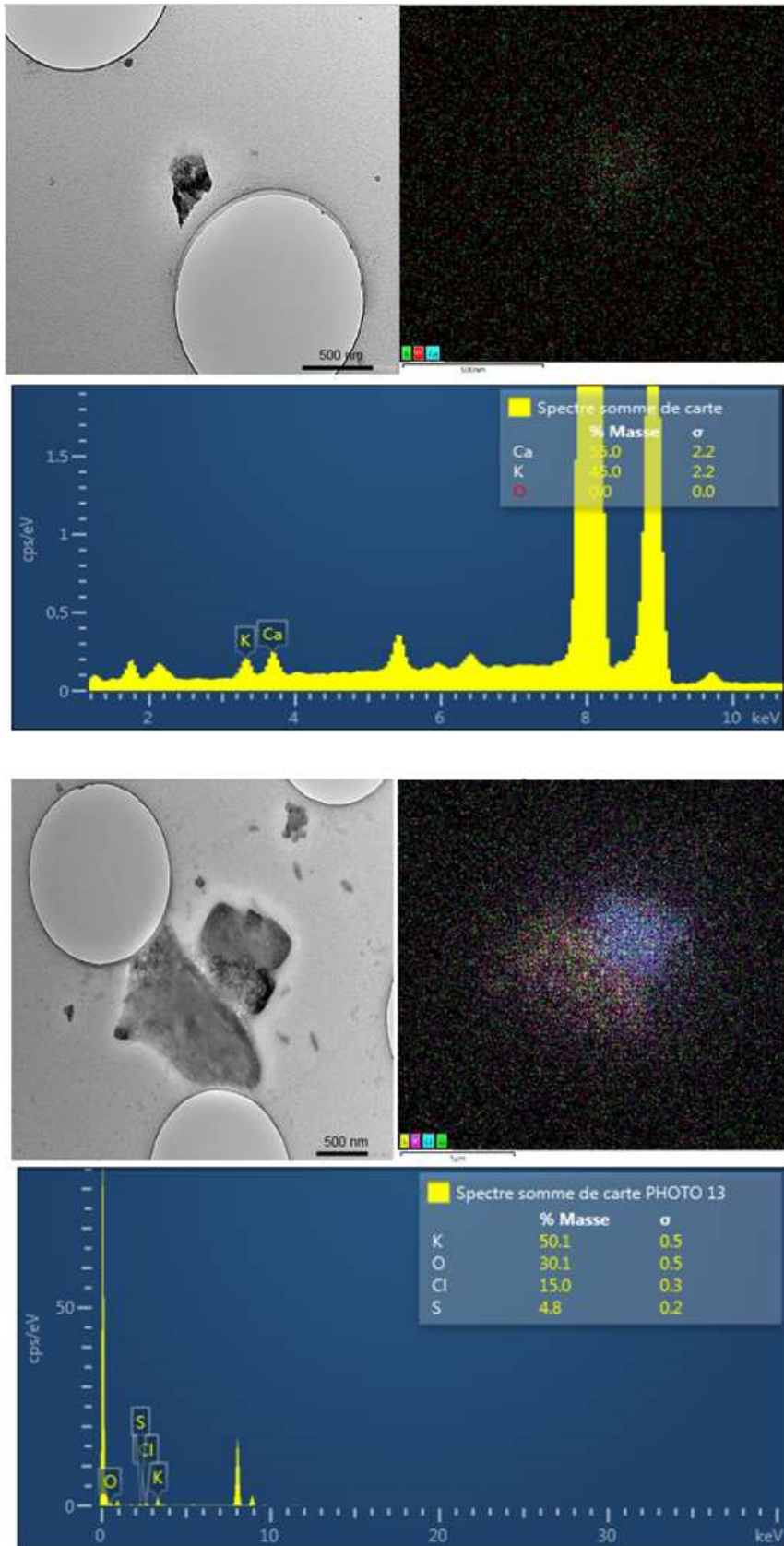


Figure 35 : Observation microscopique de particules inorganiques – combustion de bûches

#### 4.2.5. Composition chimique des PM<sub>0,2</sub>

Des prélèvements par DGI sur filtre en quartz sont réalisés sur les émissions du poêle à bûches uniquement lors des batchs 1 (allumage à froid), 3 et 5 (allure nominale) ainsi que 7 (allure réduite). Seul le filtre terminal, permettant de prélever la fraction de particules inférieures à 0,2 µm, est analysé.

L'objectif principal de ces essais complémentaires est de vérifier si les conditions de prélèvement et d'échantillonnage définies (avec un prélèvement sur la durée complète d'une seule phase de fonctionnement (~1 heure), un taux de dilution appliqué généralement compris entre 100 et 150, un choix de filtres en quartz, ainsi qu'une stratégie de découpe des filtres et de répartition des fractions entre les différentes analyses – voir section 3.6.2.2), permettent de collecter une quantité suffisante de matière sur les filtres - en particulier dans la fraction < 0,2 µm - quel que soit le mode de fonctionnement du poêle, et d'obtenir un premier niveau de données quantitatives indicatives sur la composition des particules PM<sub>0,2</sub>. Ces prélèvements sont effectués au cours d'une seule journée d'essais pour chacun des quatre types de bûches. Contrairement aux données de concentration en nombre de particules dans les fumées, nous ne disposons donc pas de données de répétabilité. Il est donc important de souligner que ces résultats doivent être considérés avec prudence, à titre indicatif. Des essais complémentaires, incluant une évaluation de la répétabilité, seront nécessaires pour confirmer les tendances observées.

Sur la faisabilité de la stratégie de prélèvement et d'échantillonnage, la comparaison des valeurs mesurées avec les limites de quantification (LQ) et les valeurs de blanc (voir annexe 2) montre tout d'abord que les niveaux mesurés en carbone élémentaire (EC) et en carbone organique (OC) sont systématiquement supérieurs à la LQ et aux valeurs de blanc, quel que soit le mode de fonctionnement du poêle ou le type de bûche utilisé. Concernant la fraction inorganique métallique, la comparaison aux LQ et aux blancs indique que, parmi les 17 métaux analysés, 9 éléments présentent des niveaux supérieurs à la fois à la LQ et au blanc (Al, Ba, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Ti et Zn). Deux éléments (P et Pb) sont le plus souvent quantifiables, avec des niveaux majoritairement supérieurs à la LQ, tandis que trois éléments (As, Cd et Cu) sont généralement inférieurs à la LQ. Enfin, trois éléments (Co, Sr et V) sont systématiquement inférieurs à la LQ. Il est à noter que, pour certains éléments, en particulier Al et P, les valeurs de blanc sont relativement élevées, ce qui peut être lié à la nature des filtres en quartz ou à une contamination lors des étapes de préparation et d'analyse, soulignant la nécessité de précautions accrues dans le choix des filtres et les procédures de prélèvement et d'analyses. Pour les espèces ioniques, les cations (Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et Ca<sup>2+</sup>) présentent des niveaux systématiquement supérieurs à la LQ, bien que des valeurs de blanc élevées soient observées pour NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Concernant les anions, trois espèces sont quantifiables (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), tandis que Br<sup>-</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> sont systématiquement inférieures à la LQ et que F<sup>-</sup> est généralement inférieure à la LQ. En conclusion, sur les 28 composés analysés, la majorité (19 composés) présente des niveaux quantifiables (supérieurs à la LQ), tandis que 9 composés restent inférieurs à la LQ. Ces résultats indiquent que la stratégie de prélèvement mise en œuvre pour ces essais permet globalement d'obtenir des quantités exploitables pour la caractérisation chimique des PM<sub>0,2</sub>, tout en mettant en évidence certaines limites. Des adaptations méthodologiques pourront être envisagées pour les campagnes futures, telles que l'ajustement du taux de dilution et du temps de prélèvement, par exemple en cumulant sur un même filtre les particules issues de deux allures de fonctionnement similaires successives.

Concernant la composition chimique des particules PM<sub>0,2</sub>, issues du poêle à bûches : Les analyses EC/OC indiquent que le carbone est majoritairement présent sous forme organique (OC), quel que soit l'allure de combustion ou le type de bûche utilisé. Les concentrations en OC sont plus élevées en phase d'allumage et en allure réduite, comparativement à l'allure nominale, où la combustion est plus complète. Concernant la fraction inorganique, les métaux les plus abondants sont le fer (Fe) et l'aluminium (Al), suivis, dans une moindre mesure, par le molybdène (Mo) et le zinc (Zn). Les autres éléments mesurés sont généralement présents à des teneurs quasi négligeables. Parmi les cations, le potassium (K<sup>+</sup>) est le plus abondant, suivi par le calcium (Ca<sup>2+</sup>) et le sodium (Na<sup>+</sup>). Les autres cations sont présents à de très faibles niveaux. Pour les anions, le sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) est le plus représenté, suivi du chlorure (Cl<sup>-</sup>) et du nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). La comparaison des résultats montre enfin que la fraction organique des PM<sub>0,2</sub> est plus élevée que la fraction inorganique, quel que soit le type de bûche ou le mode de fonctionnement. Cette observation est en accord avec les résultats obtenus par MET-EDX, qui montrent une prédominance de particules nanométriques majoritairement organiques.

#### 4.2.6. Récapitulatif des résultats d'émissions de particules issues de la combustion de bûches

##### 4.2.6.1. Influence du combustible et de l'allure sur les émissions de particules en nombre (PM<sub>1</sub> et PUF)

- Tout d'abord, les résultats en nombre, 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.
- La phase d'allumage est la plus émissive en nombre de PM<sub>1</sub> : les FE en allumage sont 1,4 à 1,8 fois plus élevés que les FE en allures nominales ou réduites.
- Aucune différence significative n'est observée entre les allures nominales et réduites concernant le nombre moyen de particules émises (PM<sub>1</sub> et PUF).
- Les FE sont du même ordre de grandeur pour les quatre combustibles (allures nominales et réduites). Toutefois, la combustion des deux bûches densifiées émet davantage de particules à l'allumage que celle des deux bûches de hêtre (avec et sans écorce) : 1,2 à 1,4 fois plus en PM<sub>1</sub> et 1,8 à 2,1 fois plus en PUF.
- Les PUF constituent la majorité des particules émises en allures nominales et réduites (65–93 %) et une part importante, bien que moindre, lors de l'allumage (42–66 %).
- À l'allumage, la contribution relative plus faible des PUF est due à une augmentation du nombre de particules de diamètre > 100 nm et pas à une diminution du nombre de PUF en valeur absolue.

##### 4.2.6.2. Effet de la hauteur du point de prélèvement

- Plus le point de prélèvement, au niveau du conduit des fumées, est situé loin en aval du poêle à bûches, plus les facteurs d'émission en nombre de particules PM<sub>1</sub> et en nombre de PUF diminuent.
- Plus le point de prélèvement est placé loin en aval du poêle à bûches, plus la distribution granulométrique se déplace vers les grands diamètres (due à une redistribution des tailles, accompagnée d'une évolution des dynamiques d'agglomération, sans exclure toutefois la possibilité d'une perte de matière sur les parois du conduit).

##### 4.2.6.3. Microscopie électronique couplée à l'EDX

- Les observations faites en microscopie électronique sur les échantillons prélevés lors de la combustion ont été, comme pour la combustion de granulés, limitées par le fait que les particules de carbone organique sont difficiles à étudier par cette méthode, car celles-ci ne supportent pas bien le faisceau de rayons X.
- Aucune différence notable n'est observée (en termes de morphologie des particules, de taille, de nombre et de composition chimique) lors des observations microscopiques des particules (PUF et non-PUF), en fonction du type de bois, de l'allure de combustion ou de la hauteur de prélèvement.
- Trois types de particules ont été identifiés :
  - Particules majoritairement organiques : les plus nombreuses, de tailles allant de quelques nm à plusieurs µm et composées de C, O, K ;
  - Particules de suie : moins nombreuses et composées de C, O ;
  - Particules inorganiques (sels, cendres volantes) : peu nombreuses, de tailles allant de quelques centaines de nm à quelques µm.

#### 4.2.6.4. Caractérisation chimique des PM<sub>0,2</sub> par impaction DGI et analyses chimiques

- Dans les conditions de réalisation des essais, 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<sub>0,2</sub>, 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'utilisation de l'impacteur DGI associé à l'analyse chimique au laboratoire, bien que limitée à la caractérisation de la fraction PM<sub>0,2</sub> 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 (§ 4.1.5.3).
- Le carbone est majoritairement présent sous forme organique, quel que soit le type de bois ou l'allure de combustion, avec des niveaux plus élevés lors de l'allumage et en allure réduite, comparativement à l'allure nominale.
- La fraction organique des PM<sub>0,2</sub> domine largement la fraction inorganique, quel que soit le type de bois ou l'allure de combustion. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par MET-EDX, qui montrent une prédominance de particules nanométriques majoritairement organiques.

#### 4.3. Comparaison bûches/granulés

Les tableaux ci-dessous regroupent les facteurs d'émission de PUF obtenus sur les deux appareils testés, pour les différents combustibles, les différentes hauteurs de prélèvement et les différentes allures de combustion testés.

Phase	Granulé 1		Granulé 2		Granulé 3	
	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )
1a – Puissance 100 %	7,30.10 <sup>13</sup>	2,86. 10 <sup>12</sup>	7,24.10 <sup>13</sup>	1,8. 10 <sup>12</sup>	6,74.10 <sup>13</sup>	1,79. 10 <sup>12</sup>
1b – Puissance 20 %	1,03.10 <sup>14</sup>	1,33.10 <sup>12</sup>	1,08.10 <sup>14</sup>	4,18.10 <sup>12</sup>	1,02.10 <sup>14</sup>	1,93.10 <sup>12</sup>
2 – Puissance 100 %	7,08.10 <sup>13</sup>	1,15.10 <sup>12</sup>	7,11.10 <sup>13</sup>	1,07.10 <sup>12</sup>	6,44.10 <sup>13</sup>	1,69.10 <sup>12</sup>
3 – Puissance 60 %	7,51.10 <sup>13</sup>	2,05.10 <sup>12</sup>	7,31.10 <sup>13</sup>	1,19.10 <sup>12</sup>	6,49.10 <sup>13</sup>	2,12.10 <sup>12</sup>

Tableau 3 : Facteurs d'émission de PUF pour chaque granulé testé et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Prélèvement à 8 diamètres

Phase	Prélèvement à 4 diamètres		Prélèvement à 8 diamètres		Prélèvement à 12 diamètres	
	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )
1a – Puissance 100 %	7,86.10 <sup>13</sup>	1,78. 10 <sup>12</sup>	7,30.10 <sup>13</sup>	2,86. 10 <sup>12</sup>	6,57.10 <sup>13</sup>	3,71. 10 <sup>12</sup>
1b – Puissance 20 %	1,08.10 <sup>14</sup>	2,01.10 <sup>12</sup>	1,03.10 <sup>14</sup>	1,33.10 <sup>12</sup>	9,20.10 <sup>13</sup>	4,17.10 <sup>12</sup>
2 – Puissance 100 %	7,85.10 <sup>13</sup>	1,57.10 <sup>12</sup>	7,08.10 <sup>13</sup>	1,15.10 <sup>12</sup>	6,42.10 <sup>13</sup>	3,57.10 <sup>12</sup>
3 – Puissance 60 %	8,13.10 <sup>13</sup>	1,14.10 <sup>12</sup>	7,51.10 <sup>13</sup>	2,05.10 <sup>12</sup>	6,47.10 <sup>13</sup>	3,10.10 <sup>12</sup>

Tableau 4 : Facteurs d'émission de PUF pour les différents points de prélèvements et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Granulé 1

Phase	Hêtre avec écorce		Hêtre sans écorce		Bûche densifiée A		Bûche densifiée B	
	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )
Batch 1- Allumage	1,73.10 <sup>13</sup>	7,04. 10 <sup>12</sup>	1,54.10 <sup>13</sup>	4,06. 10 <sup>12</sup>	3,05.10 <sup>13</sup>	1,37. 10 <sup>13</sup>	3,26.10 <sup>13</sup>	1,14. 10 <sup>13</sup>
Batch 3- Nominal	1,81.10 <sup>13</sup>	4,64.10 <sup>12</sup>	2,30.10 <sup>13</sup>	3,83.10 <sup>12</sup>	2,10.10 <sup>13</sup>	6,73.10 <sup>12</sup>	2,35.10 <sup>13</sup>	6,60.10 <sup>12</sup>
Batch 5- Nominal	1,99.10 <sup>13</sup>	1,66.10 <sup>12</sup>	2,10.10 <sup>13</sup>	7,67.10 <sup>12</sup>	1,73.10 <sup>13</sup>	5,60.10 <sup>12</sup>	2,28.10 <sup>13</sup>	6,10.10 <sup>12</sup>
Batch 7- Réduit	1,27.10 <sup>13</sup>	2,28.10 <sup>12</sup>	2,15.10 <sup>13</sup>	1,09.10 <sup>13</sup>	2,15.10 <sup>13</sup>	4,80.10 <sup>12</sup>	2,80.10 <sup>13</sup>	1,30.10 <sup>12</sup>

Tableau 5 : Facteurs d'émission de PUF pour chaque bûche testée et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Prélèvement à 8 diamètres

Phase	Prélèvement à 4 diamètres		Prélèvement à 8 diamètres		Prélèvement à 12 diamètres	
	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )	Facteur d'émission (#.MJ <sup>-1</sup> )	Ecart-type (#.MJ <sup>-1</sup> )
Batch 1-Allumage	1,80.10 <sup>13</sup>	4,30. 10 <sup>12</sup>	1,73.10 <sup>13</sup>	7,04. 10 <sup>12</sup>	1,14.10 <sup>13</sup>	1,53. 10 <sup>12</sup>
Batch 3-Nominal	2,27.10 <sup>13</sup>	3,96.10 <sup>12</sup>	1,81.10 <sup>13</sup>	4,64.10 <sup>12</sup>	1,39.10 <sup>13</sup>	2,41.10 <sup>12</sup>
Batch 5-Nominal	2,45.10 <sup>13</sup>	1,95.10 <sup>12</sup>	1,99.10 <sup>13</sup>	1,66.10 <sup>12</sup>	1,49.10 <sup>13</sup>	1,29.10 <sup>12</sup>
Batch 7-Réduit	2,31.10 <sup>13</sup>	1,85.10 <sup>12</sup>	1,27.10 <sup>13</sup>	2,28.10 <sup>12</sup>	1,41.10 <sup>13</sup>	2,67.10 <sup>12</sup>

*Tableau 6 : Facteurs d'émission de PUF pour les différents points de prélèvements et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Bûche de hêtre avec écorce*

Les résultats obtenus montrent que les quantités de PUF mesurées à l'émission des deux poêles testés sont du même ordre de grandeur, de l'ordre de 10<sup>13</sup> #.MJ<sup>-1</sup>. On remarque néanmoins que le poêle à granulés testé présente des facteurs d'émission de PUF plus élevés que le poêle à bûches testé, d'un facteur de trois à quatre.

La Figure 36 compare les facteurs d'émission journaliers globaux moyens en nombre de PUF pour le poêle à bûches et le poêle à granulés étudiés. Pour chaque appareil, les valeurs présentées correspondent à une moyenne journalière globale, obtenue en moyennant les valeurs journalières moyennes des FE de PUF obtenues pour les différents combustibles testés. Compte tenu de la taille réduite de l'échantillon utilisée pour le calcul de cette moyenne journalière globale par poêle (inférieure à 10, avec une moyenne journalière par type de combustible, soit quatre pour le poêle à bûches et trois pour le poêle à granulés), les barres d'erreur représentent l'étendue des mesures, corrigée par un coefficient dépendant de la taille de l'échantillon, conformément à la méthode proposée dans le référentiel FD X 07021<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Fascicule de documentation AFNOR, Métrologie et applications de la statistique - Aide à la démarche pour l'estimation et l'utilisation de l'incertitude des mesures et des résultats d'essais

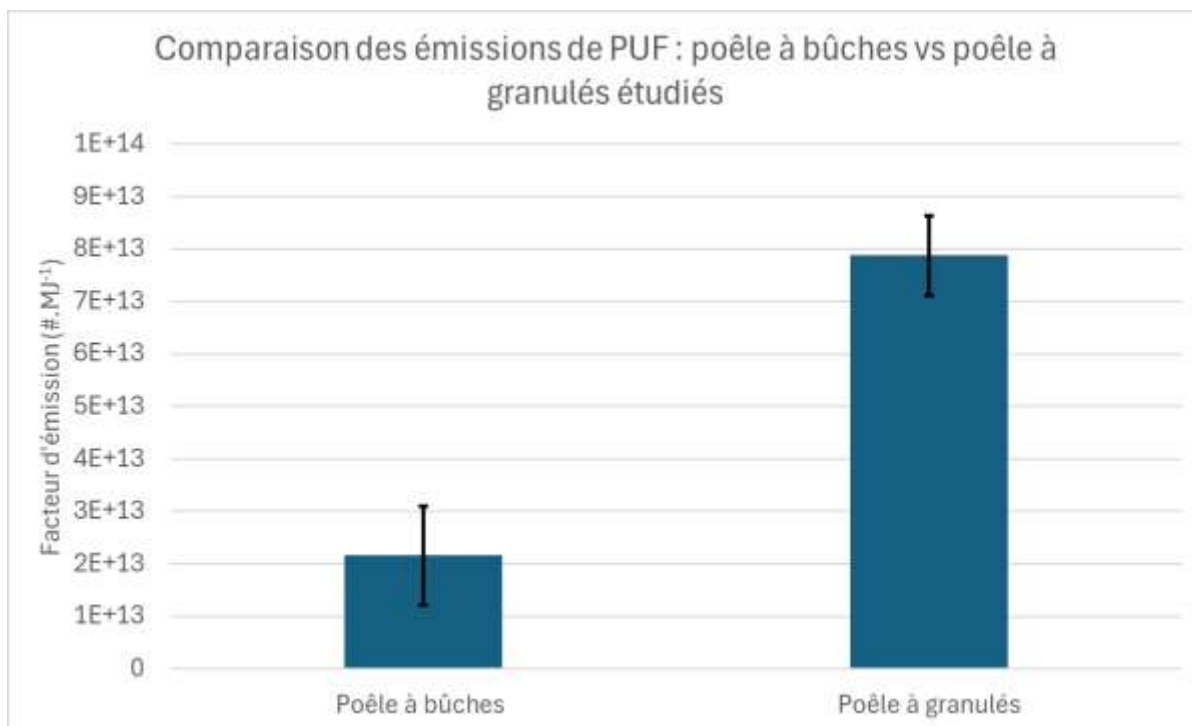


Figure 36 : Comparaison des émissions de PUF entre les deux poêles étudiés, dans les conditions de mesure et de prélèvement définies du projet PERICLES.

Les résultats présentés dans la Figure 36 montrent que les moyennes calculées pour les émissions de PUF issues des deux appareils présentent un écart significatif après prise en compte des écart-types associés aux mesures. Ce résultat est spécifique aux deux appareils évalués et aux conditions de combustion et de mesure dans lesquelles ils ont été testés, et ne saurait être considéré comme représentatif des émissions de PUF issues des technologies de poêles à bûches et granulés.

Cet écart peut être dû à des différences intrinsèques entre les niveaux de PUF émis par ces deux poêles dans les conditions de combustion appliquées, mais il est à relativiser par le fait que les deux appareils ont été testés sur deux plateformes différentes, opérées par des équipes différentes et équipées de matériels de mesure différents bien que basés sur la même technologie de mesure et même modèle d'instrument pour les PUF.

Il existe très peu d'études dans la littérature comparant directement les émissions de PUF issues de la combustion de bûches et de granulés, que ce soit pour des poêles ou des chaudières [16], [34], [35]. À notre connaissance, seules deux études proposent une comparaison entre poêles [18], [36]. Il en ressort que les systèmes de combustion de bûches étudiés tendent à émettre davantage de PUF en nombre que ceux fonctionnant aux granulés. Néanmoins, cette tendance ne peut être considérée comme définitive et doit être interprétée avec précaution. En effet, ces études ne fournissent pas de comparaison des facteurs d'émission de PUF obtenus dans des configurations de prélèvement et de conditionnement de l'effluent strictement identiques. À titre d'exemple, dans l'étude d'Ozgen et al. (2017), qui compare les émissions d'un poêle à bûches et celles d'un poêle à granulés, les particules issues du poêle à bûches ont été prélevées à l'aide d'un tunnel de dilution puis diluées en deux étapes, avec un taux de dilution total compris entre 500 et 1 000, tandis que pour le poêle à granulés, la dilution a été réalisée en deux étapes sans tunnel de dilution, avec un taux total compris entre 90 et 150. Ces différences méthodologiques sont susceptibles d'influencer la comparabilité des résultats obtenus entre les deux appareils. Par ailleurs, les protocoles de combustion appliqués diffèrent également, notamment en l'absence de prise en compte du régime à allure réduite pour le poêle à bûches. Enfin, il convient de souligner le manque de comparaisons portant sur des appareils récents (postérieurs à 2017), ce qui limite la représentativité des conclusions au regard des technologies actuelles, en particulier celles des appareils étudiés dans le cadre du projet PERICLES.

On observe de plus que le poêle à bûches produit des particules plus petites (mode à 20 nm, distribution très étalée) que le poêle à granulés (mode à 60 nm). Cette différence de mode pourrait s'expliquer par les différences de conception des deux appareils, et notamment la présence d'un échangeur de chaleur dans le poêle à granulés. Le but de cet échangeur est de récupérer une partie de la chaleur des fumées pour contribuer à la chauffe de la pièce. Par conséquent, son action conduit à un refroidissement des fumées, ce qui favorise la condensation des espèces organiques et donc la formation voire la croissance des PUF. De plus, le protocole BeReal requiert de mesurer la distance du point de prélèvement à partir de la sortie du poêle à bûche, mais pour le poêle à granulés cette distance est mesurée à partir du coude du conduit (Figure 1). Il y a donc une différence de longueur de trajet dans le conduit d'environ 1,50 mètres entre les deux bancs d'essais, pour un point de prélèvement affiché comme identique. La conséquence de cet écart est que, pour le poêle à granulés, le refroidissement des fumées démarre plus tôt en amont du point de prélèvement à 8 D, ce qui favorise la condensation, et donc la production puis la croissance des PUF.

La prise en compte des résultats obtenus à tous les points de prélèvement (4, 8 et 12 diamètres) permet d'illustrer le phénomène. En effet, pour le poêle à bûches, un étalement de la granulométrie vers les grands diamètres est observé lorsque le prélèvement a lieu plus loin en aval, ce qui n'est pas le cas pour le poêle à granulés, car les particules ont déjà atteint un état stationnaire, les espèces condensables ayant déjà majoritairement condensé. Ceci est également illustré par les écart-types obtenus sur les valeurs de facteurs d'émission (comme déjà décrit dans les sections 4.1.3 et 4.2.3). Le poêle à granulés donne des écart-type faibles, indicatifs de la stabilité de la production de PUF, alors que les écart-types du poêle à bûches sont plus élevés, ce qui tend à montrer que le mécanisme de production et d'évolution des PUF est toujours en cours au niveau du point de mesure. On notera d'ailleurs que les écart-types obtenus à 12 diamètres sur le poêle à bûches sont plus faibles que ceux obtenus à 4 ou 8 diamètres.

Ces observations soulignent la difficulté à comparer les deux types d'appareils, qui sont de conception différente et avec des modes de fonctionnement différents.

## 5. Conclusion

---

Le projet PERICLES avait pour principaux objectifs :

- L'identification des technologies et des métrologies adaptées à la mesure des PUF à l'émission des appareils de chauffage au bois ;
- L'étude des mécanismes de production et d'évolution des PUF issues des appareils de chauffage domestique au bois ;
- L'évaluation de l'effet des caractéristiques des combustibles (bûches naturelles ou densifiées, granulés) ainsi que des conditions de combustion sur les émissions de PUF.

### 5.1. Métrologie pour la mesure des PUF à l'émission

Les technologies les plus adaptées pour mesurer les particules ultrafines émises par les appareils de chauffage domestique au bois comprennent, d'une part les équipements de mesure granulométrique en ligne (DMS500, ELPI+), et d'autre part les méthodologies de prélèvement pour une mesure intégrée (préleveur MPS, impacteur DGI).

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 (trois à cinq minutes dans le cas du SMPS) n'aurait pas permis de repérer ces phénomènes, dont la durée caractéristique est de l'ordre de la dizaine de secondes. La sensibilité granulométrique du DMS500 est suffisante pour les granulométries rencontrées. Les mesures réalisées par les deux appareils sur un même essai (poêle à bûches) donnent des résultats très proches : profils temporels similaires et ordres de grandeur comparables, et ce malgré des principes de mesure différents mis en œuvre par ces deux instruments.

Le préleveur MPS permet d'avoir accès à des informations qualitatives de morphologie et de composition élémentaire via la microscopie électronique et l'analyse EDX. Néanmoins, l'analyse élémentaire par EDX est limitée aux particules solides, car les gouttelettes d'aérosol 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 (e.g. ICP-AES, analyse EC-OC), mais ne permet pas de sélectionner spécifiquement les PUF (diamètre de coupure à 200 nm).

Quel que soit le moyen de mesure employé, le recours à un système de dilution, idéalement à deux niveaux (chaud puis froid), est une étape préalable indispensable pour adapter les conditions de matrice, stabiliser les aérosols avant caractérisation et ainsi limiter les artefacts liés aux risques de condensation de la matrice lors de son transfert entre le point de prélèvement et la technique de caractérisation. Au cours de cette étape de dilution, le contrôle et le suivi du taux de dilution appliqué sont des éléments essentiels à la réalisation d'une caractérisation fiable de l'aérosol.

La position du point de prélèvement influence les émissions mesurées : des réductions de respectivement 45 % et 62 % sont observés entre les facteurs d'émission de PM<sub>1</sub> et de PUF mesurés en aval d'un même appareil, à des distances correspondant à 4 et 12 diamètres de conduit. L'éloignement du point de prélèvement entraîne, pour les deux appareils étudiés, une diminution du nombre de particules associée, dans le cas du poêle à bûches, à une évolution 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.

**Les résultats obtenus dans ce projet soulignent clairement que la caractérisation des émissions de PUF, nécessite non seulement leur caractérisation physique (taille et nombre), mais également leur caractérisation chimique.**

## 5.2. Mécanismes de production et d'évolution des PUF

Lors des essais, il a été observé, pour les granulés comme pour les bûches, que les épisodes de combustion incomplète avaient tendance à produire des particules plus grosses. Ceci illustre le phénomène principalement responsable de la formation et de la croissance des PUF, à savoir la condensation des espèces organiques imbrûlées.

La prise en compte des résultats obtenus pour le poêle à bûches, à tous les points de prélèvement (4, 8 et 12 diamètres), permet d'illustrer le phénomène. En effet, un étalement de la granulométrie vers les grands diamètres est observé lorsque le prélèvement a lieu plus loin en aval de la sortie de l'appareil. Ce phénomène est plus marqué à allure réduite. Cette allure est caractérisée par une présence de quantités importantes de vapeur organique et une distribution bimodale reflétant la superposition de deux mécanismes, la formation primaire de PUF et la croissance secondaire par condensation ou agglomération. A 12 D, le caractère bimodal est atténué et la courbe est plus aplatie mettant en évidence des phénomènes de condensation et de coagulation au sein du conduit.

## 5.3. Comparaison combustion bûches/granulés

Les émissions de PUF sont du même ordre de grandeur (de l'ordre de  $10^{13}$  #.MJ<sup>-1</sup>) pour les deux appareils étudiés (poêle à granulés et poêle à bûches).

Le poêle à granulés présente toutefois des facteurs d'émission trois à quatre fois plus élevés que le poêle à bûches, tandis que le poêle à bûches émet des particules plus fines (mode  $\approx 20$  nm contre  $\approx 60$  nm pour les granulés). **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.**

Ces différences d'émissions observées entre les deux appareils ne s'expliquent pas uniquement par les différences de la nature du combustible ou de technologies des appareils. Elles peuvent aussi s'expliquer par les caractéristiques propres aux appareils, notamment la présence d'un échangeur de chaleur dans le poêle à granulés, et par 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 et le même modèle d'instrument de mesure pour les PUF. Ainsi, la comparaison entre les émissions liées à la combustion de bûches et de granulés ne reflète pas uniquement l'effet du combustible, mais également les différences de conception et de fonctionnement entre les appareils et les plateformes de mesure, ce qui limite toute comparaison directe entre ces deux systèmes.

## 5.4. Effet des conditions de combustion et des caractéristiques des combustibles sur les émissions des PUF

Les conditions de fonctionnement des appareils de chauffage domestique au bois influencent fortement les émissions particulières.

Pour le poêle à granulés, le fonctionnement à puissance réduite conduit à des émissions plus élevées de PUF et de PM<sub>1</sub> 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 PM<sub>1</sub> ; 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 PM<sub>1</sub> émises.

Pour un type de combustible donné (bûches et granulés), il n'a pas été observé d'effet significatif de l'essence (résineux ou feuillus pour les granulés) et/ou des caractéristiques (bûches de hêtre avec ou sans écorce, bûches densifiées) sur les émissions de PUF, sauf lors de la phase d'allumage, au cours de laquelle les bûches densifiées produisent deux fois plus de PUF que les bûches de hêtre. Les granulés possèdent des caractéristiques très similaires entre eux (humidité à 6 %, taux de cendres entre 0,3 et 0,6 %, PCS à 20200 kJ.kg<sup>-1</sup>) ; il est donc cohérent de ne pas observer de différence significative des émissions de PUF lors de leur combustion.

Cela est également vrai pour les bûches de hêtre, qui ont des caractéristiques similaires entre elles.

Les bûches densifiées sont plus sèches que les bûches naturelles et ont un taux de cendres plus élevé. Les bûches densifiées tendent à produire deux fois plus de PUF lors de la phase d'allumage que les bûches de hêtre.

Afin de mieux explorer l'influence des caractéristiques du combustible sur les émissions de PUF, il serait nécessaire de réaliser de nouvelles campagnes d'essais en incluant des combustibles ayant des propriétés plus variées, notamment pour les bûches.

## 6. Perspectives

---

À la suite du projet PERICLES et des résultats obtenus, plusieurs perspectives peuvent être mises en évidence afin de compléter et d'améliorer nos connaissances sur les PUF émises par la combustion du bois dans les appareils de chauffage domestique.

- ✓ Il apparaît essentiel d'approfondir nos connaissances sur la composition chimique des PUF en complément de la caractérisation physique, notamment par la quantification des principaux composants tels que les métaux, les sels, le carbone élémentaire et organique (EC/OC), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les sucres et d'autres constituants. Cela implique de s'appuyer sur les prélèvements par impaction manuelle et d'adapter le matériel utilisé pour le prélèvement, ou d'avoir recours à d'autres types de dispositifs que le DGI permettant de cibler précisément les PUF. Par ailleurs, un nombre accru de répétitions des essais est nécessaire afin d'obtenir des données robustes sur la composition des PUF.
- ✓ De plus, les émissions issues du chauffage domestique au bois forment des mélanges complexes, et l'analyse chimique ciblée ne permet pas, à elle seule, de caractériser de manière exhaustive ces mélanges, ni de prendre en compte les contaminants bioactifs inconnus. En complément de l'analyse chimique, il apparaît donc utile, pour la caractérisation des PUF, de recourir à des bioessais *in vitro* basés sur les modes d'action des composés bioactifs, qui offrent une évaluation approfondie de l'activité biologique globale en se concentrant sur les contaminants biologiquement actifs tout en intégrant leurs interactions potentielles.

Dans le cadre du projet PERICLES, plusieurs paramètres susceptibles d'influencer les émissions de PUF issues du chauffage domestique ont été étudiés, tels que l'essence du bois, la hauteur de prélèvement, le type de combustible (granulés ou bûches) ainsi que les conditions de combustion. Toutefois, d'autres paramètres sont également susceptibles d'affecter les émissions de PUF et leur composition chimique, et des incertitudes importantes subsistent quant à leur influence respective. Parmi ces paramètres, l'étude des améliorations technologiques des appareils de combustion dans des conditions comparables constitue un levier majeur à investiguer.

Le suivi en temps réel de la composition chimique des PUF, reposant sur une métrologie adaptée (notamment par spectrométrie de masse de type CI-ToF-MS) apparaît également comme essentiel pour les futurs projets, afin de mieux comprendre la variabilité temporelle des émissions et leur évolution au cours des différentes phases de fonctionnement des appareils.

Les PUF, une fois émises dans l'atmosphère, peuvent subir des transformations physico-chimiques telles que l'oxydation, la coagulation, la condensation ou l'évaporation. Ces processus sont susceptibles d'affecter la taille des particules ainsi que leur composition chimique, influençant ainsi leur impact environnemental et sanitaire. Il est donc essentiel de comprendre le devenir des PUF après émission, notamment leur vieillissement et leurs transformations, en réalisant des essais dans des conditions contrôlées, à l'aide d'outils spécifiques tels que des chambres de simulation atmosphérique.

# ANNEXE 1 : CARACTERISATION DES COMBUSTIBLES UTILISES DANS LE PROJET

---

Afin d'identifier les caractéristiques des combustibles qui pourraient avoir un impact sur les émissions de particules ultrafines, il est nécessaire de caractériser les combustibles utilisés dans ce projet. Les combustibles considérés sont les granulés, les bûches de bois et les bûches densifiées, et les paramètres considérés sont :

- Nature du bois
- Humidité
- Teneur en cendres
- Pouvoir calorifique
- Composition chimique élémentaire

Dans le cadre du projet PERICLES, l'équipe ERBE du laboratoire LERMAB est responsable de la caractérisation des combustibles utilisés. Cette caractérisation se compose de différentes mesures pour chaque combustible : humidité, teneur en cendres, pouvoir calorifique et composition chimique élémentaire. Pour réaliser ces analyses, différents protocoles ont été respectés selon les normes en vigueur correspondantes. Ces protocoles seront succinctement détaillés puis les résultats par type de combustible sont détaillés.

L'intégralité de ces résultats d'analyses permettra de mieux comprendre les mécanismes de combustion se déroulant dans les appareils de chauffage dans lesquels ils seront utilisés.

## Méthodologie

Les mesures réalisées sur les combustibles (granulés, bûches et bûches densifiées) sont les suivantes :

- Humidité sur brut (mesure réalisée selon la norme NF EN ISO 18134) : Les mesures sont réalisées par séchage du combustible en étuve à 103°C pendant une durée de 24h. Le résultat, exprimé en pourcentage par rapport à la masse humide initiale, est la moyenne de trois mesures effectuées séparément.
- Teneur en cendres (mesure réalisée selon la norme NF EN ISO 18122) : La teneur en cendres est obtenue par pesée du résidu après une incinération en four à mouffles à 550°C d'échantillons anhydres et broyés. Le résultat, exprimé en pourcentage par rapport à la masse anhydre, est la moyenne de trois mesures effectuées séparément. Cette température de 550°C est assimilée à des températures classiquement retrouvées dans les foyers d'installations domestiques au bois (puissance inférieure à 100 kW).
- Le pouvoir calorifique (mesure réalisée selon la norme NF EN ISO 18125) : Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est obtenu par l'intermédiaire d'essais en bombe calorimétrique, à partir d'échantillons anhydres. Le résultat, exprimé en  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , est la moyenne de trois mesures successives. A partir du résultat de PCS, le pouvoir calorifique inférieur sec ( $\text{PCI}_s$ ) a été calculé avec la teneur en hydrogène déterminée par l'analyse de la composition chimique de chaque combustible. Le pouvoir calorifique inférieur humide ( $\text{PCI}_h$ ) prend en compte l'humidité sur brut déterminée de l'échantillon et correspond donc à l'énergie réellement dégagée du combustible dans un appareil de chauffage. Les résultats sont exprimés en  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .
- La composition chimique (mesure réalisée selon la norme NF EN ISO 16948) : Pour appréhender au mieux le comportement du combustible et les émissions associées, la connaissance de la composition chimique du combustible est un point clé. Ces analyses sont réalisées par un sous-traitant certifié COFRAC.

## Les granulés

Des essais de combustion dans un poêle à granulés sont réalisés par le LNE. Trois types de granulés différents ont été testés. Ces granulés sont issus du commerce et destinés à une utilisation dans des installations de chauffage domestique. Il s'agit de granulés, produits par des producteurs français importants, présents sur le marché national. Ces granulés sont donc typiques de ce qu'utilisent les ménages français.

Un sac de chaque lot a été envoyé au Lermab pour caractérisation. Les résultats de cette caractérisation sont présentés par la suite.

Le Tableau 7 présente la provenance des granulés et la première partie des résultats d'analyse.

Granulés	Composition	Certification	Humidité sur brut (%)	Taux de cendres 550°C (%)	PCS (kJ/kg)
Granulé 1	100% résineux	DIN plus A1	6,15	0,29	20 350
Granulé 2	80% feuillus 20% résineux	EN plus A1 et DIN plus A1	5,22	0,48	20 180
Granulé 3	100% résineux	DIN plus A1	6,10	0,60	20 300

Tableau 7 : Mesure de l'humidité, du taux de cendres et du PCS des granulés.

Les valeurs obtenues donnent des résultats classiques et attendus pour tous les granulés de bois testés. Cependant, de petites comparaisons sont à relever :

- Le granulé 1 et le granulé 3 possèdent une humidité quasi identique ;
- Le granulé 2 est plus sec que les deux autres (différence de 18%) ;
- Le granulé 3 a un taux de cendres deux fois plus élevé que le granulé 1 (même composition) ;
- Le granulé 2 (composé à 80% de feuillus) possède un taux de cendres intermédiaire entre les deux autres ;
- Les trois granulés ont un PCS quasi identique (le PCS du granulé 2 est plus faible de 1% par rapport aux deux autres).

Concernant l'humidité et le taux de cendres, tous ces granulés respectent la réglementation NF EN ISO 17225-2 A1 pour leur commercialisation (humidité inférieure à 10% et taux de cendres inférieur à 0,7%).

Le Tableau 8 présente les résultats d'analyse de la composition de ces granulés en éléments majeurs.

Granulés	Carbone total (%)	Hydrogène total (%)	Azote total (%)	Oxygène (calculé, %)
Granulé 1	51,1	6,52	<0,1	42,37
Granulé 2	50,6	6,41	<0,1	42,97
Granulé 3	50,7	6,41	<0,1	42,88

Tableau 8 : Composition des granulés en éléments majeurs.

Les analyses obtenues présentent des valeurs tout à fait cohérentes et comparables (2% maximum de différence entre granulés). Concernant la composition en éléments majeurs, tous ces granulés respectent la réglementation (NF EN ISO 17225-2) pour leur commercialisation (teneur en azote inférieure à 0,3%) et donc leur certification.

De ces valeurs de composition en hydrogène, la valeur d'humidité et de PCS préalablement mesurées, les valeurs de PCI<sub>s</sub> et PCI<sub>h</sub> peuvent être déterminées. Le Tableau 9 présente les résultats.

Granulés	PCI <sub>s</sub> (kJ/kg)	PCI <sub>h</sub> (kJ/kg)
Granulé 1	18 880	17 560
Granulé 2	18 730	17 620
Granulé 3	18 850	17 550

*Tableau 9 : PCI<sub>s</sub> et PCI<sub>h</sub> des granulés.*

Les valeurs de PCI<sub>h</sub> sont très similaires entre granulés (1% maximum de différence entre granulés). De plus, concernant le PCI<sub>h</sub>, tous ces granulés respectent la réglementation (NF EN ISO 17225-2) pour leur commercialisation (PCI<sub>h</sub> supérieur à 16 500 kJ/kg) et donc leur certification.

Le Tableau 10 présente la composition des granulés en éléments mineurs.

Éléments	S (mg/kg)	Cl (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Sn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Th (mg/kg)	Va (mg/kg)	Co (mg/kg)	Sb (mg/kg)	As (mg/kg)	Se (mg/kg)	Te (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Hg (mg/kg)
Granulé 1	96	<70	<0,4	4,5	<1	<3	2,3	<1	8	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	20	<0,1
Granulé 2	150	<70	<0,4	<1	<1	<3	<1	<1	10	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	88	<0,1
Granulé 3	<60	<70	<0,4	1,1	1,2	<3	<1	<1	11	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	103	<0,1

Tableau 10 : Composition des granulés en éléments mineurs.

Ces valeurs ne présentent pas de résultats surprenants. Il est à noter que le granulé 2, composé à 80% de feuillus, possède une teneur en soufre (S) la plus élevée ; et que le granulé 3, composé à 100% de résineux, possède une teneur en Manganèse (Mn) la plus élevée. Concernant la composition en éléments mineurs, tous ces granulés respectent la réglementation (NF EN ISO 17225-2) pour leur commercialisation et donc leur certification : teneur en soufre (S) inférieure à 0,04% (ici max à 0,015%), teneur en chlore (Cl) inférieure à 0,02% (ici inférieure à 0,007%), teneur en cadmium (Cd) inférieure à 0,5 mg/kg, teneur en chrome (Cr) inférieure à 10 mg/kg, teneur en cuivre (Cu) inférieure à 10 mg/kg, teneur en nickel (Ni) inférieure à 10 mg/kg, teneur en plomb (Pb) inférieure à 10 mg/kg, teneur en zinc (Zn) inférieure à 100 mg/kg, teneur en arsenic (As) inférieure à 1 mg/kg et teneur en mercure (Hg) inférieure à 0,1 mg/kg.

## Les bûches

Des essais de combustion dans un poêle à bûches sont réalisés par l’Ineris. Deux bûches densifiées et onze bûches de hêtre ont été testés :

- Bûche densifiée A : vendues comme 100% bois sans écorce (non vendues en bûches de nuit) ;
- Bûche densifiée B : vendues comme 100% bois à partir de copeaux, sciures et connexes industriels de pin maritime (non vendues en bûches de nuit) ;
- 8 bûches de hêtre avec présence d’écorce (BAE 1 à 8) ;
- 3 bûches de hêtre sans écorce (BSE 9 à 11).

Un échantillon de chaque bûche a été envoyé au Lermab pour caractérisation. L’Ineris a réalisé les mesures d’humidité des échantillons de bûches avant expédition au Lermab. Les résultats d’humidité obtenus par l’Ineris sont présentés avec les autres résultats de caractérisation réalisés par le Lermab.

Concernant les bûches de hêtre avec écorces, un bilan massique après passage en étuve (24h) a été réalisé pour quantifier la proportion d’écorces de chaque morceau envoyé. Cette proportion n’est peut-être pas représentative des bûches testées lors des essais de combustion mais donne néanmoins une indication qui peut expliquer des différences de résultats de caractérisation. Le Tableau 11 présente les proportions d’écorces des 8 bûches avec écorces.

Bûches	Masse de bois (g)	Masse d’écorces (g)	Part d’écorces (%)
BAE 1	156,5	8,5	5,2%
BAE 2	144,8	11,7	7,5%
BAE 3	116,2	6,4	5,2%
BAE 4	172,1	8,4	4,7%
BAE 5	80	1,9	2,3%
BAE 6	101,3	4,7	4,4%
BAE 7	175,2	4,8	2,7%
BAE 8	133,2	12	8,3%

Tableau 11 : Proportion d’écorces des 8 bûches de hêtre avec écorces (BAE)

Toutes les bûches possèdent moins de 10% en masse d'écorces. La bûche 5 présente la part d'écorces la plus faible (2,3%) alors que la bûche 8 présente la part d'écorces la plus élevée (8,3%).

Le Tableau 12 présente les résultats d'humidité, de taux de cendres et de PCS des 11 bûches de hêtre et des 2 bûches densifiées.

Bûches	Humidité sur brut (%)	Taux de cendres 550°C (%)	PCS (kJ/kg)
BAE 1	14,67	0,65	18 790
BAE 2	15,12	0,82	18 510
BAE 3	15,18	0,55	18 480
BAE 4	14,57	0,73	18 710
BAE 5	15,85	0,88	19 380
BAE 6	14,86	0,70	19 020
BAE 7	16,29	0,51	18 670
BAE 8	15,08	0,86	18 560
BSE 9	15,78	0,37	18 550
BSE 10	15,06	0,31	18 810
BSE 11	16,04	0,39	18 760
Bûche densifiée A	10,7	1,70	19 250
Bûche densifiée B	10	0,81	19 690

Tableau 12 : Mesure de l'humidité, du taux de cendres et du PCS des bûches de hêtre avec écorce (BAE) et sans écorce (BSE)

Ces résultats sont globalement cohérents avec des ordres de grandeurs attendus pour des bûches de hêtre. Les bûches de hêtre présentent des humidités similaires autour de 15%. Les taux de cendres des 8 bûches avec écorces (BAE 1 à 8) sont plus élevés (0,71% de moyenne) que les 3 bûches sans écorces (BSE 9 à 11) avec 0,36% de moyenne. Tout comme l'humidité, les bûches de hêtre présentent des PCS similaires autour de 18 750 kJ/kg. La bûche 5 possède le PCS le plus élevé (19 380 kJ/kg) alors que la bûche 3 possède le PCS le plus faible (18 480 kJ/kg). Les bûches 9 à 11 sans écorces auraient pu donner une tendance avec des PCS plus élevés que ceux des bûches avec écorces mais la faible proportion d'écorces (moins de 10%) ne permet pas d'observer cela.

La réglementation des bûches (NF EN ISO 17225-5) indique uniquement des critères en termes d'humidité. Toutes les bûches de hêtre se positionnent dans la classe A1 car leur humidité se situe entre 10 et 20%.

Les bûches densifiées sont plus sèches que les bûches de hêtre (30% de différence). Elles présentent des taux de cendres plus élevés que les bûches de hêtre (surtout la bûche densifiée A), et peut s'expliquer par la présence plus importante d'écorces dans les bûches densifiées. Le taux de cendres de la bûche densifiée A est plus de deux fois supérieur à celui de la bûche densifiée B. Ce résultat est surprenant étant donné que le fabricant de la bûche densifiée A mentionne du bois sans écorce dans

sa composition. Le PCS des bûches densifiées est plus élevé que celui des bûches de hêtre et peut s'expliquer par le fait que les bûches densifiées possèdent du résineux dans leur composition.

En comparant l'humidité et la teneur en cendres à 550°C des deux bûches densifiées avec la réglementation (NF EN ISO 17225-3) pour leur commercialisation, la bûche densifiée A se positionne dans la classe A2 car sa teneur en cendres de 1,70% se situe entre 1 et 3% ; alors que la bûche densifiée B se positionne dans la classe A1 car son humidité de 10% est inférieure à 12% et sa teneur en cendres de 0,81% est inférieure à 1% (sachant que la classe A1 représente une meilleure qualité de bûche densifiée que la classe A2).

Le Tableau 13 présente les résultats d'analyse de la composition de ces bûches en éléments majeurs.

Bûches	Carbone total (%)	Hydrogène total (%)	Azote total (%)	Oxygène (calculé, %)
BAE 1	49,7	6,29	0,11	43,87
BAE 2	49,8	6,25	0,11	43,81
BAE 3	49,5	6,26	0,11	44,11
BAE 4	49,6	6,29	0,11	43,98
BAE 5	49,1	6,29	0,11	44,47
BAE 6	49,4	6,31	0,13	44,13
BAE 7	49,5	6,1	0,12	44,25
BAE 8	49,6	6,15	0,12	44,11
BSE 9	49,4	6,27	<0,1	44,31
BSE 10	49,9	6,28	<0,1	43,80
BSE 11	49,6	6,32	<0,1	44,06
Bûche densifiée A	49,3	5,95	0,33	44,38
Bûche densifiée B	49,3	5,93	0,18	44,57

Tableau 13 : Composition des bûches de hêtre avec écorce (BAE) et sans écorce (BSE) en éléments majeurs.

Ces valeurs restent dans les standards du bois et sont comparables. A noter que la teneur en azote des bûches de hêtre avec écorces (BAE 1 à 8) est légèrement plus grande que celle des bûches de hêtre sans écorces (BSE 9 à 11). Concernant la composition en éléments majeurs des bûches, aucune valeur n'est exigée selon la réglementation (NF EN ISO 17225-5) pour leur commercialisation.

La teneur en azote des bûches densifiées est 2 à 3 fois plus élevée que celle des bûches de hêtre. Cela peut s'expliquer une fois de plus par la présence plus importante d'écorces dans les bûches densifiées. En comparant la composition en éléments majeurs des deux bûches densifiées avec la réglementation (NF EN ISO 17225-3) pour leur commercialisation, la bûche densifiée A se positionne dans la classe A2 car sa teneur en azote de 0,33% se situe entre 0,3 et 0,7% alors que la bûche densifiée B se positionne dans la classe A1 car sa teneur en azote de 0,18% est inférieure à 0,3% (sachant que la classe A1 représente une meilleure qualité de bûche densifiée que la classe A2).

D'après ces valeurs de composition en hydrogène, la valeur d'humidité et de PCS préalablement mesurées, nous pouvons calculer les valeurs de  $PCI_s$  et  $PCI_h$ . Le Tableau 14 présente les résultats.

Bûches	$PCI_s$ (kJ/kg)	$PCI_h$ (kJ/kg)
BAE 1	17 370	14 450
BAE 2	17 090	14 130
BAE 3	17 070	14 100
BAE 4	17 290	14 400
BAE 5	17 950	14 710
BAE 6	17 590	14 600
BAE 7	17 290	14 070
BAE 8	17 170	14 210
BSE 9	17 140	14 040
BSE 10	17 400	14 400
BSE 11	17 340	14 150
Bûche densifiée A	17 910	15 720
Bûche densifiée B	18 350	16 260

Tableau 14 :  $PCI_s$  et  $PCI_h$  des bûches.

Les  $PCI_s$  et  $PCI_h$  des bûches de hêtre sont très similaires et ne présentent pas de valeurs surprenantes. Comme le PCS est plus élevé avec une humidité plus faible, le  $PCI_h$  des bûches densifiées est supérieur à celui des bûches de hêtre. En comparant les valeurs de  $PCI_h$  des deux bûches densifiées avec la réglementation (NF EN ISO 17225-3) pour leur commercialisation, celles-ci se positionnent dans la classe A1 car leur  $PCI_h$  est supérieur à 15 500 kJ/kg (sachant que la classe A1 représente la meilleure qualité de bûche densifiée). Concernant le  $PCI_h$  des bûches de hêtre, aucune valeur n'est exigée selon la réglementation (NF EN ISO 17225-5) pour leur commercialisation.

Le Tableau 15 présente la composition des bûches en éléments mineurs.

Éléments	S (mg/kg)	Cl (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Sn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Th (mg/kg)	Va (mg/kg)	Co (mg/kg)	Sb (mg/kg)	As (mg/kg)	Se (mg/kg)	Te (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Hg (mg/kg)
BAE 1	171	<70	<0,4	<1	1,5	<3	1,4	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	118	<0,1
BAE 2	157	<70	<0,4	<1	2,1	<3	<1	<1	6	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	85	<0,1
BAE 3	106	<70	<0,4	<1	1,3	<3	1,6	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	120	<0,1
BAE 4	95	<70	<0,4	<1	1,4	<3	1,4	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	123	<0,1
BAE 5	152	<70	<0,4	<1	1,2	<3	1,3	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	193	<0,1
BAE 6	114	<70	<0,4	<1	1,4	<3	1,3	<1	6	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	194	<0,1
BAE 7	107	<70	<0,4	<1	1,2	<3	1,4	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	147	<0,1
BAE 8	99	<70	<0,4	<1	1,2	<3	<1	<1	6	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	94	<0,1
BSE 9	86	<70	<0,4	<1	1,5	<3	1,2	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	107	<0,1
BSE 10	126	<70	<0,4	<1	1,2	<3	1,2	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	101	<0,1
BSE 11	117	<70	<0,4	<1	1,1	<3	1,4	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	126	<0,1
Bûche densifiée A	263	<70	<0,4	3,7	2,6	<3	1,9	<1	20	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	84	<0,1
Bûche densifiée B	96	<70	<0,4	<1	1,5	<3	<1	<1	<5	<1	<0,8	<0,8	<0,1	<1	<0,1	<0,1	95	<0,1

Tableau 15 : Composition des bûches en éléments mineurs

Ces valeurs ne présentent pas de résultats surprenants. Toutes les bûches présentent des teneurs en éléments mineurs similaires avec des quantités de soufre (S) et manganèse (Mn) nettement plus élevées que les autres éléments mineurs. Aucune conclusion ne peut être tirée pour différencier les bûches avec et sans écorces. La seule valeur différente des autres est la teneur en soufre beaucoup plus élevée pour la bûche densifiée A (2 à 3 fois plus élevée). Concernant la composition en éléments mineurs des bûches, aucune valeur n'est exigée selon la réglementation (NF EN ISO 17225-5) pour leur commercialisation. Concernant la composition en éléments mineurs, les deux bûches densifiées respectent la classe A1 de la réglementation (NF EN ISO 17225-3) pour leur commercialisation : teneur en soufre (S) inférieure à 0,04% (ici max à 0,0263%), teneur en chlore (Cl) inférieure à 0,02% (ici inférieure à 0,007%), teneur en cadmium (Cd) inférieure à 0,5 mg/kg, teneur en chrome (Cr) inférieure à 10 mg/kg, teneur en cuivre (Cu) inférieure à 10 mg/kg, teneur en nickel (Ni) inférieure à 10 mg/kg, teneur en plomb (Pb) inférieure à 10 mg/kg, teneur en zinc (Zn) inférieure à 100 mg/kg, teneur en arsenic (As) inférieure à 1 mg/kg et teneur en mercure (Hg) inférieure à 0,1 mg/kg.

### **Comparaison des résultats**

Concernant la caractérisation des granulés, les valeurs obtenues sont similaires malgré le fait que le granulé 2 soit composé à 80% de feuillus. De petites différences sont à relever parmi lesquelles :

- Le granulé 1, composé à 100% de résineux, possède le taux de cendres le plus faible ;
- Le granulé 2, composé à 80% de feuillus, possède une teneur en soufre (S) la plus élevée ;
- Le granulé 3, composé à 100% de résineux, possède une teneur en Manganèse (Mn) la plus élevée.

Il est à noter que les trois granulés caractérisés respectent leur certification.

La caractérisation des bûches de hêtre montre que les valeurs obtenues sont similaires et comparables. De petites différences sont tout de même à relever parmi lesquelles :

- Les taux de cendres des 8 bûches avec écorces sont plus élevés (avec 0,71% de moyenne) que les 3 bûches sans écorces (avec 0,36% de moyenne) ;
- La teneur en azote des bûches de hêtre avec écorces est légèrement plus grande que celle des bûches de hêtre sans écorces.

La caractérisation des bûches densifiées montre que la bûche densifiée B est de meilleure qualité que la bûche densifiée A étant donné qu'elle possède une humidité et un taux de cendres plus faibles et un PCI<sub>n</sub> plus élevé.

Les principales différences entre les bûches de hêtre et les bûches densifiées sont les suivantes :

- Les bûches densifiées sont plus sèches (humidité proche de 10%) que les bûches de hêtre (humidité autour de 15%) ;
- Les bûches densifiées possèdent un taux de cendres plus élevé que les bûches de hêtre (2 à 5 fois plus pour la bûche densifiée A) ;
- La teneur en azote des bûches densifiées est 2 à 3 fois supérieure à celle des bûches de hêtre ;
- La teneur en soufre de la bûche densifiée A est 2 à 3 fois supérieure à celle des autres bûches.

Notons que globalement, les combustibles ont des caractéristiques assez proches les uns des autres. Les différences apparaissent principalement dès lors que des mélanges sont réalisés pour fabriquer des granulés ou des bûches densifiées. La présence ou non d'écorce joue un rôle important sur la teneur en cendres notamment.

## ANNEXE 2

		µg/Filtre																
		Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn
Hêtre avec écorce	Allumage (Batch 1)	42.90	0.03	1.43	0.03	0.03	1.26	0.13	20.30	0.71	9.27	2.03	3.85	0.32	0.00	1.88	0.03	1.69
	Allure nominale (Batch 3)	46.10	0.03	1.15	0.03	0.03	1.72	0.13	20.30	0.68	9.80	2.27	4.70	0.32	0.00	1.94	0.03	1.96
	Allure nominale (Batch 5)	45.70	0.03	1.70	0.03	0.03	1.10	0.13	15.40	0.67	9.30	1.89	3.39	0.32	0.00	2.35	0.03	1.43
	Allure réduite (Batch 7)	39.50	0.03	1.96	0.00	0.03	1.05	0.13	11.70	0.44	6.59	1.16	3.10	0.32	0.00	1.37	0.00	1.21
Hêtre sans écorce	Allumage (Batch 1)	46.70	0.03	4.24	0.00	0.00	1.06	0.47	14.80	0.53	7.28	1.23	1.30	0.32	0.00	1.52	0.03	2.98
	Allure nominale (Batch 3)	45.50	0.03	2.62	0.96	0.93	1.64	0.13	19.10	0.58	7.25	1.55	1.30	0.32	0.00	1.30	0.03	5.88
	Allure nominale (Batch 5)	37.90	0.03	1.95	0.00	0.00	0.91	0.13	10.20	0.51	6.68	1.45	1.30	0.32	0.00	1.10	0.03	2.18
	Allure réduite (Batch 7)	40.00	0.03	1.93	0.50	0.93	1.63	0.13	19.50	0.56	6.46	1.40	1.30	0.32	0.00	1.57	0.03	1.16
Bûche densifié A	Allumage (Batch 1)	44.70	0.07	1.48	0.03	0.03	1.29	0.47	35.50	0.84	9.34	2.07	4.14	0.32	0.00	2.22	0.03	4.18
	Allure nominale (Batch 3)	47.00	0.06	1.39	0.03	0.03	0.94	0.13	16.10	0.56	6.68	0.96	5.32	0.43	0.00	1.68	0.00	3.94
	Allure nominale (Batch 5)	50.60	0.07	4.86	0.07	0.03	1.70	0.13	34.20	0.86	7.67	1.55	3.81	0.55	0.00	1.96	0.03	7.95
	Allure réduite (Batch 7)	55.60	0.03	5.45	0.11	0.03	2.63	0.27	39.40	1.09	7.85	1.95	7.64	0.59	0.00	2.88	0.03	7.76
Bûche densifié A	Allumage (Batch 1)	40.60	0.03	2.00	0.47	0.00	0.89	0.13	15.70	0.53	6.56	1.00	1.30	0.32	0.00	1.70	0.03	1.37
	Allure nominale (Batch 3)	38.70	0.03	2.04	0.00	0.00	0.88	0.13	9.41	0.42	6.82	1.09	1.30	0.32	0.00	1.59	0.00	1.11
	Allure réduite (Batch 7)	40.20	0.05	1.81	0.00	0.00	1.73	0.13	13.90	0.57	7.05	1.79	1.30	0.32	0.00	1.14	0.03	0.89
	LQ (µg/filtre)	<b>2.60</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.26</b>	<b>2.60</b>	<b>0.13</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>2.60</b>	<b>0.05</b>	<b>2.60</b>	<b>0.26</b>	<b>0.05</b>	<b>0.26</b>
	Blanc (µg/filtre)	35.10	0.03	0.96	0.00	0.00	0.57	0.13	7.86	0.31	5.68	0.55	1.30	0.32	0.00	1.10	0.00	0.64

Tableau 16 : Comparaison des valeurs mesurées avec les limites de quantification et les valeurs du blanc pour les métaux

		µg/Filtre										
		F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Hêtre avec écorce	Allumage (Batch1)	0.38	2.69	0.00	1.74	9.16	0.00	1.68	1.02	13.80	0.46	1.91
	Allure nominale (Batch 3)	0.38	5.95	0.00	2.76	27.40	0.00	2.96	0.86	29.40	0.61	4.97
	Allure nominale (Batch 5)	0.38	5.51	0.00	7.49	22.70	0.00	2.76	0.97	23.20	0.42	1.27
	Allure réduite (Batch 7)	0.38	3.76	0.00	5.16	12.90	0.00	1.39	3.91	8.40	0.00	1.90
Hêtre sans écorce	Allumage (Batch1)	0.22	1.08	0.00	1.08	4.33	0.00	0.00	1.27	4.03	0.90	5.39
	Allure nominale (Batch 3)	0.52	20.50	0.00	5.91	15.70	0.00	3.92	3.09	14.80	0.39	5.02
	Allure nominale (Batch 5)	0.38	2.86	0.00	1.84	15.30	0.00	1.59	1.73	18.70	0.42	0.75
	Allure réduite (Batch 7)	0.59	1.08	0.00	3.41	4.33	0.00	0.00	2.44	6.70	0.39	4.66
Bûche densifié A	Allumage (Batch1)	0.38	7.41	0.00	5.71	21.60	0.00	3.18	1.01	25.60	0.72	6.32
	Allure nominale (Batch 3)	0.38	15.90	0.00	10.70	40.10	0.00	2.80	4.16	44.20	0.63	4.21
	Allure nominale (Batch 5)	0.38	15.60	0.00	12.30	43.90	0.00	2.86	2.93	44.30	0.61	4.67
	Allure réduite (Batch 7)	1.23	1.20	0.00	11.90	40.30	0.00	11.00	4.20	32.90	1.10	13.30
Bûche densifié A	Allumage (Batch1)	0.38	3.59	0.00	1.88	13.70	0.00	2.47	2.43	9.17	0.45	2.01
	Allure nominale (Batch 3)	0.00	4.22	0.00	7.94	18.80	0.00	1.26	1.78	22.40	0.41	1.40
	Allure réduite (Batch 7)	0.00	2.77	0.00	2.02	9.85	0.00	0.88	4.41	4.12	0.46	3.37
	LQ (µg/filtre)	<b>0.76</b>	<b>0.76</b>	<b>1.90</b>	<b>0.76</b>	<b>1.91</b>	<b>3.80</b>	<b>0.78</b>	<b>0.39</b>	<b>0.78</b>	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>
	Blanc (µg/filtre)	0.38	0.79	0.00	0.00	2.39	0.00	0.91	1.95	1.04	0.00	0.00

Tableau 17 : Comparaison des valeurs mesurées avec les limites de quantification et les valeurs du blanc pour les anions et cations

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] 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.
- [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] B. Stacey, R. M. Harrison, and F. Pope, “Evaluation of ultrafine particle concentrations and size distributions at London Heathrow Airport,” *Atmospheric Environment*, vol. 222, p. 117148, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117148.
- [4] M. P. Keuken, M. Moerman, P. Zandveld, J. S. Henzing, and G. Hoek, “Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands),” *Atmospheric Environment*, vol. 104, pp. 132–142, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.015.
- [5] 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.
- [6] “AVIS et RAPPORT de l’Anses relatif à l’identification, la catégorisation et la hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l’air,” Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l’alimentation, de l’environnement et du travail. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-lidentification-la-categorisation-et-la-hierarchisation-de>
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] A. L. Moreno-Ríos, L. P. Tejeda-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.
- [12] “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>
- [13] M. Tuddenham, “Le MTE publie un plan d’actions pour réduire de 50% par an d’ici 2030 les émissions de PM2,5 du chauffage au bois,” Citepa. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: [https://www.citepa.org/fr/2021\\_08\\_b03/](https://www.citepa.org/fr/2021_08_b03/)
- [14] *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>
- [15] “RAPPORT de l’Anses - Particules de l’air ambiant extérieur - Effets sanitaires des particules de l’air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l’alimentation, de l’environnement et du travail.” Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.anses.fr/fr/content/rapport-de-lanses-particules-de-lair-ambiant-exterieur-effets-sanitaires-des-particules-de>

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] R. Trojanowski and V. Fthenakis, "Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, pp. 515–528, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.007.
- [20] 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.
- [21] J. Poláčik, T. Sitek, J. Pospíšil, L. Šnajdárek, and M. Lisý, "Emission of fine particles from residential combustion of wood: Comparison of automatic boiler, manual log feed stove and thermo-gravimetric analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, p. 123664, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123664.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] "EPOCHAG," La librairie ADEME. Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: <https://librairie.ademe.fr/air/7378-emissions-primaires-et-secondaires-de-particules-par-des-appareils-de-chauffage-a-granules.html>
- [26] F. Ozil, F. Haas, and G. Trouvé, "SIZE DISTRIBUTIONS AND EMISSION FACTORS OF PM1 AND PM2.5 DURING WOOD COMBUSTION IN DOMESTIC FIREPLACES".
- [27] H. Rinta-Kiikka *et al.*, "The Effect of Wood Species on Fine Particle and Gaseous Emissions from a Modern Wood Stove," *Atmosphere*, vol. 15, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2024, doi: 10.3390/atmos15070839.
- [28] Y. Du, W. Lin, and P. Glarborg, "Particulate emissions from a modern wood stove – Influence of KCl," *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 1215–1227, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.02.048.
- [29] E. Caracci, L. Canale, G. Buonanno, and L. Stabile, "Sub-micron particle number emission from residential heating systems: A comparison between conventional and condensing boilers fueled by natural gas and liquid petroleum gas, and pellet stoves," *Science of The Total Environment*, vol. 827, p. 154288, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154288.
- [30] 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.
- [31] I. V. Dyakov, B. Bergmans, S. Bram, J. D. Ruyck, and F. Contino, "Experimental Study of Particle Emissions from a Modern 5 kW Pellet Stove," *ERJ*, vol. 7, no. 2, pp. 19–23, Oct. 2016, doi: 10.3844/erjsp.2016.19.23.
- [32] D. Mavrocordatos, R. Kaegi, and V. Schmatloch, "Fractal analysis of wood combustion aggregates by contact mode atomic force microscopy," *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 36, pp. 5653–5660, Dec. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00702-1.

- [33] T. Torvela *et al.*, “Effect of wood combustion conditions on the morphology of freshly emitted fine particles,” *Atmospheric Environment*, vol. 87, pp. 65–76, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.01.028.
- [34] S. Ozgen *et al.*, “Analysis of the chemical composition of ultrafine particles from two domestic solid biomass fired room heaters under simulated real-world use,” *Atmospheric Environment*, vol. 150, pp. 87–97, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.11.048.
- [35] A. K. Frey *et al.*, “Optical and Chemical Characterization of Aerosols Emitted from Coal, Heavy and Light Fuel Oil, and Small-Scale Wood Combustion,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 1, pp. 827–836, Jan. 2014, doi: 10.1021/es4028698.

# INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

## TABLEAUX

Tableau 1 : Consommation de combustible par phases de combustion pour le granulé 1 (moyenne sur trois essais répétés) .....	26
Tableau 2 : Contribution des PUF au nombre de particules PM <sub>1</sub> obtenue pour différents granulés et phases de combustion.....	26
Tableau 3 : Facteurs d'émission de PUF pour chaque granulé testé et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Prélèvement à 8 diamètres .....	52
Tableau 4 : Facteurs d'émission de PUF pour les différents points de prélèvements et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Granulé 1 .....	53
Tableau 5 : Facteurs d'émission de PUF pour chaque bûche testée et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Prélèvement à 8 diamètres .....	53
Tableau 6 : Facteurs d'émission de PUF pour les différents points de prélèvements et chaque phase d'essai (moyenne sur trois essais répétés) – Bûche de hêtre avec écorce.....	54
Tableau 7 : Mesure de l'humidité, du taux de cendres et du PCS des granulés. ....	61
Tableau 8 : Composition des granulés en éléments majeurs. ....	61
Tableau 9 : PCI <sub>s</sub> et PCI <sub>h</sub> des granulés. ....	62
Tableau 10 : Composition des granulés en éléments mineurs. ....	63
Tableau 11 : Proportion d'écorces des 8 bûches de hêtre avec écorces (BAE).....	64
Tableau 12 : Mesure de l'humidité, du taux de cendres et du PCS des bûches de hêtre avec écorce (BAE) et sans écorce (BSE).....	65
Tableau 13 : Composition des bûches de hêtre avec écorce (BAE) et sans écorce (BSE) en éléments majeurs. ....	66
Tableau 14 : PCI <sub>s</sub> et PCI <sub>h</sub> des bûches.....	67
Tableau 15 : Composition des bûches en éléments mineurs .....	68
Tableau 16 : Comparaison des valeurs mesurées avec les limites de quantification et les valeurs du blanc pour les métaux. ....	70
Tableau 17 : Comparaison des valeurs mesurées avec les limites de quantification et les valeurs du blanc pour les anions et cations. ....	70

## FIGURES

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) .....	13
Figure 2 : Schéma des zones de prise de poinçons sur le filtre pour l'analyse EC/OC.....	17
Figure 3 : Profil de puissance suivant le protocole BeReal pour l'appareil à granulés .....	18
Figure 4 : Protocole BeReal pour les appareils à bûches .....	19
Figure 5 : Evolution temporelle des émissions de gaz et de nombre de particules (PUF et PM <sub>1</sub> ), ainsi que de la consommation de granulés - Granulé 1 –.....	22
Figure 6 : Evolution temporelle de la distribution granulométrique des particules lors d'une instabilité de combustion du poêle à granulés – Granulé 1 – .....	23
Figure 7 : Évolution temporelle de la distribution granulométrique des particules émises pendant le transitoire de démarrage – Granulé 1 – Prélèvement à 8 diamètres en aval – Essai n°3.....	24
Figure 8 : Ratio PUF/Particules PM <sub>1</sub> en fonction du temps – Granulé 1.....	24
Figure 9 : Distribution granulométriques moyennes par phases – Granulé 1 –.....	25
Figure 10 : Facteurs d'émission en nombre par phases – Poêle à granulés – Particules PM <sub>1</sub> .....	27

Figure 11 : Facteurs d'émission en nombre de PUF par phases – Poêle à granulés .....	28
Figure 12 : Facteurs d'émission en nombre de particules PM <sub>1</sub> à différents points de prélèvements pour le granulé 1 .....	29
Figure 13 : Facteurs d'émission en nombre de PUF à différents points de prélèvements pour le granulé 1 .....	29
Figure 14 : 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 %) ..	30
Figure 15 : Observation microscopique de cendres – Poêle à granulés .....	31
Figure 16 : Observation microscopique de cendres – Poêle à granulés .....	31
Figure 17 : Observation microscopique de suies – Poêle à granulés .....	32
Figure 18 : Observation microscopique de suies – Poêle à granulés .....	32
Figure 19 : Observation microscopique de particules organiques – Poêle à granulés .....	33
Figure 20 : Observation microscopique de particules organiques – Poêle à granulés .....	33
Figure 21 : Effet du faisceau de rayons X sur les particules organiques (gauche : avant analyse EDX – droite : après analyse EDX) – Poêle à granulés .....	34
Figure 22 : Évolution temporelle des différentes grandeurs mesurées dans les fumées lors de la combustion de bois hêtre avec écorce ; Prélèvement à 8 diamètres du conduit à la sortie du poêle à bûches. A : allumage à froid, N : allure nominale, R : allure réduite .....	36
Figure 23 : 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 .....	38
Figure 24 : Concentrations en nombre et distribution granulométrique des particules émises au cours de deux cycles de fonctionnement d'un poêle à bûches [21] .....	39
Figure 25 : Variation des profils temporels des concentrations en nombre de particules PM <sub>1</sub> et de PUF dans les fumées (à gauche), et de la granulométrie instantanée (à droite), lors des essais réalisés avec le bois densifié B. ....	40
Figure 26 : Facteurs d'émission en nombre de particules PM <sub>1</sub> pour les différents combustibles bûches testés : A) moyennes journalières, B) par phase de combustion. ....	41
Figure 27 : Facteurs d'émission en nombre des PUF pour les différents combustibles testés, par phase de combustion. ....	42
Figure 28 : Contribution moyenne relative des PUF au nombre total de particules par phase de combustion, pour les différents combustibles testés. ....	43
Figure 29 : GMD des particules mesurées à 8D pour les différents types de bûches testées, en fonction des phases de combustion .....	43
Figure 30 : Évolution du facteur d'émission en nombre total de particules PM <sub>1</sub> en fonction du point de prélèvement d'aérosols .....	45
Figure 31 : Évolution du facteur d'émission en nombre de particules PUF en fonction du point de prélèvement d'aérosols .....	45
Figure 32 : Évolution de la granulométrie en fonction du point de prélèvement d'aérosols .....	46
Figure 33 : Observation microscopique de particules « majoritairement » organiques – combustion de bûches .....	47
Figure 34 : Observation microscopique de particules de suie – combustion de bûches .....	48
Figure 35 : Observation microscopique de particules inorganiques – combustion de bûches .....	49
Figure 36 : Comparaison des émissions de PUF entre les deux poêles étudiés, dans les conditions de mesure et de prélèvement définies du projet PERICLES .....	55

## SIGLES ET ACRONYMES

---

<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
<b>COV</b>	Composés Organiques Volatils
<b>COVT</b>	Composés Organiques Volatils Totaux
<b>CPC</b>	Condensation Particle Counter (Compteur de particules à condensation)
<b>DMA</b>	Differential Mobility Analyzer (Analyseur de mobilité différentielle)
<b>EC</b>	Carbone Élémentaire
<b>ELPI</b>	Electrical Low Pressure Impactor (Impacteur basse pression électrique)
<b>OC</b>	Carbone Organique
<b>PUF</b>	Particules UltraFines
<b>SMPS</b>	Scanning Mobility Particle Sizer (Spectromètre de mobilité électrique)
<b>TC</b>	Carbone Total
<b>TSP</b>	Total Suspended Particles (total des particules en suspension)

## L'ADEME EN BREF

Au cœur des missions qui lui sont confiées par le ministère de la Transition écologique, le ministère en charge de l'Energie et le ministère en charge de la Recherche, l'ADEME - l'Agence de la transition écologique – partage ses expertises, assure le financement et l'accompagnement de projets de transformation dans des domaines variés : énergie, économie circulaire, décarbonation de l'industrie, mobilité, bâtiment, qualité de l'air, consommation et production responsables, alimentation durable, bioéconomie, gestion des sols, adaptation au changement climatique et transition juste.

L'ADEME mobilise les citoyens, les entreprises et les territoires pour les aider à progresser vers une société plus sobre en carbone et économe en ressources. Résolument engagée dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, elle conseille, facilite et soutient les initiatives, de la recherche à la diffusion des solutions.

Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), l'ADEME met également ses capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

## LES COLLECTIONS DE L'ADEME



### FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



### CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



### ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



### EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard



### HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



## EMISSIONS DE PARTICULES ULTRAFINES DU CHAUFFAGE DOMESTIQUE AU BOIS

Le chauffage domestique au bois est une source importante d'émissions de particules fines (PM<sub>1</sub>) et ultrafines (PUF).

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. Les mesures ont été réalisées sur deux appareils récents : un poêle à bûches et un poêle à granulés.

La caractérisation des émissions de PUF nécessite de disposer de données de taille, de nombre et de la composition chimique.

Les résultats montrent que les PUF dominent les émissions en nombre de PM<sub>1</sub> pour les deux poêles étudiés, et que le type de combustible exerce une influence limitée sur les facteurs d'émission en nombre de PUF et de PM<sub>1</sub>.

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.

*La mesure des émissions de PUF par le chauffage domestique au bois nécessite des équipements et protocoles de mesure spécifiques, différents des équipements de mesure des particules de taille supérieure (PM<sub>2,5</sub> notamment).*

*Les quantités de PUF émises sont du même ordre de grandeur pour tous les combustibles testés (bûches, granulés). Cependant les différences de conception des appareils (bûches/granulés) rendent les comparaisons difficiles.*

00000

