

Fumisterie et performances d'installations de chauffage domestique au bois

BOICLEAN : Impact des
conduits sur le rendement et
les émissions particulaires de
poêles à bûches

RAPPORT

Avril
2023



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Benoit BRANDELET (LERMAB)
Julien LANDREAU (CERIC)
Lionel DRUETTE (CERIC)
Yann ROGAUME (LERMAB)
Kévin Pras (Seguin Duteriez)
Aymeric DE GALEMBERT (Seguin Duteriez)
Isabelle AUGEVEN-BOUR (ADEME)
Manon Vitel (ADEME)

CITATION DE CE RAPPORT

BRANDELET Benoit, ROGAUME Yann (LERMAB) LANDREAU Julien, DRUETTE Lionel (CERIC), PRAS Kevin (DUTERIEZ), 2023. Fumisterie et performances des chauffages domestiques au bois - BOICLEAN : Impact des conduits sur le rendement et les émissions particulaires d'appareils à bûches. Rapport. 102 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

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'oeuvre 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 est diffusé par l'ADEME

ADEME

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

Numéro de contrat : 1962C0016

Étude réalisée par Brandelet B., Rogauume Y., Landreau J., Druette L., Pras K., De Galembert A., pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : LERMAB

Appel à projet de recherche : Connaissances, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air (CORTEA)

Coordination technique - ADEME : Isabelle Augeven-Bour
Direction villes et territoires durables / Service qualité de l'Air

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	6
1.1. Contexte	6
1.2. Présentation du projet	7
2. RESUME DE L'ETAT DE L'ART	9
3. ETUDE DE L'IMPACT DES CONDUITS SUR LA COMBUSTION	10
3.1. Méthodologie	10
3.2. Bilan / Principaux résultats obtenus	22
3.3. Recherche de corrélations entre les paramètres étudiés	51
3.4. Conclusion de l'étude de l'impact des conduits sur la combustion et perspectives	56
4. ETUDE DE L'IMPACT DU TYPE DE CONDUIT SUR L'EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES PARTICULES	58
4.1. Méthodologie	58
4.2. Validation de la méthodologie appliquée	64
4.3. Résultats généraux	65
4.4. Analyses approfondies	75
4.5. Conclusion / Perspectives	83
5. PROTOTYPES ET TESTS EN CONDITIONS REALISTES	85
5.1. Méthodologie	85
5.2. Bilan / Principaux résultats obtenus	87
5.3. Conclusions / Perspectives	96
6. CONCLUSIONS GENERALES	97

RÉSUMÉ

Le bois énergie, et plus spécifiquement le chauffage au bois dans le secteur résidentiel, est la première énergie renouvelable utilisée en France et dans le monde. Cependant selon le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) ce secteur est responsable, en France en 2020, de 41% des émissions annuelles de particules fines PM_{2,5}, dont l'impact sanitaire est avéré. Des études ont évalué l'influence de la qualité du combustible, de la génération de l'appareil, des bonnes pratiques d'utilisation... Néanmoins, peu de travaux considèrent l'impact de la solution de fumisterie sur le rendement et les émissions de polluants des installations, ni même sur leur apport dans la restitution d'énergie ou les mécanismes d'évolution des particules qui s'y produisent.

Ce projet, lauréat de l'appel à projet CORTEA et mené par le LERMAB, le CERIC et Seguin Duteriez, a étudié l'impact du conduit d'évacuation des fumées sur les performances de deux appareils à bûches. Il avait pour objectifs de :

- Déterminer l'impact de la solution de fumisterie sur le fonctionnement de l'appareil et sur les mécanismes d'évolutions des particules et
- Développer des prototypes de conduits permettant d'améliorer les performances énergétiques du dispositif et de faciliter le piégeage des particules.

Une première étape a étudié plusieurs solutions d'évacuation des fumées sur deux appareils d'âges différents, en mesurant les caractéristiques des particules émises : à la sortie de l'appareil et à l'évacuation. Le gradient de température dans le conduit a été mis en évidence comme paramètre majeur impactant les mécanismes de croissance des particules.

La seconde partie a observé l'évolution de particules calibrées (en nombre et en taille) lors de leur parcours dans différents conduits sur une plateforme expérimentale. Ces expériences ont permis (i) de confirmer les observations précédentes, (ii) d'identifier les mécanismes de dépôts (thermophorèse essentiellement), et (iii) de déterminer le lien entre le gradient de température et ces mécanismes.

Eclairée par les résultats précédents, la troisième partie a testé deux prototypes de solutions d'évacuation permettant d'optimiser la combustion (réduction des émissions de monoxyde de carbone, de Composés Organiques Volatils et augmentation du rendement) et de favoriser la croissance des particules avant l'évacuation des fumées pour faciliter leur piégeage.

Les résultats obtenus sur les prototypes sont plus que probants. En effet, le rendement de l'installation est amélioré de 15 points en récupérant l'énergie de la fumée par échange avec le conduit de raccordement, et les réductions polluantes sont drastiquement réduites. De plus, les mécanismes de croissance des particules les plus élevés ont été observés sur ces prototypes.

Ce projet apporte de nombreux enseignements. Il confirme l'influence du type de conduit et de son dimensionnement dans la baisse à la source des émissions de polluants (particules, COVT) liée à l'optimisation de la combustion. Il montre également la participation du conduit à la réduction des émissions à l'évacuation par action sur la typologie de particules (nature et granulométrie) et en favorisant les mécanismes de dépôts.

Au-delà du chauffage domestique au bois, les résultats de ce projet pourraient trouver des applications dans le cas des systèmes de filtration industriels : le « pré-conditionnement » des particules à filtrer pourrait permettre de leur faire atteindre des tailles de coupure nécessaires à leur captation par des cyclones, ou autres procédés. En effet, chaque technologie de filtration agit sur une classe spécifique de taille de particules. Recentrer la taille des particules sur ces classes permettrait d'optimiser leur efficacité.

ABSTRACT

Wood energy, specifically wood heating in the residential sector, is the leading renewable energy used in France and around the world. CITEPA informs in their reports that domestic appliances (all combined) emitted, for the year 2020, 41 % of PM_{2.5} fine particles, whose health impact is proven. In order to reduce these emissions, studies have been carried out on the quality of the fuel, the generation of the device, good practices, etc. However, no studies mention the impact that smoke duct can have on the device performances. In addition, studies show that the characteristics of the particles progress in the exhaust duct.

This CORTEA project led by LERMAB, CERIC and Seguin Duteriez, studied the impact of the smoke evacuation duct on the performance of two log stoves. It had the following objectives:

- To determine the impact of the fumistry solution on the device performances and on the mechanisms of particles evolution;
- To develop prototypes of smoke ducts to improve the energy performances of the device and to facilitate the trapping of particles.

The first step was to test different smoke ducts on two generations of devices, while measuring different characteristics of the particles emitted at two levels: the outlet of the device and at the evacuation. This first step highlighted that some solutions optimized the combustion but caused a drop in the heating efficiency of the installation in the room. Other solutions behaved the opposite way. The second major result of this part is the understanding of the mechanisms of particles evolution in a conduit. Thus, the temperature gradient in the duct is the parameter which has the greatest impact on the particle growth mechanisms.

The second part consisted in designing an experimental platform to observe the evolution of calibrated particles (in number and in size) as they travelled through a conduit. Different sizes of particles were tested, as well as different conduits. Once again, the temperature gradient has the greatest impact on the evolution of the particles. The mechanisms of deposition (mainly thermophoresis) have also been precisely identified, as well as the link between the temperature gradient and these mechanisms.

These results led to the third part which consisted in testing two prototypes of evacuation solutions, to optimize the combustion (carbon monoxide and Volatile Organic Compounds emissions reduction and efficiency increase) and the growth of particles before evacuation. The prototypes give very convincing results. Indeed, the efficiency of the installation is improved by more than 15 points by recovering the energy from the smoke by exchange with the connecting duct, and the pollutant emissions are drastically reduced. Moreover, the highest particle growth mechanisms is observed with these prototypes.

This project confirms the influence of duct type and size in the reduction of pollutant emissions (particles, COVT), linked to the optimization of combustion. It also shows the participation of the duct in the reduction of emissions at evacuation by action on particles typology (nature and granulometry) and by favouring deposit mechanisms.

The results of this project could find other applications in the case of industrial filtration systems: the "pre-conditioning" of the particles to be filtered could allow them to reach the cut-off sizes necessary for their capture. by cyclones, or other processes.

1. Introduction

1.1. Contexte

Le secteur du chauffage domestique au bois est la première énergie renouvelable en France. Bien que la consommation réelle de bois pour le chauffage du résidentiel baisse globalement depuis 1992, avec une exception en 2012, le nombre de ménages utilisateurs est passé de 5,6 millions en 2001 et 2006 à 6,8 millions en 2017. Malgré une amélioration considérable au cours des dernières années des performances énergétiques et environnementales des installations, et en particulier des appareils, le chauffage domestique au bois reste une problématique pour la qualité de l'air. En effet, le chauffage domestique au bois est la principale source d'émission de particules fines en France et contribuait à hauteur de 41 % des émissions nationales de particules fines en 2020.

De nombreuses études ont été réalisées pour améliorer les appareils et réduire de façon importante les émissions de polluants. Parmi les paramètres les plus étudiés, la conception des appareils a montré qu'elle représentait un levier important de réduction des émissions de polluants, tout comme la qualité du combustible ou l'impact des pratiques de l'utilisateur. En revanche, très peu d'études se sont concentrées sur la partie de l'installation constituée par les conduits d'évacuation des fumées. Pourtant, cette zone de refroidissement avec un temps de séjour assez élevé joue un rôle prépondérant dans le réarrangement des molécules et des particules, et peut ainsi conduire à des modifications physiques et chimiques importantes.

Une meilleure connaissance de ces modifications dans des conditions diverses semble ainsi indispensable pour poursuivre la réduction des émissions, que ce soit par une optimisation même des conduits ou en développant des systèmes de dépollution adaptés et installés aux endroits les plus propices. Ainsi, ce projet traitera dans un premier temps de connaissances nouvelles pour aboutir ensuite à une nouvelle phase relative à de la recherche industrielle de conception de nouveaux conduits ou d'optimisation de systèmes existants.

Ce projet, lauréat de l'appel à projets CORTEA 2019 de l'ADEME, s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux réalisés par différents acteurs, dont les trois partenaires du projet, le LERMAB, le CERIC et Seguin Duteriez. Le LERMAB et le CERIC ont été partenaires du projet PEREN²Bois [1] coordonné par l'INERIS et qui avait pour objectif principal d'étudier l'impact de différentes techniques primaires ou secondaires de réduction des émissions de Composés Organiques Volatils (COV) et de particules. Ce projet comportait également une tâche relative au protocole de mesures des particules et des COV. Cet état des lieux a permis de mieux cibler les travaux à réaliser par la suite. Les trois partenaires du projet ont continué leur collaboration pendant le projet QUALICOMB [2] destiné principalement à déterminer l'impact de la qualité du combustible (humidité, essence, écorce, taille, etc.) sur les émissions polluantes. Les résultats ont clairement mis en évidence l'intérêt d'un combustible calibré, propre (sans écorce) et sec pour réduire les émissions polluantes.

Parallèlement, le LERMAB a également été partenaire du projet européen EN-PME-TEST [3] qui visait principalement à étudier des protocoles de mesures au niveau européen, afin de proposer une solution partagée et normalisable de mesures des émissions de particules prenant en compte les précurseurs de type composés organiques gazeux. Au cours de ce travail, les nombreux tests et protocoles évalués ont mis en évidence un réel besoin de méthodologie pour effectuer des mesures fiables et répétables. L'ADEME a également cofinancé avec le LERMAB la thèse de doctorat de Benoit BRANDELET [4] qui avait pour objectif d'étudier les mécanismes de formation et de réduction des particules le long du cheminement des fumées depuis l'appareil jusqu'à l'atmosphère. Ce travail s'est attaché à déterminer les caractéristiques physiques (granulométrie, forme, ...) et chimiques (Organic Carbon / Elemental Carbon OC/EC, composition chimique, ...) des particules ainsi que l'impact du conduit d'évacuation des fumées sur ces propriétés. Différentes techniques innovantes (microscopie *MEB-FEG*, mise au point d'une méthode de mesure de la composition OC/EC pour des émissions, etc.) ont été développées pendant ce travail et ont permis de mieux comprendre les mécanismes en jeu. Ces résultats montrent que le conduit peut avoir son rôle à jouer en tant que système de collecte ou de « préparation » des particules pour le piégeage ou la filtration, via leur évolution physico-chimique durant leur parcours.

1.2. Présentation du projet

Le présent projet s'appuie sur ces résultats, mais également sur ceux de travaux réalisés par différents laboratoires pour améliorer les connaissances et étudier l'impact du conduit de cheminée, de son type et de sa hauteur sur les émissions. Un travail de bibliographie, résumé au chapitre 2 et présenté en totalité dans le rapport d'annexe (annexe 1), a d'abord été réalisé, permettant de d'alimenter le protocole du projet et de définir les phénomènes à étudier. Ensuite, des essais ont été réalisés selon un protocole d'essai de type Bereal [5], afin d'effectuer des mesures de combustion dans des conditions d'essais réalistes, prenant en compte des situations d'utilisation variées (allumage, charges nominales, charges réduites). Les conditions de mise en œuvre des conduits (tirage naturel, différentes hauteurs, plusieurs types de raccords) se rapprochent également des pratiques usuelles d'installation.

Dans un premier temps, le présent projet permet d'estimer l'impact de chaque type de conduit sur les émissions, notamment pour les particules et leurs précurseurs (COV principalement) en tentant d'en définir les paramètres influents. Les résultats obtenus fournissent des résultats d'émissions réalistes, pour deux grands types d'appareils (générations 2006 & 2018) et pour différentes allures de fonctionnement, des conduits de cheminée auxquels ils sont raccordés

Dans un second temps, compte tenu des performances d'émissions relevées pour chaque solution de fumisterie, le projet vise à optimiser le piégeage des particules au sein même du conduit de cheminée. Plusieurs prototypes sont testés, favorisant à la fois les mécanismes de réduction d'émissions à la source ainsi que l'évolution et la collecte de ces particules par le conduit. L'objectif est ainsi d'utiliser les données obtenues pour nourrir une réflexion globale conduisant à un développement de futurs produits. Ces produits devront permettre soit de réduire directement les émissions de particules, soit de pré-conditionner les fumées (et donc les particules) pour faciliter leur traitement par des solutions de piégeages qui existent sur le marché.

Les principaux objectifs du projet sont les suivants :

- Caractériser les émissions (COV, particules, CO, NOx, ...) pour différents types de conduits représentatifs du marché raccordés sur deux appareils types représentant une part importante du marché ou de l'existant : un appareil génération 2006 et un appareil 2018 labellisé Flamme Verte 7*;
- Comprendre l'impact du type de conduit et de ses conditions de fonctionnement sur la qualité de combustion et donc sur les émissions et sur le rendement de l'installation. Nous étudierons parallèlement l'évolution des caractéristiques des particules le long de leur cheminement ;
- Concevoir puis tester deux prototypes de conduits qui favorisent ou défavorisent la croissance des particules pour mieux les conditionner à des systèmes de piégeages et ainsi réduire leurs émissions à l'atmosphère.

Pour répondre à ces objectifs, les principaux verrous à lever concernent l'analyse de l'impact du conduit de cheminée sur la qualité de combustion et la compréhension des mécanismes réactionnels qui coexistent au sein même d'un conduit de cheminée.

Les principales tâches du projet sont schématisées dans la Figure 1 :

- Tâche 1 : Coordination du projet.
- Tâche 2 : Etude bibliographique.
 - o Réaliser un état de l'art sur les mécanismes réactionnels des particules et ainsi pouvoir mieux appréhender les résultats des essais ;
- Tâche 3 : Etudier l'impact des conduits sur la combustion en conditions réelles de fonctionnement.
 - o Caractériser l'impact du type et de la hauteur du conduit de cheminée sur les émissions polluantes : il s'agira principalement de déterminer les paramètres clés qui jouent un rôle, puis de les quantifier ;
 - o Déterminer l'impact du niveau de température sur les réarrangements et les réactions entre les particules et les précurseurs (COV) ;
 - o Evaluer l'impact du tirage (pression) et de la vitesse sur ces mêmes réactions ;

- Tâche 4 : Etudier l'impact du type de conduit sur l'évolution des caractéristiques des particules (sur banc d'essai).
 - o Déterminer les modifications physiques, géométriques et chimiques des particules en fonction de leur transformation au sein même du conduit de cheminée pour différentes conditions opératoires ;
 - o Déterminer les mécanismes majoritaires qui existent et les conditions qui y conduisent afin de les favoriser ou les éviter ;
 - o Evaluer l'impact de la nature même des émissions à l'entrée dans le conduit sur l'évolution des particules et sur la nature des émissions à la sortie.
- Tâche 5 : Prototypes et tests en conditions réelles.
 - o À la suite des constats déterminés grâce aux tâches précédentes, des prototypes de conduits seront testés de manière à mesurer les améliorations apportées sur la qualité de combustion et les émissions.
- Tâche 6 : Valorisation des résultats.

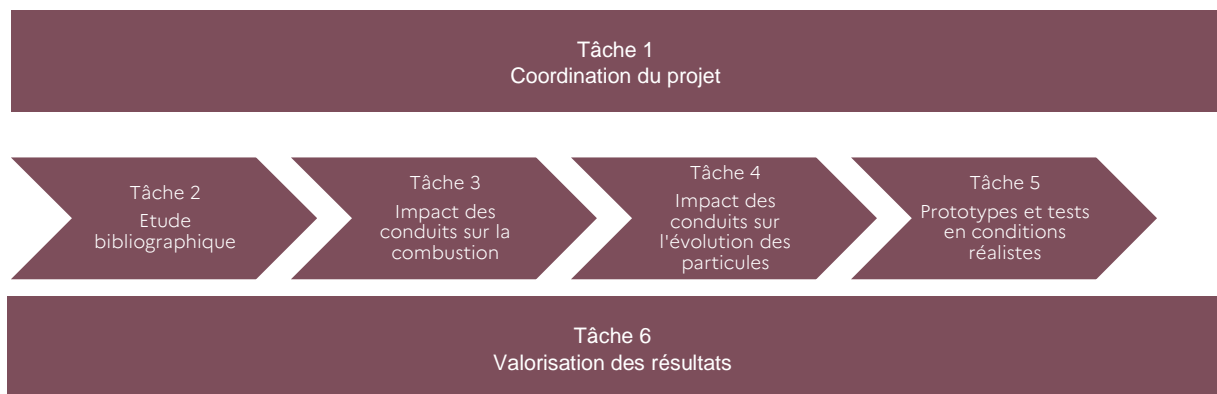


Figure 1: Tâches du projet BOICLEAN.

Les résultats obtenus permettront de déterminer les mécanismes liés au conduit (nature, tirage) qui favorisent la réduction des émissions à la source mais aussi ceux qui permettent de modifier ou de faire évoluer les particules dans le conduit. Ces connaissances sont primordiales pour pouvoir développer des solutions pertinentes et efficaces.

Ce projet se veut également innovant sur plusieurs points qui permettront d'acquérir des données nouvelles et utiles pour l'ensemble des acteurs de la filière, mais aussi une application plus directe auprès des utilisateurs de chauffage domestique au bois.

Voici quelques exemples du caractère innovant de ce projet :

- La principale innovation concerne la prise en compte globale de l'installation, y compris le conduit de cheminée et pas uniquement l'appareil, ce qui fournira des données plus facilement utilisables pour évaluer l'impact sur la qualité de l'air, mais aussi pour développer des solutions complètes efficaces ;
- Le projet s'appuie à la fois sur des données issues d'une démarche scientifique rigoureuse pour comprendre et analyser les mécanismes et sur des résultats de mesures proches de conditions réelles d'exploitation afin de proposer des résultats précis et utilisables pour tous.

2. Résumé de l'Etat de l'art

La concentration en particules fines dans l'air ambiant est une problématique sanitaire mondiale. Ressource locale et durablement gérée, le bois énergie est en France la première exploitation d'énergie renouvelable et les bénéfices du recours à cette ressource ne sont pas remis en cause. Cependant, certaines pratiques de combustion du bois peuvent être à l'origine d'émissions polluantes importantes, dont les particules fines dont la combustion bois est la principale contributrice au niveau du pays. Pour améliorer la situation, en 2021, le plan d'action de réduction des émissions issues du chauffage au bois en France a été élaboré par le ministère de la transition écologique. Il se place dans l'objectif de baisse des émissions nationales de PM_{2,5} de 50 % en 2030 par rapport à 2020, en favorisant un chauffage domestique au bois performant. Plusieurs leviers sont pris en compte : équipements, combustibles, bonnes pratiques d'utilisation en d'entretien. La réduction des émissions de particules en France (déjà engagée depuis plus de vingt ans) est donc aujourd'hui une volonté qui s'inscrit dans un contexte à la fois écologique, sanitaire et d'indépendance énergétique.

Les émissions de polluants atmosphériques liées au chauffage domestique au bois sont variables et conditionnées à la qualité de combustion, elle-même conditionnée par la conception des équipements, la mise en œuvre de l'installation de chauffage, la qualité du combustible et les pratiques des utilisateurs. Compte tenu de cette diversité de leviers, il est techniquement réaliste de pouvoir améliorer les émissions globales du parc en agissant sur ces différents paramètres. Les performances des appareils de chauffage s'améliorent depuis plusieurs années et des efforts récents sur l'amélioration de la qualité des combustibles ont été mis en œuvre. Les solutions de fumisterie sont variées et adaptées aux appareils qu'elles équipent, mais leurs impacts sur les performances des installations ont peu été évalués, alors qu'elles conditionnent l'alimentation en air des appareils, la bonne évacuation de la fumée et sa température. Afin de mieux appréhender l'ensemble de ce contexte, une bibliographie est disponible dans le rapport d'annexe en Annexe 1. Il fait un point sur les enjeux actuels, en partant de l'évolution de la part des énergies renouvelables (ENR) en allant jusqu'aux différents systèmes de piégeage des fumées disponibles.

Eléments à retenir :

- Le chauffage domestique au bois est une source d'émissions de particules ;
- Un combustible de qualité réduit de manière considérable les émissions particulaires ;
- Un appareil récent induit des émissions largement inférieures à celles d'un appareil plus ancien ;
- La composition chimique des particules est impactée par les réglages, l'allure et le type d'appareil ;
- Les conduits de fumée ont accompagné les évolutions technologiques des appareils qu'ils équipent (étanchéité, gestion de l'alimentation en air) et sont aujourd'hui adaptés à chaque typologie appareil/combustible/logement.
- Les conduits de fumée permettent aussi d'optimiser les performances des appareils en favorisant le tirage ou en le limitant si besoin (conduits isolés et/ou régulateurs de tirage)
- Lors de la combustion de biomasse, les particules formées évoluent suivant différents mécanismes distincts, mais l'évolution des caractéristiques des particules dans le conduit d'évacuation des fumées reste très peu étudiée.
- Chaque technologie de filtration induit une plage granulométrique particulière précise pour une captation optimale.
- La compréhension de l'évolution des particules dans le conduit permettrait d'ouvrir de nouvelles pistes pour l'optimisation de leur captation.

3. Etude de l'impact des conduits sur la combustion

Ce chapitre étudie l'influence de différents types de géométries de conduits de fumée sur les émissions de polluants et sur le rendement de deux appareils qui ont été choisis pour être représentatifs du parc (ancienne génération d'insert et poêle à buche récent de plus petite puissance).

L'objectif consiste à acquérir de nouveaux résultats de performances de ces appareils, d'émissions particulaires et gazeuses, avec des conditions d'essais réalistes (en tirage naturel avec des protocoles d'utilisation des appareils plus proches des pratiques des utilisateurs). Ces résultats serviront de base pour la réflexion de développement de nouveaux systèmes. Des mesures dans différentes conditions, selon un protocole inspiré de BeReal comprenant différentes allures de combustion seront réalisées, ainsi que des mesures permettant de déterminer l'évolution des caractéristiques des particules le long du conduit.

Ce chapitre présente la méthodologie employée pour réaliser les essais, puis l'ensemble des résultats. Ensuite, une comparaison dite de « proche en proche » est réalisée afin de d'examiner les impacts des différents paramètres (hauteur de conduit, type de fumisterie, présence de régulateur de tirage...) sur les performances énergétiques et environnementales des installations¹ dans leur ensemble (appareil + fumisterie). Pour terminer, une partie explore les différentes corrélations possibles entre l'évolution des caractéristiques physiques de la fumée (température, débit..) et les résultats d'émissions, permettant ainsi de visualiser des lois d'émissions, d'évolutions, etc.

3.1. Méthodologie

3.1.1. Les expériences

Pour chacun des appareils considérés (poêle de 2018 ou insert de 2006), différentes solutions de conduits représentatives de montages fréquemment réalisés par les installateurs sont étudiées. Les types de conduits retenus sont adaptés au poêle ou insert qu'ils équipent. C'est pourquoi par exemple, les conduits de raccordement pour le poêle sont émaillés (puisque visibles) alors que les conduits simples paroi pour l'insert sont en finition inox (et de diamètre différent). De la même manière, les conduits isolés sont aussi spécifiquement adaptés à l'appareil qu'ils équipent avec pour objectif de refléter les pratiques des installateurs. Les différentes configurations sont présentées dans la Figure 2.

Les expériences 5, 7 et 13 ont été annulées : en effet, ces configurations étaient prévues avec 4 m de conduits associés à un régulateur de tirage. Les essais sans régulateur ayant montré un tirage proche de 12 Pa, la mise en œuvre du régulateur pour ces configurations n'aurait pas permis son ouverture. En revanche, certains essais ont été réalisés avec une répétition supplémentaire afin de s'assurer des résultats lorsque les mesures ne semblaient pas très reproductibles.

¹ Dans l'ensemble du rapport le terme « installation » correspond à l'ensemble « appareil + conduit »

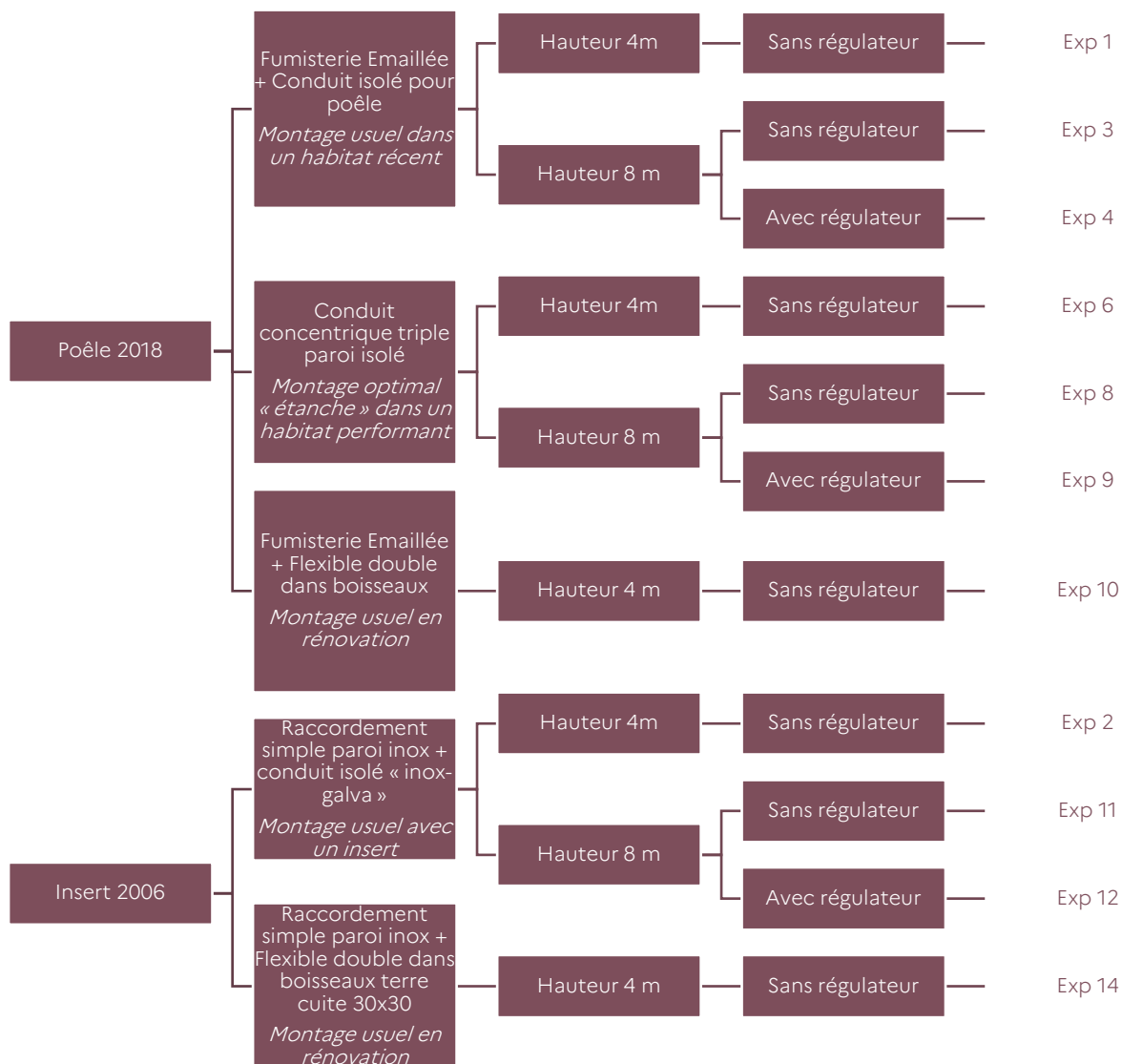


Figure 2 - Détail des expériences réalisées

3.1.2. Les échantillons testés

3.1.2.1. L'insert à bûches (2006)

Le Tableau 1 présente les caractéristiques de l'insert utilisé pour cette étude et la Figure 3 présente les dimensions de l'appareil.

Tableau 1 : Caractéristiques de l'insert 2006 (données fabricant).

Caractéristique	Performance déclarée
Puissance nominale :	9,5 kW
Puissance maximale :	19 kW (indicatif)
Taux de CO :	0,11 %
Emission de particules:	31 mg/Nm ³
Rendement :	75,30 %
Flamme verte :	7* (Donnée à titre indicatif, seul le site Flamme Verte fait foi.)
IPEE :	0,6

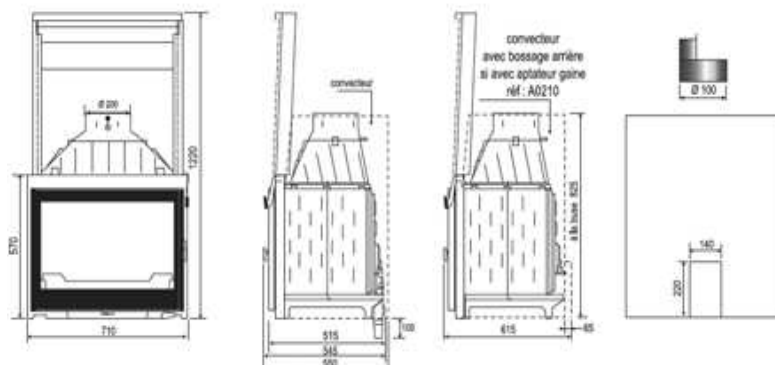


Figure 3 : Dimensions de l'insert 2006 (données fabricant).

3.1.2.2. Le poêle à bûches (2018)

Le Tableau 2 présente les caractéristiques du poêle testé pour cette étude et la Figure 4 présente les dimensions de l'appareil.

Tableau 2 : Caractéristiques du poêle 2018 (données fabricant).

Caractéristique	Performance déclarée
Puissance nominale :	7 kW
Taux de CO :	0,07 % (13%O ₂)
Emission de particules :	25 mg/Nm ³ (13%O ₂)
Rendement :	80 %
Flamme verte :	7* (Donnée à titre indicatif, seul le site Flamme Verte fait foi.)
IPEE :	≤ 1

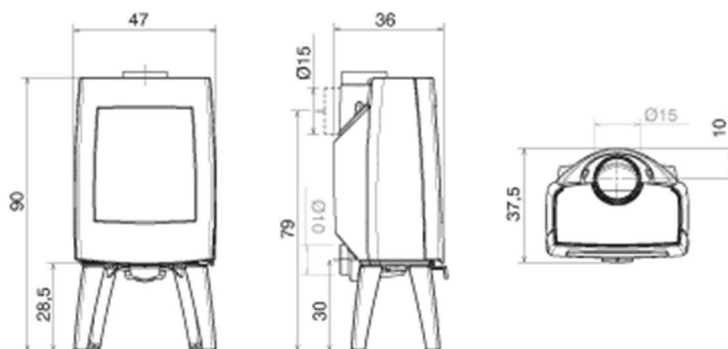


Figure 4 : Dimensions du poêle 2018 (données fabricant).

Tableau 3 : Résultats d'étanchéité du poêle 2018.

Exigence	Valeur mesurée / calculée	Critère d'étanchéité	Conformité	
NF EN 16510-1	Fuite sous 10 Pa [Nm ³ /h]	2,1	≤ 3	Conforme
	Fuite sous 10 Pa pondérée CO [ppm*Nm ³ /h]	1 440	≤ 2 400	

L'étanchéité du poêle 2018 a été réalisée préalablement aux essais le 29/01/2021. Cet essai était un prérequis pour pouvoir réaliser le montage de cet appareil avec le conduit concentrique triple paroi isolé. Le Tableau 3 présente les résultats obtenus.

Cet appareil permettra de tester les solutions concentriques puisqu'il respecte les critères d'étanchéité nécessaires.

3.1.2.3. Les combustibles

Les bûches utilisées sont des bûches feuillues (80% chêne, 20% hêtre) de longueur 25 et 40 cm (selon l'appareil) de classe H1/G1. Leur PCIh est de 14 824 kJ/kg et leur humidité de 14 % sur brut.

3.1.2.4. Les conduits

Selon les expériences réalisées, différents types de conduits sont associés aux appareils. Le choix des typologies des conduits est déterminé à la fois par la nature de l'appareil (un insert est destiné à être placé dans une hotte avec un conduit de raccordement spécifique alors qu'un poêle est installé avec un conduit de raccordement émaillé esthétique), par des contraintes techniques et réglementaires (seul un appareil étanche peut être utilisé avec un conduit concentrique) et par souci de représentativité des différentes pratiques du terrain (conduit tout métallique ou tubage de boisseaux).



Poêle 2018 + Fumisterie Emaillée + Conduit isolé pour poêle



Poêle 2018 + Conduit concentrique triple paroi isolé



Insert 2006 + Raccordement simple paroi inox + conduit isolé « inox-galva »



Poêle 2018 + Fumisterie Emaillée + Flexible double dans boisseaux terre cuite 30x30



Insert 2006 + Raccordement simple paroi inox + Flexible double dans boisseaux terre cuite 30x30

Figure 5 : Photos des montages réalisés (source CERIC).

La



Poêle 2018 + Fumisterie Emaillée +
Conduit isolé pour poêle



Poêle 2018 + Conduit concentrique
triple paroi isolé



Insert 2006 + Raccordement simple
paroi inox + conduit isolé « inox-
galva »



Poêle 2018 + Fumisterie Emaillée +
Flexible double dans boisieux terre
cuite 30x30



Insert 2006 + Raccordement simple
paroi inox + Flexible double dans
boisieux terre cuite 30x30

Figure 5 présente des photographies de différents montages .

Les conduits utilisés pour chacune des expériences sont adaptés aux appareils qu'ils équipent et reflètent des situations d'installations variées (rénovation, habitat récent, montage performant...). Dans le volume habitable, les solutions employées pour le conduit de raccordement, illustrées par la Figure 6, sont donc les suivantes :

- Conduit émaillé pour le poêle
- Tubage inox pour l'insert

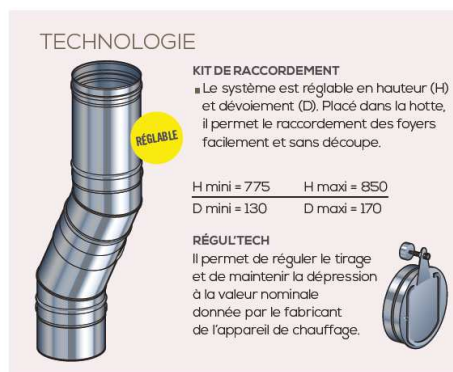


Figure 6 - Conduits de raccordement (volume habitable) - source POUJOLAT

Pour l'évacuation de la fumée (sous-toiture et extérieur), les solutions employées pour le conduit de fumée, illustrées par la Figure 7, sont les suivantes :

- Conduit isolé pour poêle
- Conduit isolé pour insert
- Flexible inox dans boisseau

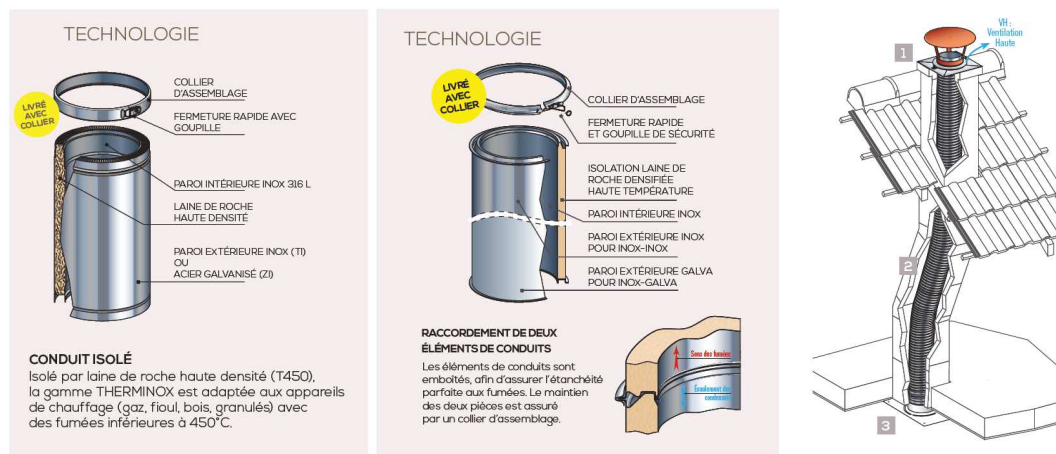


Figure 7 - Conduits de fumé (sous-toiture et extérieur) - source POUJOLAT

Enfin pour le poêle 2018 de conception « étanche », un conduit concentrique triple paroi isolé, permettant l'alimentation en air comburant et l'évacuation des produits de combustion est utilisé (Figure 8). Ce « conduit-système » toute hauteur non traditionnel, bénéficie d'un Avis Technique.

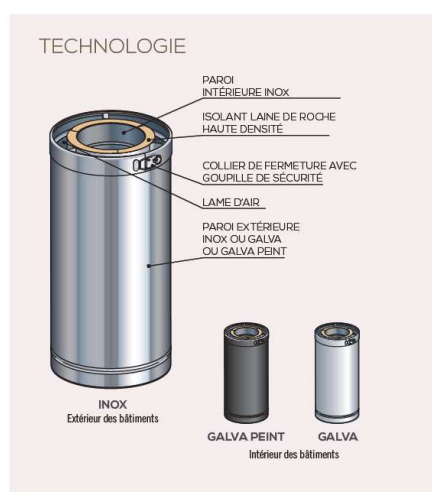


Figure 8 - Conduit concentrique triple paroi isolé - source POUJOLAT

3.1.2.5. Les régulateurs de tirage

Le régulateur de tirage permet de maintenir le tirage de la cheminée à la valeur idéale pour le bon fonctionnement de l'appareil. Son fonctionnement est basé sur l'introduction automatique d'une quantité d'air plus ou moins grande dans le conduit de fumée.

Un régulateur de tirage est préconisé dès lors que le conduit de fumée présente une grande hauteur et que le tirage dépasse la consigne préconisée par le fabricant de l'appareil de chauffage au bois. La Figure 9 présente son fonctionnement sur un conduit simple paroi et sur un conduit concentrique triple paroi.



Figure 9 : Régulateur sur conduit simple paroi et sur conduit concentrique triple paroi (source Poujolat).

Les développements récents ont permis la mise sur le marché de différents modèles de régulateur pour tous les types d'appareils de chauffage au bois (insert, poêles), étanches ou non, quel que soit le diamètre de raccordement.

Des essais réalisés dans un projet antérieur sur un poêle à bûches de 5 kW [6] ont confirmé que l'utilisation d'un régulateur de tirage permettait de :

- Réduire le tirage moyen à la buse du foyer ;
- Stabiliser le tirage tout au long de la combustion ;
- Limiter les effets de sur-tirage liés au vent ;
- Éviter une trop forte élévation de la température de fumée provoquée par un tirage trop important ;
- Augmenter la durée de combustion et les performances de l'installation.

La Figure 10 présente une courbe d'évolution du tirage sans puis avec régulateur.

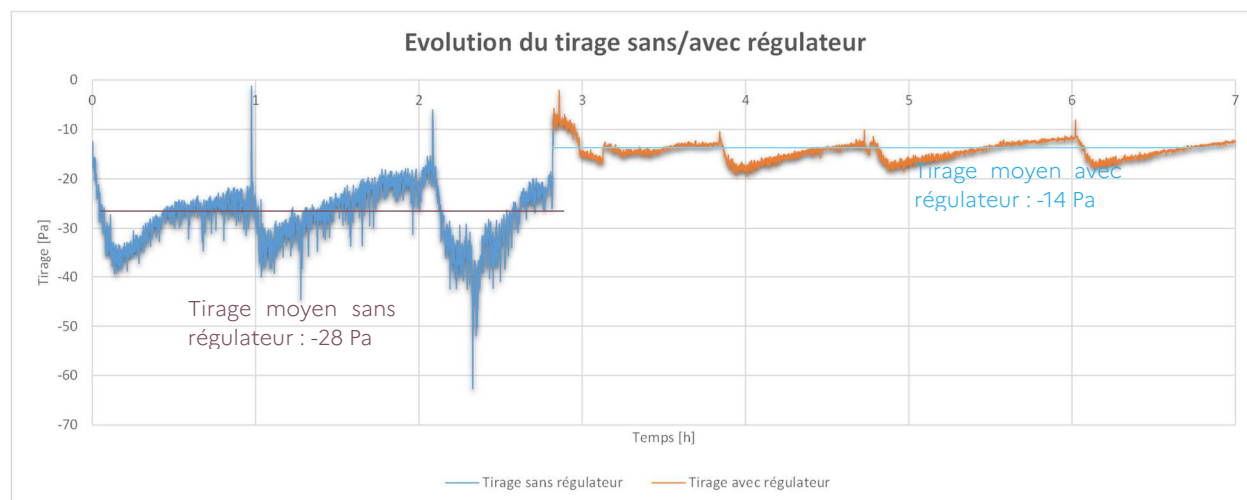


Figure 10 : Exemple du tirage obtenu avec un poêle à bûches de 5 kW sans (bleu) et avec (orange) régulateur de tirage.

Le régulateur de tirage permet d'optimiser les performances de l'installation de chauffage grâce à une meilleure maîtrise de la combustion. De manière à garantir un confort d'utilisation et la sécurité de l'utilisateur, le régulateur reste mécaniquement fermé pour les tirages inférieurs à sa valeur de réglage.

3.1.3. Le protocole d'essais

Pour chaque expérience, deux cycles types (minimum) sont réalisés d'après le plan inspiré du protocole Be real et décrit dans la Figure 11. Des mesures sont réalisées dès l'allumage et pour différentes allures de fonctionnement (charges nominales et charges volontairement réduites). Les rechargements en bois sont effectués dès la disparition des flammes. Des mesures en continu ou ponctuelles sont réalisées pendant les allumages, les charges nominales et les charges partielles. Les prélèvements de TSP sont par exemple réalisés trois minutes après le rechargement en combustible et jusqu'à la fin de la combustion de la charge de bois.

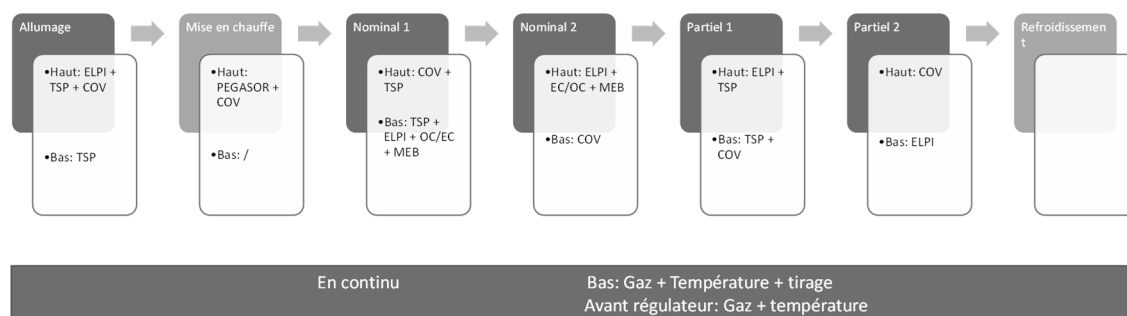


Figure 11 : Cycle de combustion "type".

Les combustions sont réalisées en tirage naturel, le type de raccordement a donc une influence sur le tirage de l'installation et donc sur les durées de combustion de chaque essai.

Les points de mesure sont répartis sur la colonne de manière à pouvoir effectuer des observations dans les fumées au niveau du plafond de la pièce où est installé l'appareil et au niveau de l'évacuation (après 4 m de conduits ou 8 m selon l'expérience). La Figure 12 présente un schéma décrivant les emplacements des points de prélèvements, puis une photographie du point bas et une du point haut.

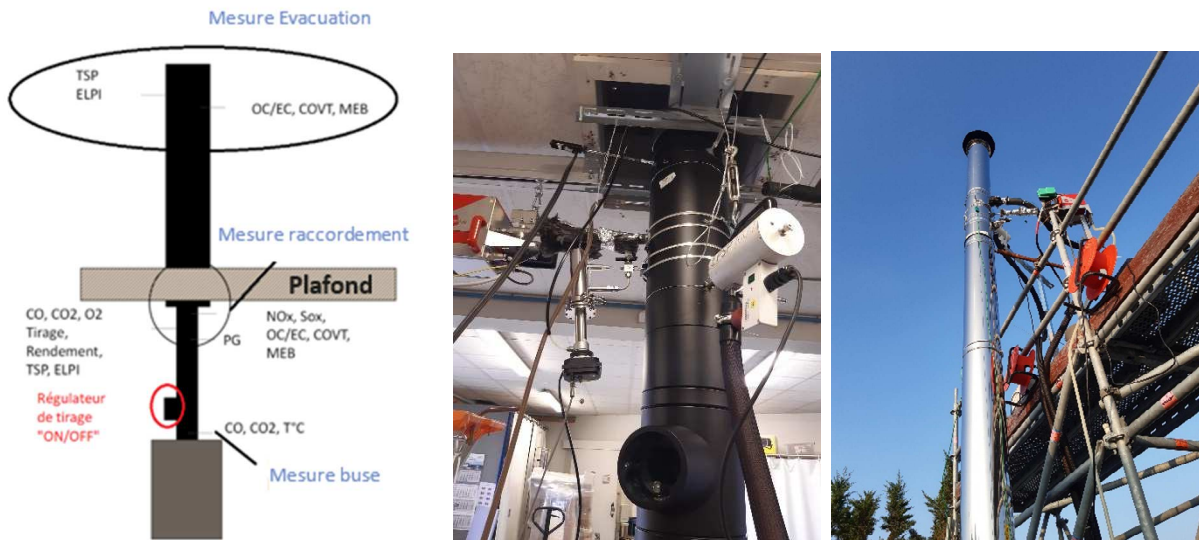


Figure 12 : Points de mesure (raccordement et évacuation – source CERIC).

3.1.4. Les mesures effectuées

3.1.4.1. Le tirage

Le tirage est mesuré en prenant le delta de pression entre le conduit de fumée et l’ambient ou entre le conduit de fumée et l’alimentation en air comburant (cas du conduit concentrique).

3.1.4.2. Les températures

Les températures sont relevées à l’aide de thermocouples de type K d’EMT 5°C pour les fumées et 1°C pour l’air.

3.1.4.3. Emissions de CO, CO₂, O₂

Les analyses de gaz sont réalisées de façon redondante par deux appareils :

- Un analyseur SIEMENS ULTRAMAT 23 ;
- Un TESTO 350 XL.

3.1.5. Le rendement

Pour chacune des configurations testées, le rendement de l’appareil est calculé à la sortie de la pièce (point de mesure au niveau plafond) d’après la formule (Équation 1) de la norme NF EN 16510-1 « Appareils de chauffage domestique à combustion solide - Partie 1 : exigences générales et méthodes d’essai » [6] :

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r)$$

avec :

- *q_a* Pourcentage des pertes par chaleur sensible dans les fumées *Q_a*, rapportées au pouvoir calorifique du combustible d’essai (combustible brut)
- *q_b* Pourcentage des pertes par chaleur latente dans les fumées *Q_b*, rapportées au pouvoir calorifique du combustible d’essai (combustible brut)
- *q_r* Pourcentage des pertes de chaleur par imbrûlés solides passant à travers la grille *Q_r*, rapportées au pouvoir calorifique du combustible d’essai (combustible brut)

Équation 1 : Calcul du rendement de l’appareil selon la norme NF EN 16510-1 [6].

La température de fumées retenue pour les calculs de rendement de l'installation correspond à la température au niveau du plafond de la pièce. Celle retenue pour le rendement du poêle seul est située au niveau de la buse de l'appareil. Enfin, la température utilisée pour l'air comburant correspond à la température ambiante au niveau de l'appareil ou à celle de l'air entrant dans la buse du poêle (cas du conduit concentrique qui canalise l'air comburant). En plus des conduits utilisés, ces conditions particulières de mesures sont différentes de celles utilisées dans la norme NF EN 16510-1 [7] pour déterminer les performances des appareils. Ceci s'explique par le fait que l'objectif de l'étude est notamment d'évaluer le couple « appareil + conduit » alors que la norme évalue seulement les performances des appareils indépendamment du conduit qui peut lui être associé. Par exemple, pour une buse de 150 mm de diamètre, la température de fumée retenue dans la norme pour le calcul du rendement doit être située à une hauteur de 1,43 m au-dessus du poêle (dont 0,33 m non-isolés). La Figure 13 schématise notre démarche.

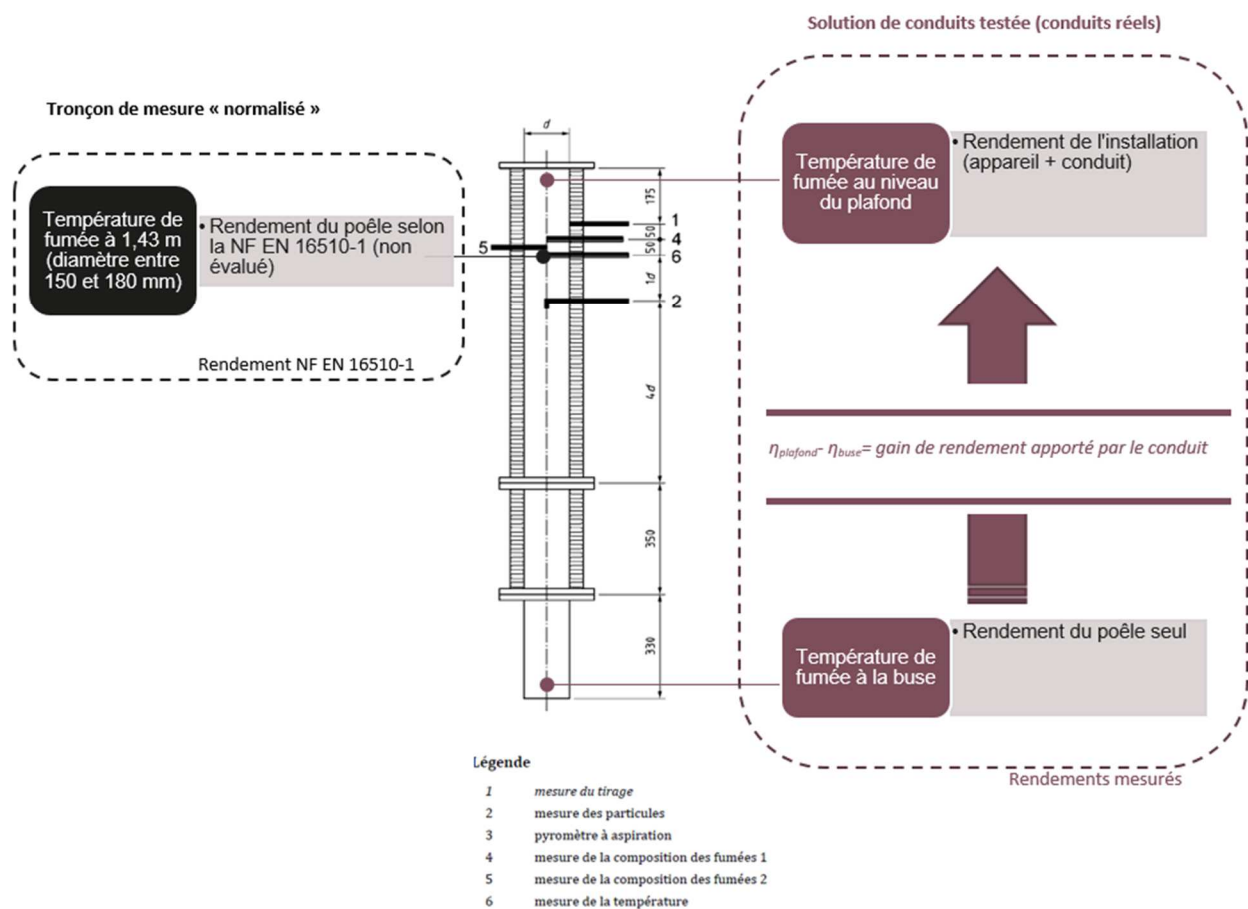


Figure 13 : Schéma de la norme NF EN 16510-1 et comparaison avec les rendements du poêle et de l'installation

3.1.6. Les TSP (Total Suspended Particles)

Les mesures de particules sont réalisées selon la norme NF EN 16510-1 par prélèvement à un débit compris entre 8,3 et 10 l/min sur filtre chauffé à 160°C, avec une buse de 10 mm. Ces mesures sont accompagnées de mesures de combustion (notamment d'O₂ ou de CO₂) de manière à exploiter les résultats en corrigeant les valeurs.

Les filtres sont préconditionnés à 180°C avant d'être placés dans un dessiccateur pendant 4h puis pesés à 0,1 mg près. Les prélèvements sont réalisés deux minutes après le chargement du bois et jusqu'à la fin de la combustion de la charge (disparition des flammes).

La Figure 14 présente schématiquement une ligne de prélèvement TSP, le filtre étant disposé au sein du préleveur et la ligne étant chauffée à 180°C de la buse jusqu'à la sortie du préleveur.

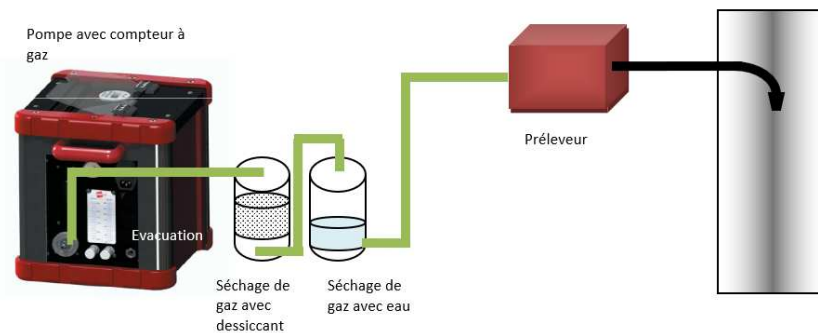


Figure 14 : Mesures de TSP.

Les résultats d'essais concernent, pour chaque prélèvement :

- Le volume de gaz prélevé (STP, 273,15K, 1013 hPa) en Nm³ d'après la formule suivante :

$$FGV = (FGV_a - FGV_b) * \frac{273,15}{273,15 + T_g} * \frac{P}{1013} * C_f$$

Avec :

FGV_a : Valeur indiquée par le compteur à gaz après prélèvement en m³

FGV_b : Valeur indiquée par le compteur à gaz avant prélèvement en m³

FGV : Volume de gaz prélevé à STP en Nm³

P : Pression barométrique ambiante moyenne en hPa

C_f : l'éventuel facteur d'étalonnage du compteur

Équation 2 : Calcul du volume de prélèvement pour les TSP.

- La concentration en PM en mg/Nm³ d'après la formule suivante :

$$PM_{concentration} = \frac{FW_a - FW_b}{FGV}$$

Avec :

FW_a : Masse du filtre après prélèvement en mg

FW_b : Masse du filtre avant prélèvement en mg

PM_{concentration} : Concentration en particules solides en mg/Nm³

Équation 3 : Calcul de la concentration en matière particulaire (PM).

- La concentration en particules solides à 13% d'O₂ :

$$PM_{HF} = PM_{concentration} \frac{21 - O_{2,normalisé}}{21 - O_{2,moyen}}$$

Avec :

PM_{HF} : Concentration en particules solides à 13 % de teneur en O₂ en mg/Nm³

O_{2,normalisé} : Teneur en oxygène normalisée qui est prise égale à 13 %

O_{2,moyen} : Teneur moyenne en oxygène mesurée dans les fumées sèches

Équation 4 : Calcul de la concentration en particules solides.

3.1.6.1. Répartition granulométrique en nombre ELPI

L'appareil ELPI™ (impacteur électrique basse pression) permet la mesure de la distribution granulométrique et de la concentration de particules en temps réel dans la plage de taille de 7 nm à 10 µm. Dans le cadre des essais BOICLEAN, l'appareil ELPI est utilisé pour déterminer la répartition proportionnelle granulométrique des particules. Notons que les résultats sont ici exprimés en nombre de particules et pas en masse.

Le principe de mesure de cet équipement est le suivant : avant l'entrée dans l'appareil de mesure, les particules sont chargées électriquement par effet Corona, puis les gaz prélevés sont injectés vers la zone

de mesure qui est constituée de 13 plateaux d'impaction permettant de séparer les particules selon leur granulométrie. Lors de l'impaction sur les plateaux successifs des particules, celles-ci se déchargent et envoient ainsi un signal permettant de les compter. Les particules de grande inertie impactent les premiers plateaux alors que les plus petites impactent les plateaux suivants (selon leur inertie). La Figure 15 présente un schéma de principe de fonctionnement d'un ELPI.

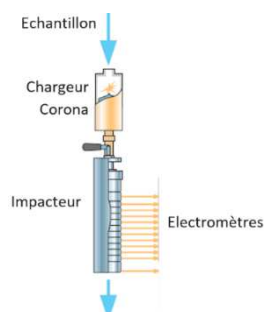


Figure 15 : Fonctionnement du ELPI.

3.1.6.2. Composés Organiques Volatils :

Les émissions en COV sont mesurées en continu via un analyseur GRAPHITE 52M de chez Environnement SA. Equipé de deux fours FID (DéTECTEUR à Ionisation de Flamme), cet analyseur permet de mesurer en continu les émissions de Composés Organiques Volatils Totaux (COVT) et les émissions de méthane (CH₄). Ainsi, par différence, les émissions de COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques) sont déduites.

Un pistolet de prélèvement équipé d'un piège à particules est fixé dans le conduit de fumées. Les fumées transitent ensuite via une ligne chauffée régulée à 180 °C jusqu'à l'analyseur. La Figure 16 présente un schéma de l'installation.

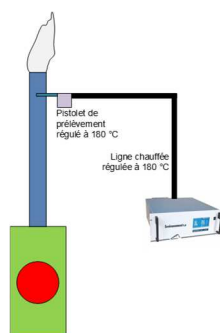


Figure 16 : Schéma de principe d'utilisation du Graphite 52M.

3.1.6.3. Composition en Carbone Organique / Carbone Élémentaire des particules :

Les teneurs en Carbone Organique (OC) et en Carbone Élémentaire (EC) sont mesurées via un prélèvement sur filtre quartz à 160°C puis à l'analyse via un appareil thermo-optique de chez Sunset Laboratory. Les protocoles de prélèvements et d'analyses suivis sont ceux décrits par Brandelet et al. en 2017 [7]. La Figure 17 suivante présente l'analyseur.



Figure 17 : Analyseur OC/EC Sunset Laboratory.

3.2. Bilan / Principaux résultats obtenus

Compte tenu de la grande quantité de résultats, les essais réalisés sont d'abord présentés de manière exhaustive, par catégorie de grandeurs physique (combustion (3.2.1), émissions de particules (3.2.2). Les analyses des interactions sont détaillées dans la troisième partie de ce chapitre (3.2.3).

Tous les résultats présentés sont des moyennes d'un minimum de deux répétitions d'un cycle complet. Une première analyse des résultats nous a permis de relever des points étonnants sur certaines mesures, et ainsi triplés certains essais. Ainsi, les valeurs présentées sont robustes et basées sur plus de 140 mesures.

3.2.1. Résultats généraux de combustion (dont émissions gazeuses et rendement)

3.2.1.1. Résultats en termes de températures et tirages

Pour chaque expérience, les résultats en termes de niveaux de températures et de tirages pour les allumages, allures nominales et allures réduites sont présentés dans le Tableau 4 et le

Tableau 5.

Le détail des expériences est rappelé ci-dessous :

Tableau 4 : Résultats de températures et tirages pour l'appareil de 2006. (All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

Expérience	Phase	Temp air comburant t [°C]	Temp buse [°C]	Temp des fumées au plafond [°C]	Temp des fumées à l'évacuati on [°C]	Temp extérieure [°C]	Tirage [Pa]
02 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	All	18,0	283,9	210,9	147,7	8,6	-15,5
	Nom	24,9	311,8	242,3	198,1	9,0	-17,2
	Red	22,4	289,9	211,9	171,4	10,7	-14,7
11 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	All	18,0	328,8	264,4	173,8	/	-33,6
	Nom	20,7	314,0	257,1	190,6	11,7	-35,9
	Red	21,6	352,6	274,9	217,6	11,7	-37,7
12 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	All	18,6	339,0	122,6	99,6	/	-18,0
	Nom	21,1	340,8	106,9	90,5	/	-16,9
	Red	22,1	329,5	104,4	93,1	/	-16,3
14 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	All	16,8	285,3	236,0	197,7	11,2	-12,5
	Nom	32,3	298,0	242,4	192,8	11,5	-16,2
	Red	35,0	260,9	210,0	150,2	11,6	-16,6

Tableau 5 : Résultats de températures et tirages avec l'appareil de 2018. (All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

Expérience	Phase	Temp air comburant [°C]	Temp buse [°C]	Temp des fumées au plafond [°C]	Temp des fumées à l'évacuation [°C]	Temp extérieure [°C]	Tirage [Pa]
01 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	All	17,8	419,9	264,6	230,0	14,2	-14,9
	Nom	19,7	389,2	238,0	194,0	15,1	-17,2
	Red	20,5	378,4	232,4	206,6	14,8	-17,1
03 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	All	17,8	333,4	231,8	159,7	14,9	-31,8
	Nom	18,4	354,8	235,4	185,3	12,5	-33,8
	Red	18,9	398,9	264,8	216,7	15,8	-36,7
04 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	All	15,4	423,9	157,9	131,0	10,0	-23,0
	Nom	17,9	414,9	138,1	129,2	10,1	-21,5
	Red	19,8	415,2	142,8	120,4	10,2	-21,5
06 Conduit concentrique triple paroi 4 m	All	85,2	501,9	436,9	349,9	9,9	-12,3
	Nom	108,3	447,0	381,3	321,0	9,4	-12,7
	Red	91,1	382,9	325,7	280,2	10,4	-12,4
08 Conduit concentrique triple paroi 8 m	All	78,4	454,3	380,0	246,1	17,8	-20,6
	Nom	104,9	409,3	351,2	240,8	16,9	-19,0
	Red	108,7	402,5	346,5	246,5	17,2	-18,0
09 Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur	All	55,6	411,2	208,6	158,8	19,9	-11,6
	Nom	76,0	431,4	190,8	154,3	18,6	-10,6
	Red	75,8	434,7	185,8	155,3	18,4	-10,6
10 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	All	14,1	407,5	246,8	167,1	10,5	-20,3
	Nom	16,9	347,9	195,2	136,7	10,1	-16,2
	Red	16,2	339,9	195,2	138,1	10,2	-16,9

La Figure 18 montre, à titre d'exemple, sur trois expériences réalisées avec l'appareil de 2018, les différences de tirages mesurés lors d'un allumage et de plusieurs périodes d'essais dans des conditions variables : conduit de 4 m (courbe rouge), conduit de 8 m (courbe bleu foncé) et conduit de 8 m avec régulateur de tirage (courbe bleu clair).

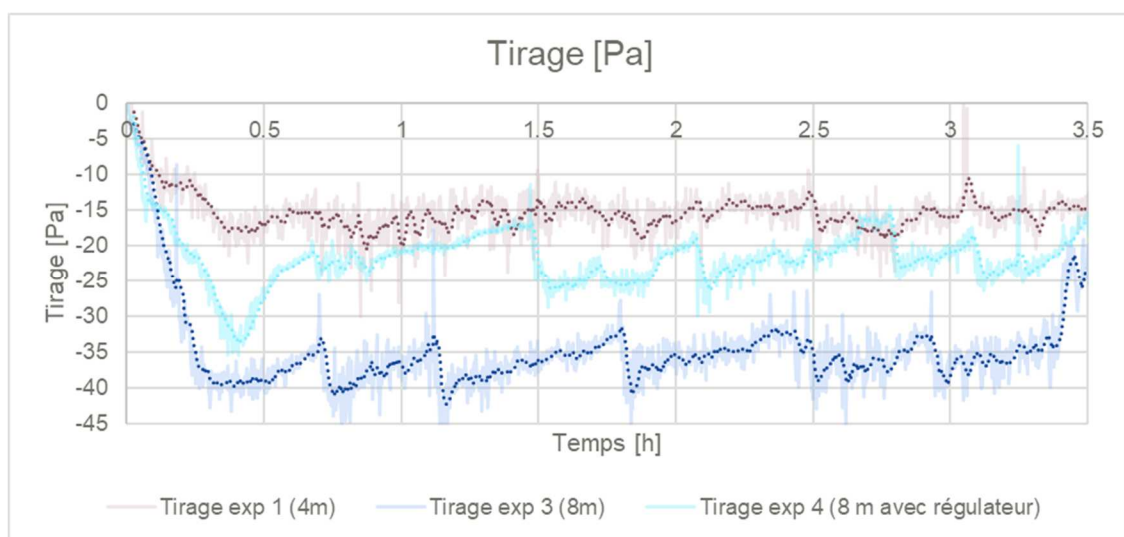


Figure 18 : Tirage mesuré avec l'appareil de 2018 (exemples).

Plusieurs différences sont notables. Concernant le tirage :

- Les configurations réalisées avec 8 m de conduit augmentent fortement le tirage de l'installation (-16,6 Pa de différence entre les expériences à 4 et 8m). Pour rappel, le tirage recommandé pour les appareils à bûches se situe autour de -12 Pa (minimum autorisé pour les fabricants dans la norme appareil à combustion solide NF EN 16510-1).
- L'utilisation du régulateur de tirage permet de limiter le sur-tirage à -4,3 Pa pour le poêle (2018) entre l'expérience avec un conduit de 4m et l'expérience à 8 m avec régulateur.
- Ces constats vont dans le même sens pour les deux appareils. Pour l'insert (2006), le tirage avec le régulateur et 8 m de conduits était même inférieur à celui pour 4 m de conduits sans régulateur.

Concernant les niveaux de températures :

- La diminution de température entre la buse de sortie de l'appareil et le plafond est variable. Certains types de conduits, comme les raccordements simple paroi, favorisent une diminution de température importante (favorable à une restitution d'énergie dans la pièce). Cette diminution de température peut atteindre 150°C (pour l'expérience 1). Avec la présence d'un régulateur, la température s'abaisse même de 276°C sur le raccordement (pour l'expérience 4) mais cette baisse de température est aussi liée à l'injection d'air frais dans le conduit.
- L'utilisation du conduit concentrique isolé a porté la température de l'air comburant au-dessus de 100°C à l'entrée dans l'appareil.

3.2.1.2. Résultats de rendement par expérience – étude de l'influence du conduit de raccordement

Pour chaque expérience, les résultats de rendements pour les allumages, allures nominales et allures réduites sont présentés dans le Tableau 6 et le

Tableau 7.

Tableau 6 : Rendement calculé avec l'appareil de 2006. (All: Allumage ; Nom: Nominal ; Red: Réduit)

Expérience	Phase	Moyenne de Rendement au niveau de l'appareil [%]	Moyenne de Rendement au niveau du plafond [%]	Min. de Rendement au niveau du plafond [%]	Max. de Rendement au niveau du plafond [%]
02 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	All	53,9	60,6	59,0	63,3
	Nom	43,9	58,3	56,6	60,6
	Red	46,5	57,6	51,9	62,9
11 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	All	49,9	59,1	58,0	60,4
	Nom	46,6	57,4	55,7	59,3
	Red	43,3	54,7	53,2	55,8
12 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	All	56,0	56,6	56,5	56,7
	Nom	53,7	55,2	53,6	57,1
	Red	52,6	54,2	51,8	56,2
14 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	All	54,2	59,0	53,9	63,5
	Nom	48,7	58,3	54,6	60,4
	Red	49,1	57,7	54,5	59,7

Tableau 7 : Rendement calculé avec l'appareil de 2018. (All: Allumage ; Nom: Nominal ; Red: Réduit)

Expérience	Phase	Moyenne de Rendement au niveau du poêle [%]	Moyenne de Rendement au niveau du plafond [%]	Min. de Rendement au niveau du plafond [%]	Max. de Rendement au niveau du plafond [%]
01 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	All	62,5	75,0	74,2	75,5
	Nom	59,9	75,4	70,3	77,9
	Red	57,7	74,3	66,3	76,4
03 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	All	53,9	68,1	65,9	70,4
	Nom	47,0	62,0	56,9	67,0
	Red	49,4	64,5	58,7	69,4
04 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	All	61,9	61,0	59,8	62,2
	Nom	60,1	58,7	56,9	61,1
	Red	59,7	57,7	54,5	60,6
06 Conduit concentrique triple paroi 4 m	All	64,3	67,5	64,7	70,8
	Nom	65,5	65,2	61,0	67,1
	Red	61,7	64,0	60,9	67,3
08 Conduit concentrique triple paroi 8 m	All	59,1	62,9	61,4	64,2
	Nom	60,1	60,8	56,0	64,9
	Red	62,8	61,4	58,3	63,5
09 Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur	All	63,0	62,2	61,1	63,4
	Nom	62,8	59,8	55,0	63,8
	Red	63,8	61,4	56,7	67,2
10 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	All	59,7	73,7	73,2	74,5
	Nom	55,1	71,6	67,2	77,6
	Red	49,0	70,2	67,6	73,2

Les valeurs maximales de rendement au niveau du plafond en allures nominales ont été en moyenne de :

- 75,4 % pour l'appareil de 2018 (pour 80 % annoncés par le fabricant en conditions normalisées) ;
- 58,3 % pour l'appareil de 2006 (pour 75,3 % annoncés par le fabricant en conditions normalisées).

Il est intéressant d'observer que, même si les rendements mesurés sont inférieurs à ceux annoncés par les fabricants en conditions normalisées, l'appareil de génération 2018 apporte un réel gain sur le rendement par rapport à celui de 2006. De plus, c'est pour l'appareil de 2018 que le rendement déclaré (résultat normalisé) se rapproche le plus du rendement mesuré dans des conditions proches du fonctionnement réel.

La Figure 19 présente un diagramme d'évolution des rendements pour l'intégralité des essais.

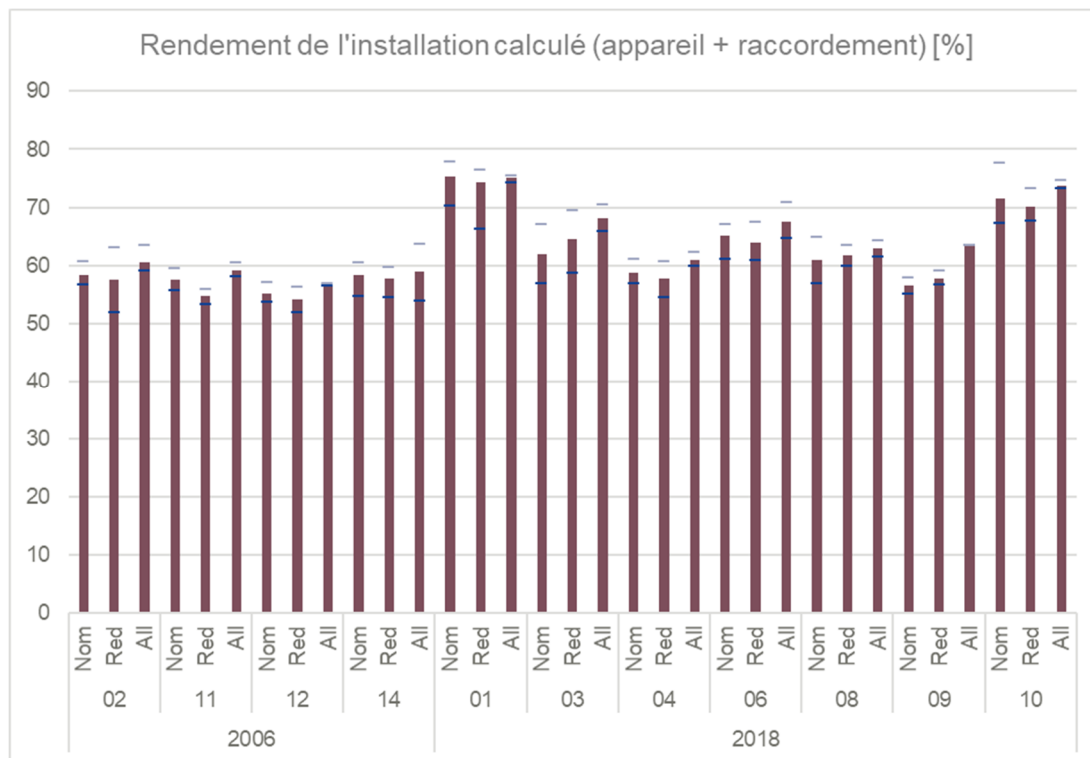


Figure 19 : Rendement de l'installation calculé au niveau du plafond.

La Figure 20 montre graphiquement les valeurs des écarts entre les rendements calculés au niveau du plafond et au niveau de la buse du poêle.

Ces écarts reflètent donc le gain de rendement apporté par le conduit de raccordement ou la partie de conduit située dans la pièce chauffée.

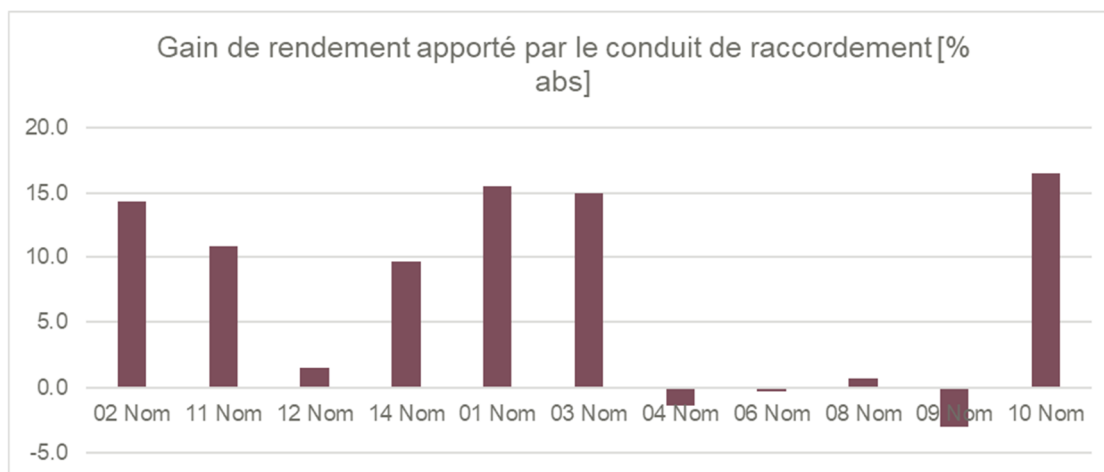


Figure 20 : Gains de rendement apportés par le conduit de raccordement.

Certaines expériences, montrent un gain de rendement négatif. Les expériences 4 et 9 par exemple ont été réalisées avec un régulateur. Le régulateur, en ajoutant de l'air dans le conduit modifie fortement le taux de CO2 dans le conduit, tout en abaissant la température de fumée et en augmentant le débit volumique de fumée. Ces différentes modifications augmentent l'incertitude de mesure du rendement après le régulateur dans ces conditions. Il faut donc considérer ce gain de rendement comme nul ou négligeable pour ces expériences.

Cependant, l'intérêt de récupérer de l'énergie supplémentaire par le conduit de raccordement n'est pas toujours souhaité, surtout pour des appareils de plus en plus performants et déclarant des températures de fumée de plus en plus faibles. Par exemple, il est parfois préférable d'isoler la partie raccordement

pour favoriser le tirage ou pour éviter des risques de condensation. Ce sont alors les calculs de dimensionnement qui sont prioritaires sur le rendement global puisqu'ils définissent les caractéristiques de bon fonctionnement et de sécurité de l'installation. Quelques exemples sont donnés dans le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Avantages et inconvénients des solutions de raccordements des appareils.

	Conduit de raccordement isolé	Conduit de raccordement non isolé
Avantages	Distance de sécurité réduite à 8 cm	
	Limite le risque de condensation	Optimise la récupération d'énergie (rendement de l'installation)
	Dimensionnement plus favorable (EN 13384-1)	
Inconvénients		Distance de sécurité de 3 fois le diamètre
	Limite la récupération d'énergie	Peut favoriser la condensation
		Peut générer de l'inconfort (surchauffe et assèchement de l'air dans la pièce)

Observations générales sur les mesures de rendements :

- **Le conduit de raccordement participe de façon importante à la restitution de l'énergie dans la pièce.** Par exemple, pour un appareil consommant 7 kW, 15 % de gains de rendements sont observés au niveau du conduit de raccordement, ce qui correspond à une puissance de plus d'1 kW. Plus les échanges thermiques avec la pièce sont favorisés, plus la quantité d'énergie récupérée est importante. Il est donc primordial de tirer profit de cette énergie en favorisant les échanges sur la partie « raccordement » du montage en limitant l'isolation sur cette zone. Une piste d'amélioration serait par exemple d'appliquer ce principe au conduit concentrique triple paroi en supprimant l'isolant sur la partie « raccordement » uniquement. Cette opération pourrait permettre d'augmenter le rendement de l'installation de plus de 10 % en fonction des conditions.
- **Le conduit a aussi un impact sur le fonctionnement de l'appareil en lui-même et sur ses performances.** A la buse, des écarts de rendement de l'ordre de 10 points ont été mesurés en puissance nominale entre les configurations. Lorsque l'on observe le rendement du poêle seul, donc sa capacité à restituer l'énergie disponible dans le combustible, on remarque par exemple que le tirage exerce une influence très importante sur ses performances. Les montages les plus hauts « 8 m » créent un fort tirage, ce qui dégrade le rendement des appareils. L'ajout des régulateurs sur les installations « 8 m » agit globalement de façon positive sur les rendements mesurés à la buse. En revanche, l'ajout d'un régulateur de tirage abaisse la température de fumée tout en augmentant sa vitesse. Une température de fumée basse défavorise les échanges opérés sur la partie raccordement du conduit et donc la récupération d'énergie. Il serait donc thermiquement plus intéressant de positionner ce régulateur le plus haut possible dans le conduit afin de maintenir un tirage satisfaisant tout en favorisant la récupération d'énergie au travers du conduit de raccordement.

3.2.1.3. Résultats généraux d'OC/EC en allure nominale

Pour chaque expérience, les résultats des teneurs en OC/EC sont présentés dans le Tableau 9 et le Tableau 10. La position « Raccordement » correspond à la mesure effectuée dans la zone habitable (avant le plafond). La position « Evacuation » correspond à la mesure réalisée dans le dernier élément de conduit (avant le terminal d'évacuation de fumée).

Tableau 9 : OC/EC en allure nominale avec l'appareil de 2006.

Expérience	Position	OC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	EC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	TC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	Ratio OC/EC
02 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	Raccordement	8,6	3,3	11,9	2,8
	Evacuation	50,6	1,5	52,1	32,9
11 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	Raccordement	15,9	8,4	24,3	4,5
	Evacuation	11,6	6,6	18,2	7,4
12 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	Raccordement	30,0	5,4	35,4	5,6
	Evacuation	7,9	5,3	13,3	1,5
14 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	Raccordement	14,6	5,9	20,5	4,2
	Evacuation	8,8	1,7	19,8	4,5

Tableau 10 : OC/EC en allure nominale avec l'appareil de 2018.

Expérience	Position	OC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	EC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	TC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	Ratio OC/EC
01 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	Raccordement	8,5	0,9	9,4	11,9
	Evacuation	2,7	0,7	3,5	5,4
03 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	Raccordement	5,6	3,8	9,3	27,1
	Evacuation	5,9	17,5	23,4	0,3
04 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	Raccordement	5,9	10,5	16,4	0,5
	Evacuation	1,4	2,4	3,8	0,7
06 Conduit concentrique triple paroi 4 m	Raccordement	7,1	21,4	28,5	0,3
	Evacuation	0,8	1,8	2,6	2,1
08 Conduit concentrique triple paroi 8 m	Raccordement	5,7	0,5	6,2	12,8
	Evacuation	4,2	0,8	5,1	7,2
09 Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur	Raccordement	3,6	0,6	4,2	6,1
	Evacuation	8,1	1,0	9,0	13,5
10 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	Raccordement	9,4	0,6	10,0	13,0
	Evacuation	0,5	0,1	0,6	6,5

Aucun paramètre influant sur les résultats d'OC/EC ne se dégage à première vue à la lecture de ces résultats. L'étude plus précise de comparaison au cas par cas (présentée dans le chapitre 3.2.3) permettra de mieux analyser ces données dans leur ensemble. Notons cependant que les ratios OC /EC sont dans l'ensemble faibles, avec une moyenne autour de 10%.

3.2.1.4. COV et NOx en allure nominale

Pour chaque expérience, les résultats d'émissions de COV et de NOx sont présentés dans le Tableau 11 et le Tableau 12.

Tableau 11 : COV et NOx en allure nominale avec l'appareil de 2006.

Expérience	Position	CH ₄ [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	COVT [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	CH ₄ /COVT	NOx [mgEqNO ₂ /N m ³ corrigé à 13% d'O ₂]
02 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	Raccordement	169,7	706,0	0,2	53,4
	Evacuation	150,3	565,7	0,3	52,6
11 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	Raccordement	194,0	803,9	0,2	61,6
	Evacuation	156,8	533,1	0,3	64,0
12 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	Raccordement	155,9	641,6	0,2	30,7
	Evacuation	223,6	791,6	0,3	29,7
14 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	Raccordement	271,3	978,1	0,3	54,1
	Evacuation	213,5	877,9	0,2	51,9

Tableau 12 : COV et NOx en allure nominale avec l'appareil de 2018.

Expérience	Position	CH ₄ [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	COVT [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	CH ₄ /COVT	NOx [mgEqNO ₂ /N m ³ corrigé à 13% d'O ₂]
01 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	Raccordement	142,0	372,5	0,4	46,2
	Evacuation	81,1	313,1	0,3	49,0
03 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	Raccordement	288,0	848,4	0,3	46,8
	Evacuation	86,9	246,4	0,4	50,1
04 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	Raccordement	123,5	374,0	0,4	49,4
	Evacuation	94,8	281,9	0,3	48,1
06 Conduit concentrique triple paroi 4 m	Raccordement	62,7	153,2	0,4	37,7
	Evacuation	57,5	142,4	0,4	40,3
08 Conduit concentrique triple paroi 8 m	Raccordement	215,6	746,5	0,3	55,6
	Evacuation	95,7	239,6	0,4	53,3
09 Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur	Raccordement	143,6	320,3	0,5	26,4
	Evacuation	135,6	438,5	0,3	25,9
10 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	Raccordement	259,3	835,6	0,3	38,6
	Evacuation	128,1	320,0	0,4	38,5

De la même manière que pour les émissions d'OC/EC, il est difficile de déterminer des paramètres agissant sur l'évolution des émissions de COV ou de NOx à la seule vue de ces résultats. L'analyse de l'ensemble des données permettra de mieux comprendre.

3.2.2. Les résultats généraux d'émissions de particules

3.2.2.1. Les TSP

Pour chaque expérience, les résultats d'émissions de TSP sont présentés dans le Tableau 13 et le Tableau 14.

Tableau 13 : TSP appareil 2006.
(All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

Expérience	Phase	Moyenne de TSP au plafond [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Nombre de prélèvements	Moyenne de TSP à l'évacuation [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Nombre de prélèvements	Gradient de TSP (évacuation/plafond) [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Gradient de TSP (évacuation/plafond) [évolution en %]
02 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	All	94,6	3	89,3	3	-5,3	-6%
	Nom	66,8	3	69,8	3	+3	+4%
	Red	96,2	3	86,7	3	-9,5	-11%
11 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	All	99,3	3	76,1	3	-23,2	-30%
	Nom	60,9	2	82,9	2	+22	+27%
	Red	64,5	2	78,2	2	+13,7	+17%
12 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	All	56,5	2	70,9	2	+14,4	+20%
	Nom	54,0	2	73,4	2	+19,4	+27%
	Red	54,9	2	69,7	2	+14,8	+21%
14 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	All	51,7	1	84,0	2	+32,3	+38%
	Nom	67,9	2	81,7	2	+13,8	+17%
	Red	72,7	2	87,2	2	+14,5	+17%

Tableau 14 : TSP appareil 2018.

Expérience	Phase	Moyenne de TSP au plafond [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Nombre de prélèvements	Moyenne de TSP à l'évacuation [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Nombre de prélèvements	Gradient de TSP (évacuation/plafond) [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Gradient de TSP (évacuation/plafond) [évolution en %]
01 Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m	All	80,4	5	77,5	3	-2,9	-4%
	Nom	29,3	4	27,4	4	-1,9	-7%
	Red	33,8	3	32,7	3	-1,1	-3%
03 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m	All	108,5	2	119,9	2	11,4	+11%
	Nom	27,8	2	27,3	2	-0,5	-2%
	Red	50,3	2	45,7	2	-4,6	-9%
04 Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur	All	94,0	2	81,2	2	-12,8	-14%
	Nom	99,3	2	95,9	2	-3,4	-3%
	Red	87,7	2	79,0	2	-8,7	-10%
06 Conduit concentrique triple paroi 4 m	All	100,7	2	96,4	3	-4,3	-4%
	Nom	88,6	2	91,0	2	+2,4	+3%
	Red	27,0	2	27,8	2	+0,8	+3%
08 Conduit concentrique triple paroi 8 m	All	70,0	2	69,9	3	-0,1	0%
	Nom	45,5	3	49,5	3	+3,9	+9%
	Red	44,2	3	38,4	3	-5,9	-13%
09 Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur	All	63,3	2	63,1	2	-0,2	-0%
	Nom	35,4	2	18,9	2	-16,5	-18%
	Red	56,8	2	46,4	1	-10,4	-20%
10 Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m	All	63,1	3	64,7	2	+1,6	+3%
	Nom	29,9	3	19,1	2	-10,8	-36%
	Red	47,5	2	28,4	2	-19,1	-40%

Afin de mieux visualiser les résultats pour les TSP, les Figure 21 et Figure 22 les présentent sous forme d'histogrammes. Les barres d'erreurs claires correspondent aux valeurs mini et maxi relevées pour le point de mesure « évacuation », les barres d'erreurs foncées correspondent à ces mêmes extremums pour le point de mesure « raccordement ».

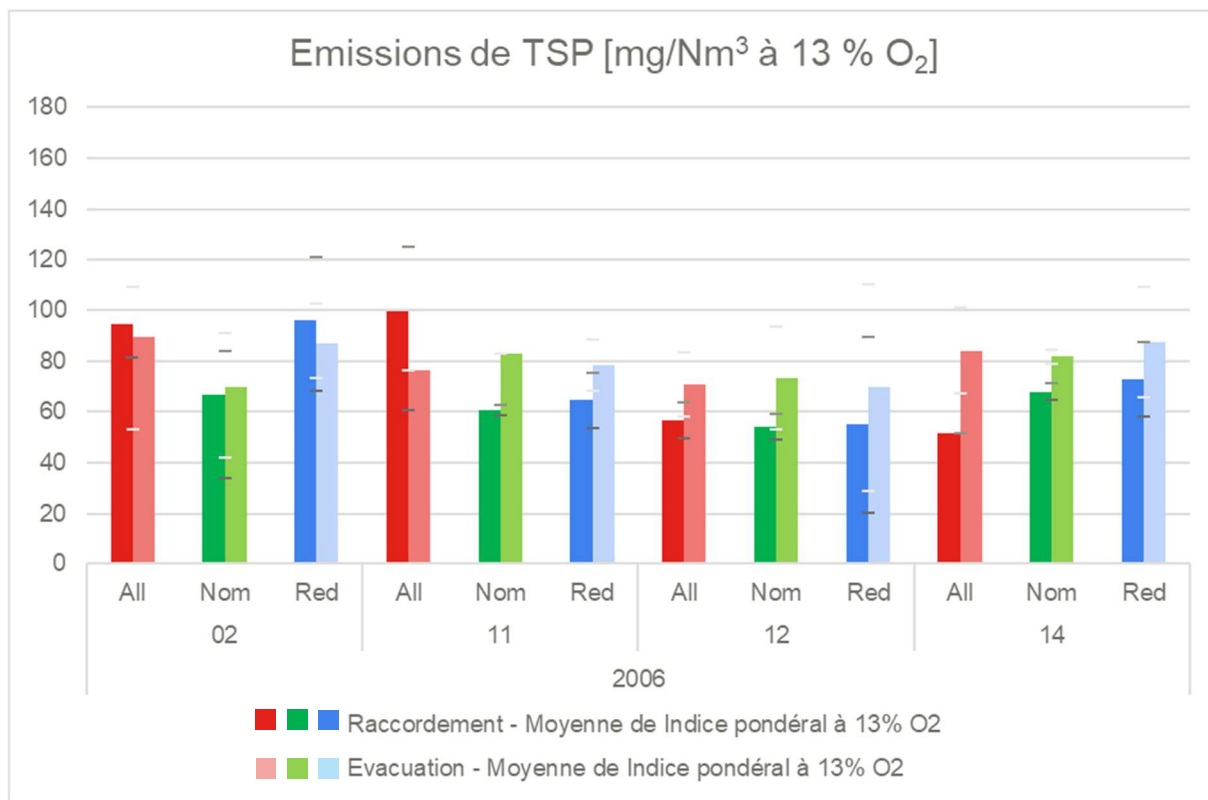


Figure 21 : Emissions de TSP pour l'appareil de 2006. (All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

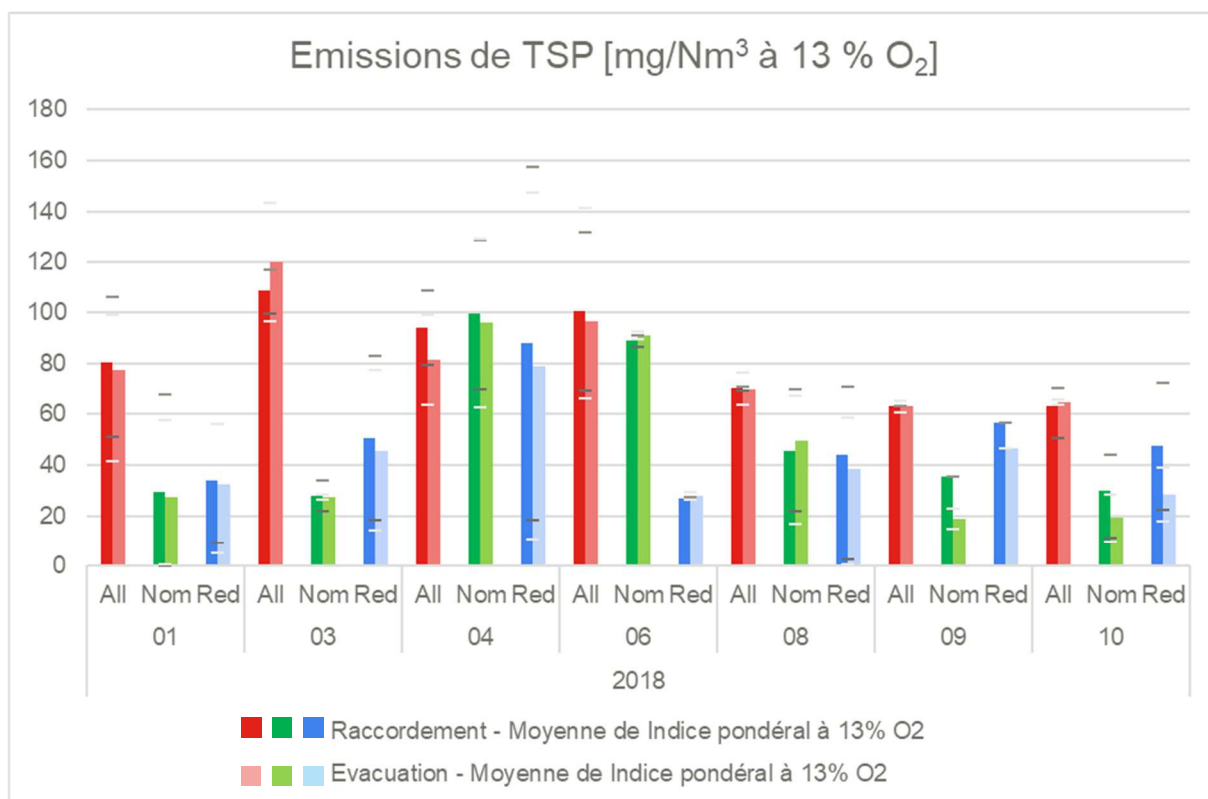


Figure 22 Emissions de TSP pour l'appareil de 2018 (All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit).

Les valeurs minimales d'émissions de TSP au niveau du plafond en allure nominale ont été en **moyenne** de :

- 54 mg/Nm³ pour l'appareil de 2006 (pour 30 mg/Nm³ annoncés par le fabricant en conditions normalisées) ;

- 28 mg/Nm³ pour l'appareil de 2018 (pour 25 mg/Nm³ annoncés par le fabricant en conditions normalisées).

Nous observons une forte sensibilité de l'appareil de 2018 au type de conduit utilisé. C'est pour cet appareil que les écarts de mesures de TSP sont les plus importants (notamment entre l'allumage et l'allure nominale) : à chaque allumage, les émissions sont les plus élevées, alors que lors des phases de fonctionnement à allure nominale et à allure réduite, les émissions sont plus faibles, avec des valeurs comprises le plus souvent entre 20 et 40 mg/Nm³ à 13% d'O₂.

Par ailleurs, le

Tableau 13 et le

Tableau 14 montrent des comportements différents entre les émissions de TSP aux niveaux du raccordement ou de l'évacuation. Pour l'appareil de 2006, les teneurs en TSP ont tendance à augmenter au fur et à mesure que les fumées se rapprochent de l'évacuation, alors que dans le cas de l'appareil de 2018, les teneurs restent plutôt stables, voire ont tendance à diminuer. Ce point sera discuté par la suite (présenté dans le chapitre 3.2.3).

3.2.2.2. Répartition granulométrique ELPI (nominal)

Les résultats de répartition granulométrique des particules dans les fumées mesurés avec l'appareil ELPI sont présentés dans le Tableau 15. Les classes D_p 0,04 à D_p 8,10 correspondent au diamètre aérodynamique de coupure de l'équipement en μm (donc à la taille de particule maximale de la catégorie).

Le détail des expériences est rappelé ci-dessous :

Pour l'insert 2006 :

- Expérience 2 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Expérience 11 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m
- Expérience 12 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur
- Expérience 14 : Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m

Pour le poêle 2018 :

- Expérience 1 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Expérience 3 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m
- Expérience 4 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur
- Expérience 6 : Conduit concentrique triple paroi 4 m
- Expérience 8 : Conduit concentrique triple paroi 8 m
- Expérience 9 : Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur
- Expérience 10 : Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m

Pour des raisons techniques et matérielles, certaines données ne sont pas exploitables (expérience 2 et expériences 01 et 09 « évacuation »).

La Figure 23 présente les mêmes résultats sous forme d'histogramme afin de faciliter leur lecture.

Tableau 15 : Résultats ELPI.

Appareil	Expérience	Position	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp		
			0,04 µm [%]	0,07 µm [%]	0,12 µm [%]	0,20 µm [%]	0,31 µm [%]	0,48 µm [%]	0,76 µm [%]	1,22 µm [%]	1,95 µm [%]	3,08 µm [%]	5,14 µm [%]	8,10 µm [%]	
2006	02	Raccordement	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
		Evacuation	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
	11	Raccordement	6,9	12,6	30,3	28,1	13,0	6,6	2,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	7,1	9,1	28,9	30,3	14,0	8,5	1,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
	12	Raccordement	6,8	14,6	34,7	24,3	11,1	6,8	1,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	10,8	20,7	33,9	21,1	8,5	4,1	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
	14	Raccordement	19,3	13,9	21,7	19,2	15,4	7,6	2,6	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	6,1	7,1	21,4	24,7	21,0	13,2	6,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	
	2018	01	Raccordement	15,2	25,7	30,5	20,1	5,7	2,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
			Evacuation	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
03		Raccordement	13,8	21,3	28,1	19,0	13,1	3,9	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	16,4	43,5	30,4	7,6	1,5	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
04		Raccordement	6,6	27,4	45,1	15,1	4,4	1,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	5,4	24,9	40,2	20,9	6,6	1,6	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
06		Raccordement	47,4	27,3	16,9	6,9	1,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	39,0	26,8	22,0	9,6	2,1	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
08		Raccordement	20,6	21,7	28,3	18,1	8,5	2,5	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	8,7	27,1	39,8	15,5	6,4	2,0	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
09		Raccordement	22,1	33,1	29,0	10,1	4,3	1,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
10		Raccordement	14,7	20,9	29,0	19,9	10,3	4,3	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Evacuation	3,3	13,6	37,9	30,7	10,1	3,8	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	

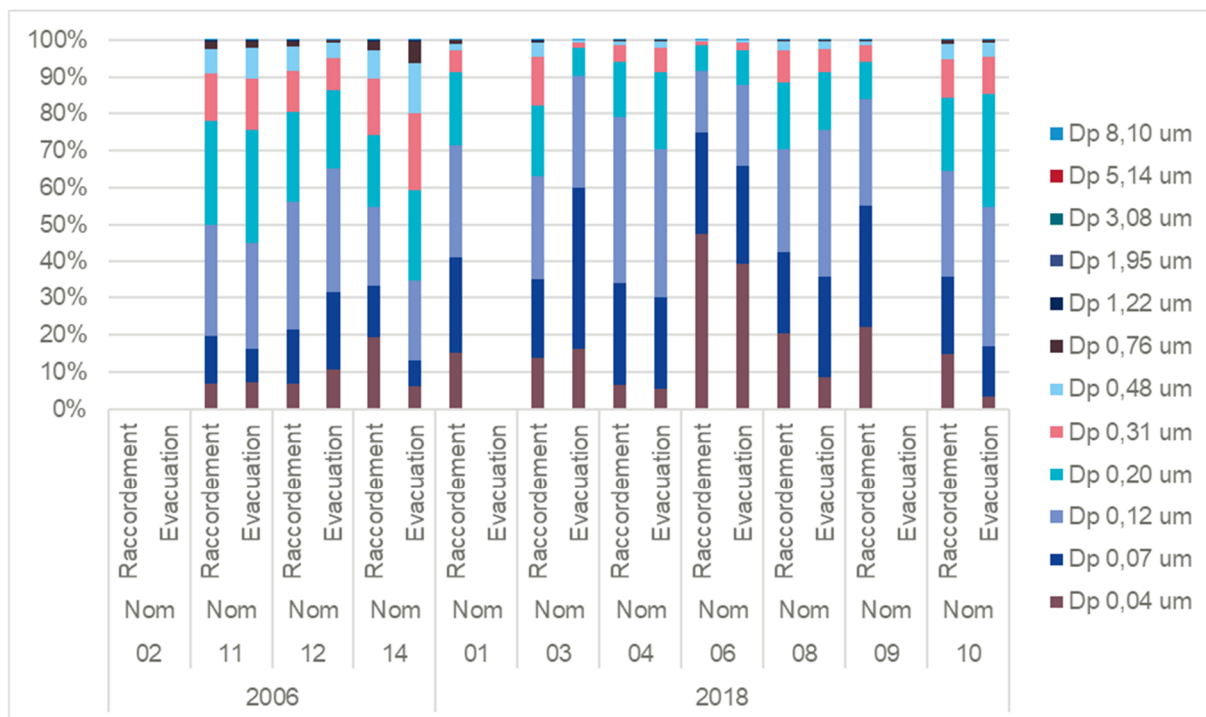


Figure 23 : Répartition granulométrique ELPI.

Une étude détaillée de ces résultats est présentée dans le chapitre 3.2.3.

Éléments à retenir :

- Les résultats de la campagne d'essai sont répétables et permettent une analyse fine de l'impact de chaque élément sur les résultats de combustion.
- De manière générale, le conduit concentrique *triple paroi* isolé semble améliorer la qualité de combustion, mais défavoriser le potentiel de récupération d'énergie dans la pièce et donc le rendement global de l'installation. Les mêmes conclusions peuvent être faites a priori sur le régulateur de tirage. Le conduit concentrique triple paroi isolé présente cependant l'avantage de limiter les risques de condensation dans le conduit pour des appareils performants, déclarant des températures de fumée de plus en plus basses.
- Les résultats semblent différer avec la génération de l'appareil. L'analyse fine des résultats prendra en compte ce critère.
- L'appareil récent montre des performances proches de celles annoncées par le fabricant, bien qu'utilisé dans des conditions s'approchant des conditions réelles (inspirées du protocole BeReal). En revanche l'appareil plus ancien montre des performances plus éloignées de celles indiquées par le fabricant.

3.2.3. Etudes d'impacts

Le grand nombre de résultats ne permet pas de visualiser facilement les influences des différentes solutions de fumisteries sur les performances énergétiques et environnementales des appareils. Ainsi, cette partie vise à mettre en évidence ces observations expérimentales en comparant des essais entre eux. Divers éléments sont considérés comme l'impact du type ou de la hauteur de conduit, la présence d'un régulateur de tirage. L'évolution des particules dans le conduit est observée.

Dans cette partie, pour des raisons pratiques et d'habitudes de traitements des résultats, les COVT seront exprimés en équivalent CH₄. Cela modifie légèrement les valeurs par rapport à la partie précédente (où les COVT étaient exprimés en équivalence Carbone pour être cohérent avec la norme EcoDesign), mais les écarts et les évolutions restent identiques.

3.2.3.1. Impact du type de conduit

Pour évaluer l'impact du type de conduit sur les performances énergétiques et environnementales d'un appareil ainsi que sur les caractéristiques physico-chimiques des particules, trois essais ont été sélectionnés avec l'appareil de 2018 et deux essais ont été sélectionnés avec celui de 2006 :

- 2018 : Essai 1 (Isolé, 4m), Essai 6 (Conduit concentrique triple paroi, 4m) et Essai 10 (Boisseaux, 4m) ;
- 2006 : Essai 2 (Isolé, 4m), Essai 14 (Boisseaux, 4m).

3.2.3.1.1. Impact sur la qualité de combustion

Le Tableau 16 présente les résultats détaillés des essais sélectionnés pour l'appareil de 2018. Les expériences suivantes y sont analysées pour le poêle 2018.

- Essai 1 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 6 : Conduit concentrique triple paroi 4 m
- Essai 10 : Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m

Tableau 16 : Impact de la solution de fumisterie sur les performances de l'appareil de 2018 (bas = mesure au niveau du plafond ; haut = évacuation)

Essai N°	Caractéristiques	Rendement [%]	CO [ppm à 13% d'O ₂]	COVT bas [mg _{eqCH4} /Nm ³ à 13% d'O ₂]	COVT haut [mg _{eqCH4} /Nm ³ à 13% d'O ₂]	Fumées bas [°C]	Fumées haut [°C]	Tirage [Pa]
1	Isolé, 4 mètres	75,4	1911	279	235	238	194	- 17
6	Concentrique, 4 mètres	65,2	1102	115	107	381	321	- 13
10	Boisseaux, 4 mètres	71,6	3321	627	240	195	137	- 16

Le rendement maximal du système de chauffage (appareil + conduit) est obtenu avec le conduit isolé, alors que le rendement minimal est obtenu non pas avec les boisseaux tubés comme on aurait pu le croire, mais avec le conduit concentrique triple paroi (conduit concentrique avec isolation entre les deux tubes concentriques). Ce point s'explique par le fait que le conduit concentrique triple paroi présente une température de contact de conduit dans la pièce très faible, et ainsi ne propage par ce moyen que très peu de calories. Ces conduits présentent également des températures de fumées basses et hautes nettement plus élevées que dans les deux autres cas (+ de 100°C plus haut). L'isolation proposée par ce type de conduit est en fait double, avec d'abord un isolant, puis en allant vers l'extérieur, une lame d'air assez importante (air qui descend vers l'appareil pour la combustion) qui évite les pertes vers l'extérieur.

Le plus souvent, un appareil qui possède un faible rendement est un appareil dans lequel la combustion n'est pas optimale, ce qui induit des fortes émissions polluantes : dans le cas des appareils reliés au conduit concentrique triple paroi, c'est l'inverse. Il réduit très fortement les émissions de CO (- 40 % par rapport au conduit isolé et -67 % par rapport aux boisseaux tubés). Les émissions de COVT, hautes ou basses, sont aussi drastiquement réduites. En effet, on observe une chute de 59 % des émissions de COVT bas par rapport au conduit isolé et de 82 % par rapport aux boisseaux tubés. Cela est très certainement lié à deux aspects importants : le préchauffage de l'air comburant, qui permet d'améliorer la combustion et le tirage, est globalement bien contrôlé avec ce type de conduit, notamment par la présence de pertes de charges maîtrisées.

Tous ces éléments montrent qu'au niveau des émissions d'imbrûlés, et donc de la qualité de la combustion, la meilleure solution est le conduit concentrique triple paroi, suivie par les conduits isolés. Ce constat est d'ailleurs confirmé par les rendements mesurés à la buse de l'appareil qui montrent les meilleurs résultats avec le conduit concentrique triple paroi. En revanche, du fait d'une non-récupération des calories du conduit dans la pièce dans le cas de ce conduit, le rendement global de l'installation est plus faible.

Afin d'optimiser ce dernier point, une réflexion autour de l'augmentation des échanges « conduits → pièce » dans le cas du conduit concentrique triple paroi permettrait de bénéficier de ses atouts tout en résolvant sa faiblesse. Il semble ainsi que la solution d'un conduit simple paroi dans la pièce, puis le passage au conduit concentrique triple paroi au niveau du plafond, soit la solution la plus viable

pour concilier l'augmentation du rendement et la baisse des émissions. La solution de fumisterie avec le conduit isolé permet de réduire nettement les émissions d'imbrûlés gazeux par rapport aux boisseaux tubés (- 42% pour le CO et -55% pour les COVT bas), le tout en augmentant d'environ 4 points le rendement.

Le Tableau 17 présente les résultats pour l'appareil de 2006. Les expériences suivantes y sont analysées.

- Essai 2 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 14 : Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m

Tableau 17: Impact de la solution de fumisterie sur les performances de l'appareil de 2006. (bas = mesure au niveau du plafond; haut = évacuation)

Essai N°	Caractéristiques	Rendement [%]	CO [ppm à 13% d'O ₂]	COVT bas [mg _{eq} CH ₄ /N m ³ à 13% d'O ₂]	COVT haut [mg _{eq} CH ₄ /N m ³ à 13% d'O ₂]	Fumées bas [°C]	Fumées haut [°C]	Tirage [Pa]
2	Isolé, 4 mètres	58,3	3342	668	529	242	198	-17
14	Boisseaux, 4 mètres	58,3	3957	734	658	242	193	-16

L'installation d'un conduit isolé sur l'appareil de 2006 permet de réduire au point bas les émissions de CO de 16 % et celles de COVT de 20 %.

Néanmoins, les rendements mesurés sont identiques, ainsi que les températures de fumées ou le tirage. Pour l'appareil de 2006, il apparaît ainsi que le type de conduit n'induit pas de différence majeure dans les niveaux de performances obtenus. Les appareils ancienne génération n'étant pas étanches à l'air, ils sont beaucoup moins sensibles aux variations d'utilisation (utilisateur, combustible).

3.2.3.1.2. Impact sur les émissions de particules

3.2.3.1.2.1. Les émissions en masse et la nature chimique des particules

Le Tableau 18 présente les résultats sur les émissions de particules en masse et leur nature chimique pour l'appareil de 2018. Les expériences suivantes y sont analysées.

- Essai 1 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 6 : Conduit concentrique triple paroi 4 m
- Essai 10 : Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m

Tableau 18: Impact de la solution de fumisterie sur les émissions de particules de l'appareil de 2018. (bas = mesure au niveau du plafond; haut = évacuation)

Essai N°	Caractéristiques	TSP bas [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	TSP haut [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	OC/EC bas	OC/EC haut	TC/TSP bas	TC/TSP haut
1	Isolé, 4 mètres	29	27	9,31	3,74	0,32	0,13
6	Conduit concentrique triple paroi isolé, 4 mètres	89	91	0,33	0,43	0,32	0,03
10	Boisseaux, 4 mètres	30	19	15,85	6,46	0,34	0,03

Tout d'abord, la solution de fumisterie « conduit concentrique triple paroi isolé » semble induire une très forte augmentation des émissions de TSP au point de référence (bas). Cela est sans doute dû au fait que, comme la température d'entrée d'air dans l'appareil est beaucoup plus chaude, les vitesses d'introduction sont plus élevées à facteur d'air équivalent, induisant alors plus d'envols dans la chambre

de combustion : en première approche, en considérant une température de l'air à l'entrée de 140°C, les vitesses seraient multipliées par 1,5 environ. Les deux autres solutions de fumisteries induisent des niveaux d'émissions quasi équivalents au point bas. En revanche, concernant les émissions de particules mesurées au point haut, les boisseaux tubés seraient classés comme les moins émetteurs. Cela est probablement lié à un dépôt beaucoup plus important dans ce type de conduit. En effet, les niveaux de températures sont tout de même très proches, et les émissions au point bas équivalentes à celles du conduit isolé. Ainsi, seuls les mécanismes de dépôts peuvent provoquer cette réduction plus importante.

Les mesures du rapport OC/EC permettent de valider les précédentes observations, ainsi que celles du Tableau 16 (pour rappel, le conduit concentrique triple paroi isolé induit une meilleure combustion). En effet, si nous classons les rapports OC/EC du plus faible au plus élevé, nous obtenons le même ordre que si nous classons les émissions de CO, ou celles de COVT. Ce point démontre bien une fois de plus que le conduit concentrique triple paroi isolé, malgré le fait qu'il induit plus d'envols, optimise nettement la combustion et permet donc d'émettre beaucoup moins de Carbone Organique. Le rapport OC/EC est d'ailleurs divisé par 10 au sein même du conduit lors du transport des fumées. On retrouve le même taux de réduction pour le conduit de type boisseau, mais la réduction est très certainement due aussi, au moins en partie, aux dépôts qui réduisent d'environ 30% les teneurs en TSP.

Concernant les rapports TC/TSP, ils sont extrêmement stables au point bas (environ 0,33). En revanche, au point haut, ces valeurs chutent pour atteindre 0,13 dans le cas de la solution de fumisterie avec le conduit isolé et 0,03 dans les deux autres cas.

Le Tableau 19 présente les résultats obtenus concernant les émissions de particules selon la solution de fumisterie installée sur l'appareil de 2006. Les expériences suivantes sont analysées.

- Essai 2 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 14 : Raccordement simple paroi + boisseau tubé 4 m

Tableau 19 : Impact de la solution de fumisterie sur les émissions de particules de l'appareil de 2006. (bas=mesure au niveau du plafond ; haut=évacuation)

Essai N°	Caractéristiques	TSP bas [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	TSP haut [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	OC/EC bas	OC/EC haut	TC/TSP bas	TC/TSP haut
2	Isolé, 4 mètres	67	70	2,62	32,87	0,18	0,75
14	Boisseaux, 4 mètres	68	82	2,47	5,06	0,30	0,24

Les émissions de TSP au point bas sont équivalentes pour les deux solutions testées : conduit isolé ou boisseaux tubés. Cet élément est donc similaire à celui observé sur l'appareil de 2018. En revanche, les TSP semblent plus concentrées au point haut avec les boisseaux sur l'appareil de 2006 (contrairement à ce qui était observé sur l'appareil de 2018).

La combustion étant de moins bonne qualité, le flux de fumées est beaucoup plus concentré en COVT, d'où les rapports OC/EC élevés dans les deux cas. Ceux-ci sont d'ailleurs très stables au point bas, mais évoluent significativement au point haut (6 fois plus élevés dans le cas du conduit isolé qu'avec les boisseaux). Cela pourrait signifier que beaucoup plus de COV condensent dans le cas de la solution avec le conduit isolé, provoquant ainsi une croissance du rapport OC/EC. Si nous observons les résultats du Tableau 16, cela s'avère être possible avec une baisse significative des teneurs en COVT entre le point bas et le point haut.

Les rapports TC/TSP sont relativement semblables au point bas (0,18 pour le conduit isolé et 0,30 pour les boisseaux) mais évoluent de manière différente. En effet, au point haut, le rapport TC/TSP de la solution de fumisterie avec le conduit isolé a significativement augmenté, alors que celui pour les boisseaux a sensiblement diminué. Ce point montre, une fois de plus, une forte probabilité de condensation des COVT plus importante avec le conduit isolé (condensation qui se déroule sans doute entre la sortie de l'appareil et le plafond, tubée par un conduit de raccordement non isolé).

3.2.3.1.2.2. Les émissions en nombre

La technologie de fumisterie, en impactant sur la qualité de la combustion, doit aussi sans doute influencer sur la distribution granulométrique des particules. La Figure 24 présente les résultats pour l'appareil de 2018 mesurés au point bas lors de la phase nominale pour les trois conduits avec une hauteur de 4 m.

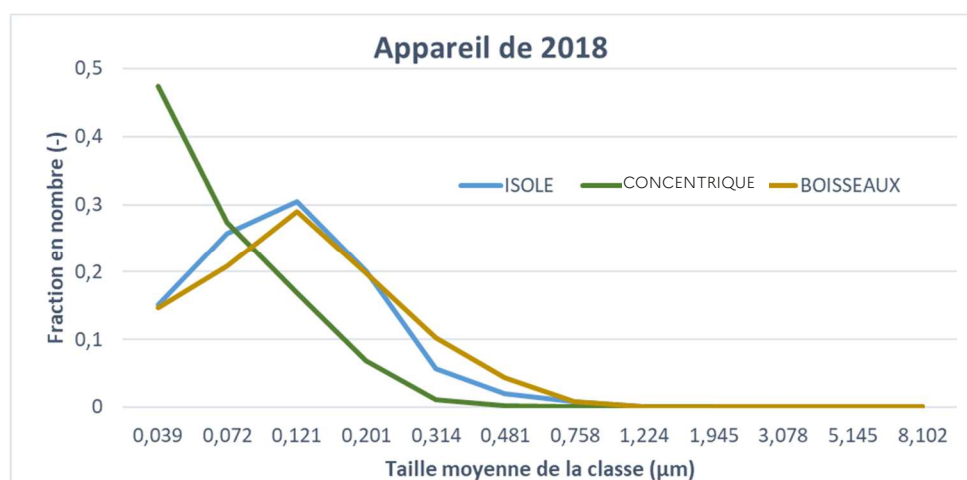


Figure 24 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observer l'impact du type de conduit sur l'appareil de 2018.

Pour cet appareil récent, la distribution granulométrique est quasi identique pour la solution de fumisterie avec les boisseaux tubés et pour celle de raccordement avec conduit isolé. En revanche, le montage concentrique induit des émissions particulaires beaucoup plus fines, réparties à 75 % sur les deux fractions les plus fines (contre seulement 35 % pour les deux autres solutions de fumisterie). Ce résultat est bien corrélé avec l'amélioration de la combustion : en effet, Brandelet & al. (2021) ont montré que l'amélioration de la combustion dans les appareils permettait d'une part de réduire de façon importante les émissions de particules et conduisait d'autre part, malgré une diminution nette importante des émissions, à une augmentation de la part des particules les plus fines.

La Figure 25 présente les résultats obtenus pour l'appareil de 2006 mesurés au point bas lors de la phase nominale entre un raccordement simple paroi + conduits isolés (exp.2) et un raccordement simple paroi + boisseaux tubés (exp. 14).

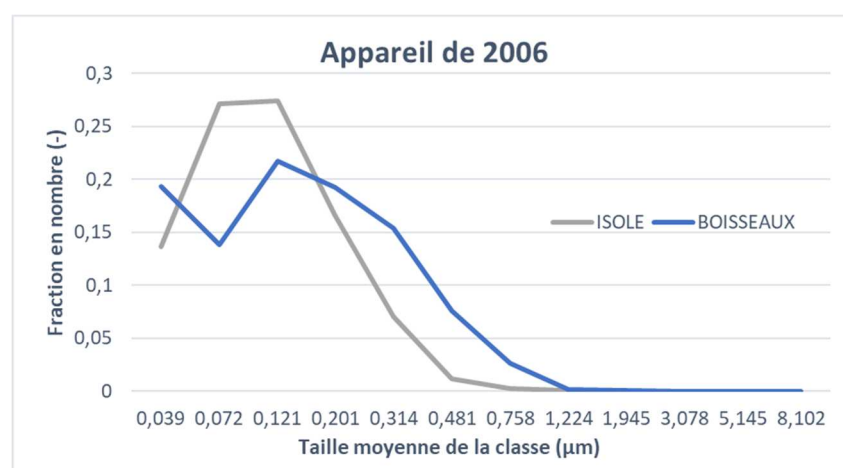


Figure 25 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observer l'impact du type de conduit sur l'appareil de 2006.

Contrairement à ce qui est observé pour l'appareil de 2018, les distributions granulométriques ne sont pas similaires entre le « raccordement simple paroi + boisseaux tubés » et le « raccordement simple paroi + conduit isolé » pour l'appareil de 2006. En effet, dans le cas des boisseaux la distribution semble bimodale et la granulométrie est plus grossière. Cela signifie sans doute que les mécanismes de croissance des particules se déroulent plus rapidement (à cause d'un facteur encore inconnu) dans les boisseaux tubés que dans la solution « raccordement + conduit isolé ». Il est possible également que la condensation

d'une partie des COV conduise à deux effets : l'augmentation de la taille des particules existantes et la formation de particules ultrafines.

3.2.3.2. Impact de la hauteur du conduit

Nos mesures ont montré clairement que la hauteur de conduit change de manière très significative le tirage. Ce point induit donc sûrement des modifications des performances des appareils et des émissions résultantes. Nous avons décidé de réaliser un zoom sur ce paramètre en sélectionnant deux essais par génération d'appareil avec des conduits identiques :

- Appareil 2018 : Essai 1 (Isolé, 4 mètres, sans régulateur) en comparaison de l'essai 3 (Isolé, 8 mètres, sans régulateur) ;
- Appareil 2006 : Essai 2 (Isolé, 4 mètres, sans régulateur) en comparaison de l'essai 11 (Isolé, 8 mètres, sans régulateur).

Ce choix est lié au fait que les tendances se répètent pour chaque type de conduit et qu'il est plus facile de visualiser et d'expliquer les phénomènes en ne faisant varier qu'un paramètre.

3.2.3.2.1. Impact sur la qualité de combustion

Le Tableau 20 présente les résultats de l'impact de la hauteur de conduit sur la qualité de la combustion dans les conditions étudiées. Les expériences suivantes sont analysées.

Pour le poêle 2018 :

- Essai 1 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 3 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m

Pour l'insert 2006 :

- Essai 2 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 11 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m

Tableau 20 : Impact de la hauteur de conduit sur les performances des deux appareils. (bas = mesure au niveau du plafond ; haut = évacuation)

Essai N°	Caractéristiques	Rendement [%]	CO [ppm à 13% d'O ₂]	COVT bas [mg _{eq} CH ₄ /N m ³ à 13% d'O ₂]	COVT haut [mg _{eq} CH ₄ /Nm ³ à 13% d'O ₂]	Fumées bas [°C]	Fumées haut [°C]	Tirage [Pa]
1	2018, Isolé, 4 mètres, Sans Régulation	75,4	1912	279	235	238	194	-17,2
3	2018, Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	62,0	3373	636	185	235	185	-33,8
2	2006, Isolé, 4 mètres, Sans régulation	58,3	3342	668	529	242	198	-17,2
11	2006, Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	57,4	3467	603	400	257	191	-35,9

Bien entendu, le tirage est toujours plus élevé avec une colonne de huit mètres qu'avec une colonne de quatre mètres (environ deux fois plus élevé sur les essais observés). Sur les autres paramètres, les conclusions varient selon la génération de l'appareil.

Pour l'appareil de 2018, une grande hauteur de conduit induit une perte significative de rendement. La combustion au sein de l'appareil se déroule de manière beaucoup plus maîtrisée lorsque le conduit ne fait que quatre mètres. En effet, les émissions de CO sont quasiment deux fois plus faibles avec le conduit de quatre mètres, et les émissions de COVT (au point bas) sont plus de deux fois plus faibles. Néanmoins, au point haut, les concentrations en COVT sont plus faibles avec le conduit de huit mètres. Cela provient

sans doute du fait que le temps de séjour des gaz dans le conduit étant plus long (du fait d'une longueur de conduit plus longue), les COVT ont plus de temps pour condenser. Comme attendu, les températures de fumées au point bas sont identiques, et au point haut, celles issues de la colonne de huit mètres sont légèrement moins chaudes, du fait d'un trajet plus long et donc de pertes aux parois du conduit sur une plus grande longueur.

Pour l'appareil de 2006, quelques résultats diffèrent. Tout d'abord, la perte de rendement existe, mais est moins importante. Cette ancienne génération d'appareil semble peu sensible aux variations de tirage (une fois un certain seuil dépassé bien entendu). En effet, les émissions de CO sont équivalentes, et les émissions de COVT sont extrêmement proches. Ces observations doivent cependant être nuancées par le fait que le rendement annoncé n'a pas été atteint, même avec un tirage proche de celui préconisé (-12 Pa). Il est donc probable que le point de fonctionnement « idéal » de l'insert n'a pas été rencontré pendant les essais.

3.2.3.2.2. Impact sur les émissions de particules

3.2.3.2.2.1. Les émissions en masse et la nature chimique des particules

Le Tableau 21 présente les résultats obtenus sur les essais sélectionnés. Les expériences suivantes sont analysées.

Pour le poêle 2018 :

- Essai 1 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 3 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m

Pour l'insert 2006 :

- Essai 2 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 4 m
- Essai 11 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m

Tableau 21 : Impact de la hauteur de conduit sur les émissions de particules des deux appareils. (bas=mesure au niveau du plafond ; haut=évacuation)

Essai N°	Caractéristiques	TSP bas [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	TSP haut [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	OC/EC bas	OC/EC haut	TC/TSP bas	TC/TSP haut
1	2018, Isolé, 4 mètres, Sans Régulation	29	27	9,31	3,74	0,32	0,13
3	2018, Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	28	27	1,48	0,34	0,34	0,86
2	2006, Isolé, 4 mètres, Sans régulation	67	70	2,62	32,87	0,18	0,75
11	2006, Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	61	83	1,91	1,75	0,40	0,22

Malgré l'augmentation de tirage détaillée au paragraphe précédent, la hauteur de conduit ne semble pas affecter les émissions de TSP au point bas quel que soit l'appareil (2006 ou 2018). En revanche, bien que ce paramètre n'influe pas non plus le point haut avec l'appareil de 2018, il semble induire une augmentation des émissions de TSP au point haut pour l'appareil de 2006. Les rapports OC/EC sont aussi toujours beaucoup plus faibles en tout point de prélèvements avec un conduit de 8 mètres, quelle que soit la génération de l'appareil. L'évolution du ratio TC/TSP semble quant à lui évoluer selon d'autres critères.

3.2.3.2.2.2. Les émissions en nombre

Le paragraphe précédent montre que la hauteur de conduit n'impacte pas les émissions de particules en masse, spécialement au point bas. La Figure 26 présente les répartitions granulométriques en nombre au point bas pour les deux essais sélectionnés pour l'appareil de 2018.

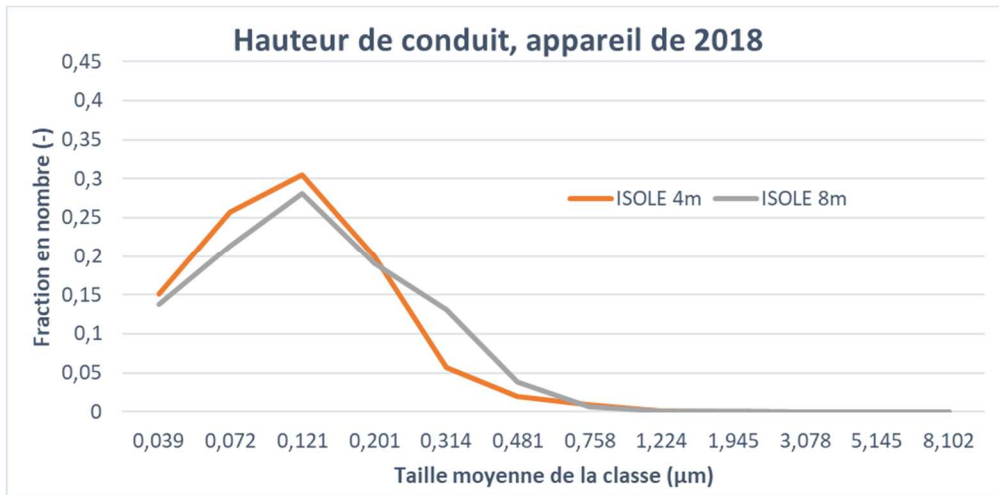


Figure 26 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point bas pour les deux essais sélectionnés pour l'étude de l'impact de la hauteur de conduit (isolé, appareil de 2018).

Les répartitions semblent vraiment très proches, et ne peuvent pas être différenciées. Néanmoins, la granulométrie semble sensiblement plus fine avec le conduit de quatre mètres. La Figure 27 présente les résultats sur les deux essais sélectionnés pour l'appareil de 2006.

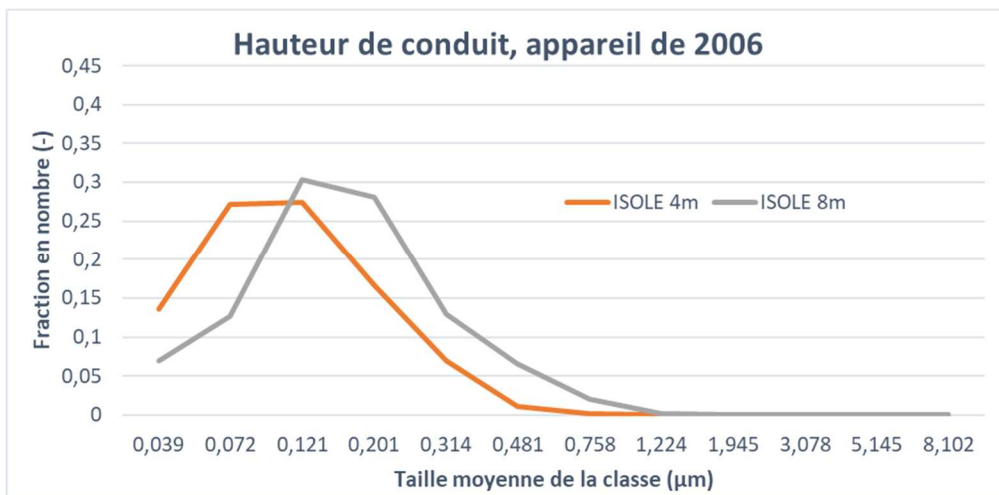


Figure 27 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point bas pour les deux essais sélectionnés pour l'étude de l'impact de la hauteur de conduit (isolé, appareil de 2006).

La répartition granulométrique est significativement plus fine avec la solution de fumisterie de 4 mètres qu'avec celle de 8 mètres, et de manière plus significative qu'avec l'appareil de 2018. Cette variation de granulométrie est sans doute directement liée à la nature des particules émises, qui varie significativement entre les deux solutions, comme montré dans le paragraphe 3.2.3.2.1. Bien entendu, un autre point majeur impactant cette granulométrie est le temps de séjour des gaz dans le conduit, qui est nécessairement plus élevé dans une colonne de huit mètres que dans quatre mètres. Ainsi, les mécanismes de croissance et de condensation ont plus de temps pour se dérouler, induisant une granulométrie globalement moins fine.

3.2.3.3. Impact du régulateur de tirage

La simple lecture des résultats présentés auparavant montre clairement une influence du régulateur de tirage sur la combustion. Il est également fort probable que l'injection d'air frais dans la chambre de combustion, liée à la configuration de cet appareil, modifie la physico-chimie des particules dans les fumées, puisqu'elles sont diluées et très fortement refroidies. Pour étudier le rôle du régulateur de tirage, différents essais pour une longueur de conduit fixe de huit mètres vont être comparés :

- Pour l'appareil de 2018 :
 - o Comparaison de l'essai 3 (isolé, 8 mètres, sans régulateur) avec l'essai 4 (isolé, 8 mètres, avec régulateur) ;
 - o Comparaison de l'essai 8 (Concentrique, 8 mètres, sans régulateur) avec l'essai 9 (Concentrique, 8 mètres, avec régulateur).
- Pour l'appareil de 2006 : Comparaison de l'essai 11 (isolé, 8 mètres, sans régulateur) avec l'essai 12 (isolé, 8 mètres, avec régulateur).

3.2.3.3.1. Impact sur la qualité de combustion

Le Tableau 22 présente les résultats des essais sélectionnés pour l'appareil de 2018. Les expériences suivantes sont analysées.

- Essai 3 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m
- Essai 4 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur
- Essai 8 : Conduit concentrique triple paroi 8 m
- Essai 9 : Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur

Tableau 22 : Impact du régulateur de tirage sur les performances de l'appareil de 2018.

Essai N°	Caractéristiques	Rendement [%]	CO [ppm à 13% d'O ₂]	COVT bas [mg _{eqCH₄} /Nm ³ à 13% d'O ₂]	COVT haut [mg _{eqCH₄} /Nm ³ à 13% d'O ₂]	Fumées bas [°C]	Fumées haut [°C]	Tirage [Pa]
3	Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	62,0	3373	636	185	235	185	-33,8
4	Isolé, 8 mètres, Avec Régulation	58,7	1944	280	211	138	129	-21,5
8	Conduit concentrique, 8 mètres, Sans régulation	60,8	3025	560	180	340	241	-19,0
9	Conduit concentrique, 8 mètres, Avec Régulation	59,8	2244	329	240	181	154	-10,7

Le régulateur de tirage fonctionne sur les deux solutions de fumisterie testées avec l'appareil de 2018 en réduisant le tirage de manière très significative. Néanmoins, comme nous avons pu le voir précédemment, ce régulateur de tirage induit aussi une petite perte de rendement de l'installation de chauffage (mesuré au niveau du plafond). Cela est principalement dû au fait que la température des fumées au point bas, qui est donc dans la pièce, est plus élevée sans régulateur. Cela induit une diminution des échanges entre « parois de conduit → pièce » et ainsi fait perdre quelques points de rendement. Ce constat est confirmé par l'analyse du rendement mesuré à la buse de ces expériences, qui montre par exemple une amélioration de treize points entre l'expérience 3 « sans régulation » et 4 « avec régulation », démontrant ainsi que les gains de rendement mesurés au niveau du plafond et apportés par la solution « sans régulation » sont effectués au-dessus de l'appareil (voir 3.2.1.2).

Les émissions de CO sont, quant à elles, au minimum 25 % plus faibles avec le régulateur de tirage. Ce point, conforté par le fait que le même phénomène est visible sur les émissions de COVT au point bas (au

minimum 41 % plus faibles), démontre que la présence du régulateur, et donc d'une meilleure stabilité du tirage, améliore la qualité de la combustion.

En revanche, la concentration en COV dans les fumées décroît plus fortement sans régulateur pour atteindre des niveaux plus faibles qu'avec régulateur au point haut. Différentes interprétations sont possibles : soit la condensation des COV est plus liée au gradient de température (beaucoup plus élevé sans régulateur) qu'au niveau de température dans le conduit ; soit que le temps de séjour dans le conduit est un point clé pour la condensation des COVT.

Le Tableau 23 présente les résultats obtenus sur les deux essais sélectionnés pour l'appareil de 2006. Les expériences suivantes sont analysées.

- Essai 11 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m
- Essai 12 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur

Tableau 23 : Impact du régulateur de tirage sur les performances de l'appareil de 2006.

Essai N°	Caractéristiques	Rendement [%]	CO [ppm à 13% d'O ₂]	COVT bas [mg _{eq} CH ₄ /Nm ³ à 13% d'O ₂]	COVT haut [mg _{eq} CH ₄ /Nm ³ à 13% d'O ₂]	Fumées bas [°C]	Fumées haut [°C]	Tirage [Pa]
11	Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	57,4	3467	603	399	257	191	-35,9
12	Isolé, 8 mètres, Avec Régulation	55,2	3259	594	481	107	90	-16,9

Comme constaté précédemment avec l'appareil de 2018, la présence du régulateur permet une diminution forte du tirage moyen et induit une diminution de quelques points de rendement. Ce dernier élément est cohérent avec l'explication donnée précédemment, étant donné que l'hypothèse prise serait aussi vérifiable sur l'appareil de 2006 (température des fumées plus faibles au point bas, donc diminution des échanges « parois du conduit → pièce »).

Les émissions de CO sont aussi plus faibles avec le régulateur, mais plus légèrement. Cela signifie que le régulateur permet d'optimiser la combustion dans des appareils qui présentent la capacité de conduire une combustion maîtrisée, mais moins pour un appareil plus rustique. Ce point est confirmé par les émissions de COVT au point bas qui semblent aussi légèrement plus faibles lorsque le régulateur est installé.

Concernant l'évolution des émissions de COVT entre le point bas et le point haut, le même phénomène que sur l'appareil de 2018 est observé : une plus grande proportion des COVT disparaissent, soit par condensation, soit par dégradation lorsque le conduit n'est pas équipé de régulateur. Ce résultat semble, une fois de plus, corrélé au gradient de température.

3.2.3.3.2. Impact sur les émissions de particules

3.2.3.3.2.1. Les émissions en masse et la nature chimique des particules

Le Tableau 24 présente les résultats des émissions de particules en masse et de leur teneur en OC/EC de l'appareil de 2018 avec ou sans régulateur de tirage. Les expériences suivantes sont analysées.

- Essai 3 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m
- Essai 4 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur
- Essai 8 : Conduit concentrique triple paroi 8 m
- Essai 9 : Conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur

Aucune tendance ne se dégage concernant les émissions de TSP en fonction de la présence d'un régulateur. En effet, une croissance de la concentration en TSP au point bas est très claire entre les essais 3 et 4, alors qu'une sensible diminution est observée entre les essais 8 et 9.

En revanche, le rapport OC/EC semble suivre une tendance stable : ce rapport au point bas diminue au moins d'un facteur deux si un régulateur est installé. Ce point confirme l'optimisation de la combustion

qu'apporte le régulateur de tirage, déjà observée pour les COV. Ce rapport est extrêmement réduit entre le point bas et le point haut sans régulateur, alors qu'il semble quasi stable lorsque le régulateur est installé.

Le rapport TC/TSP semble assez stable au point bas, mise à part dans le cas de la solution avec le conduit isolé sans régulateur, pour lequel il semble être plus élevé. Ce point est surprenant, et nous n'avons pas d'hypothèse permettant de l'expliquer. Il en va de même pour l'évolution de ce facteur qui est très variable. Le régulateur ne semble pas jouer de rôle clé ni sur le rapport TC/TSP à la source (point bas) ni sur son évolution dans le conduit.

Tableau 24 : Impact du régulateur de tirage sur les émissions de particules de l'appareil de 2018.

Essai N°	Caractéristiques	TSP bas [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	TSP haut [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	OC/EC bas	OC/EC haut	TC/TSP bas	TC/TSP haut
3	Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	28	27	1,48	0,34	0,34	0,86
4	Isolé, 8 mètres, Avec Régulation	99	96	0,56	0,61	0,17	0,04
8	Concentrique, 8 mètres, Sans régulation	33	50	12,34	5,03	0,19	0,10
9	Concentrique, 8 mètres, Avec Régulation	26	19	6,33	8,34	0,16	0,48

Le Tableau 25 présente les résultats des émissions de particules en masse et de leur teneur en OC/EC avec et sans régulation de tirage obtenus avec l'appareil de 2006. Les expériences suivantes sont analysées.

- Essai 11 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m
- Essai 12 : Raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur

Tableau 25 : Impact du régulateur de tirage sur les émissions de particules de l'appareil de 2006.

Essai N°	Caractéristiques	TSP bas [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	TSP haut [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	OC/EC bas	OC/EC haut	TC/TSP bas	TC/TSP haut
11	Isolé, 8 mètres, Sans Régulation	61	83	1,90	1,75	0,45	0,22
12	Isolé, 8 mètres, Avec Régulation	54	73	5,57	1,49	0,58	0,18

Comme avec l'appareil de 2018, il est particulièrement difficile de déduire un rôle précis du régulateur sur la nature des émissions particulaires.

3.2.3.3.2. Les émissions de particules en nombre

Les distributions granulométriques de particules en nombre pour l'appareil de 2018 au point bas sont présentées dans la Figure 28.

Sur cette Figure 28, il semble que la présence d'un régulateur induise une granulométrie plus fine des particules émises. De plus, la distribution granulométrique est quasi semblable entre l'essai 3 (raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m) et l'essai 8 (conduit concentrique triple paroi 8 m sans régulateur), et tous deux subissent le même type d'évolution lors de l'introduction d'un régulateur (essai 4 raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur et essai 9 conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur).

La Figure 29 permet de vérifier si la présence d'un régulateur modifie aussi au point haut les distributions granulométriques des particules.

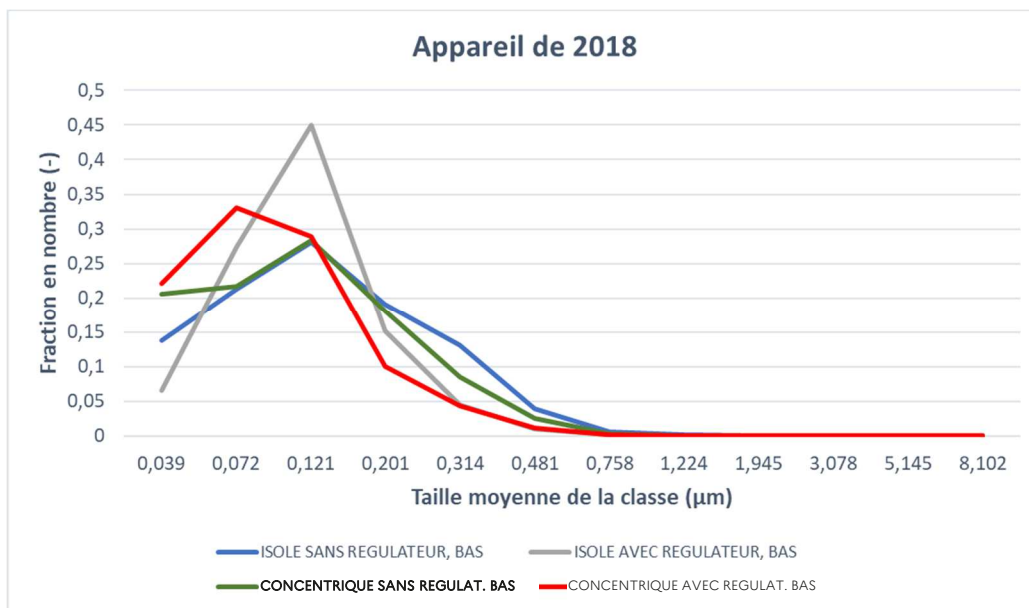


Figure 28 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observer l'impact du régulateur de tirage avec l'appareil de 2018.

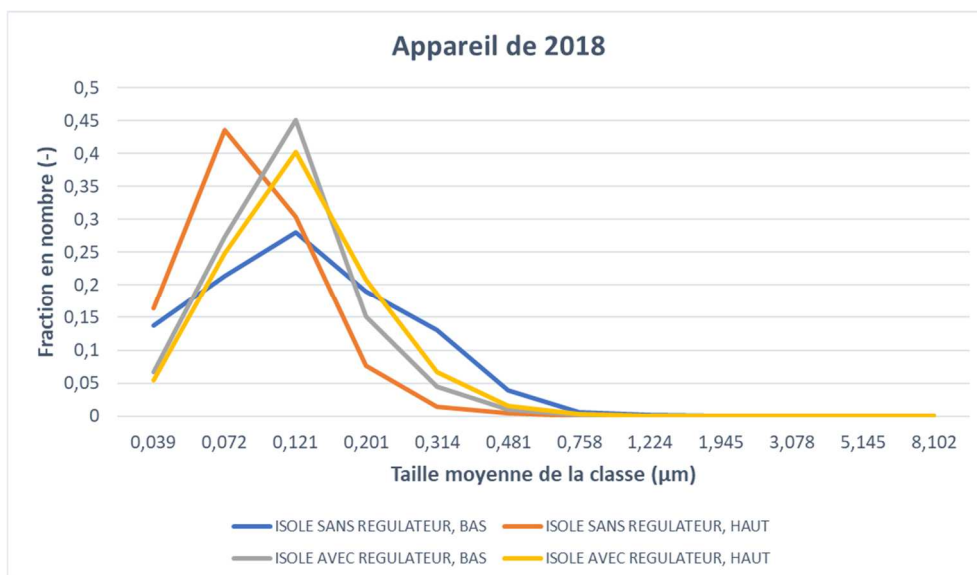


Figure 29 : Distribution granulométrique en nombre des particules aux deux points de prélèvements sur les essais sélectionnés pour observer l'impact du régulateur de tirage sur l'appareil de 2018.

Le régulateur de tirage semble finalement stabiliser directement la granulométrie des particules, d'où la très faible évolution de la répartition entre la courbe 4 (raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m avec régulateur) bas, avant le plafond et 4 haut (avant l'évacuation).

Pour l'essai 3 (raccordement simple paroi + conduit isolé 8 m), l'évolution est beaucoup plus importante, et le point 3 haut est très proche de la série 4, en légèrement plus fin. Cela signifierait que les étapes de nucléation sont déjà bien avancées, mais que les étapes d'accumulation/agrégation/agglomération ne font que commencer dans la série 3 haut.

La Figure 30 présente les résultats de distribution granulométrique pour l'appareil de 2006 dans des configurations similaires.

La granulométrie semble légèrement plus fine avec le régulateur au point bas, mais cette évolution est tout de même relativement discrète par rapport à celles observées sur l'appareil de 2018. Tous les éléments observés du point de vue de l'impact du régulateur de tirage semblent donc réduits lors de son utilisation sur un appareil ancien.

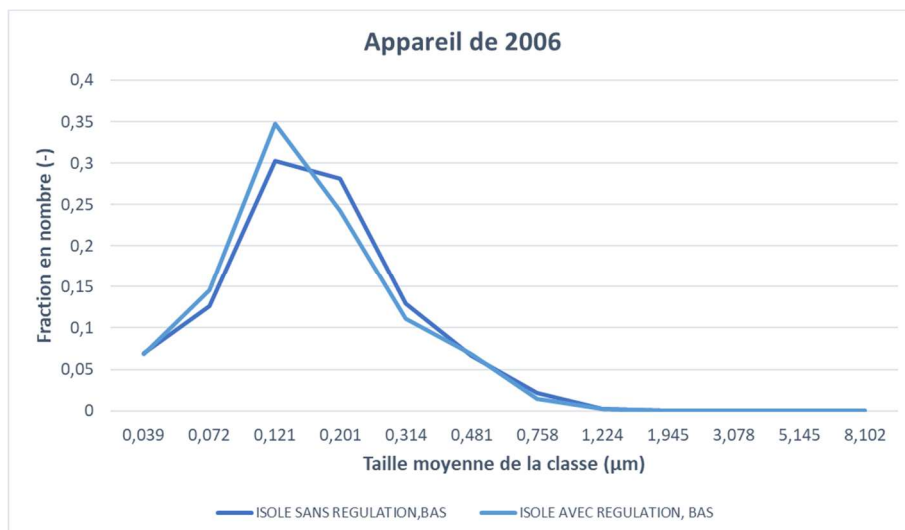


Figure 30 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observer l'impact du régulateur de tirage sur l'appareil de 2006.

3.2.3.4. Impact de la hauteur de prélèvement sur les caractéristiques des particules

Dans cette partie, nous allons observer plus finement les différences physico-chimiques des particules entre le point bas et le point haut de prélèvement. Afin d'accentuer les écarts et de mieux visualiser les phénomènes, nous avons choisi de réaliser un focus sur un conduit de huit mètres. Comme dans les parties précédentes, une grande majorité des phénomènes ont déjà été décrits sur le conduit isolé, et comme aucun essai avec huit mètres de boisseaux tubés n'a été réalisé, nous avons choisis de réaliser ce focus sur une colonne de huit mètres de conduits concentrique triple paroi. Ainsi, l'essai 8 sera notre essai de référence pour décrire l'évolution des particules dans le conduit concentrique triple paroi.

Le Tableau 26 présente les résultats (sauf l'évolution de la granulométrie) pour l'expérience 8 (Conduit concentrique triple paroi 8 m).

Tableau 26 : Evolution des concentrations en masse des TSP, de la nature chimique des particules et des concentrations en COVT entre le point bas et le point haut de mesure sur l'essai 8 (Concentrique, 8 mètres, sans régulation, appareil de 2018).

Essai N°	Caractéristiques	TSP [mg/Nm ³ à 13% d'O ₂]	COVT [mg _{EqCH4} /Nm ³ à 13% d'O ₂]	CH ₄ /COVT	OC/EC	TC/TSP
8 BAS (plafond)	Concentrique triple paroi, 8 m, Sans Régulation	33	560	0,29	12,34	0,19
8 HAUT (évacuation)		50	180	0,41	5,03	0,10

Dans le cas du conduit Concentrique, la concentration en TSP dans les fumées augmente entre le point bas et le point haut. Attention, ce point n'est vrai que pour cet essai, et c'est dû à la prédominance dans ce cas des phénomènes de condensation par rapport aux phénomènes de dépôts. Néanmoins, l'étude de ce cas permet de mettre en évidence de nombreux phénomènes. Tout d'abord, la concentration en COVT chute drastiquement entre le point bas et le point haut, montrant donc soit une condensation efficace de ces polluants, soit une élimination de ces derniers. La nature même des COVT n'est pas identique entre le point bas et le point haut. En effet, le rapport CH₄/COVT est plus élevé en haut, montrant très certainement la condensation des COVT les plus lourds.

Concernant la composition des particules, le rapport OC/EC est significativement réduit entre le point bas et le point haut (par un facteur supérieur à deux). Ceci pourrait résulter du dépôt des COVT les plus lourds sur les parois du conduit. Cette hypothèse est confortée avec le rapport TC/TSP qui est divisé par deux entre le point bas et le point haut, confirmant un dépôt des matières carbonées.

La Figure 31 présente les résultats sur l'évolution de la distribution granulométriques des particules entre les deux points de prélèvements pour l'essai 8.

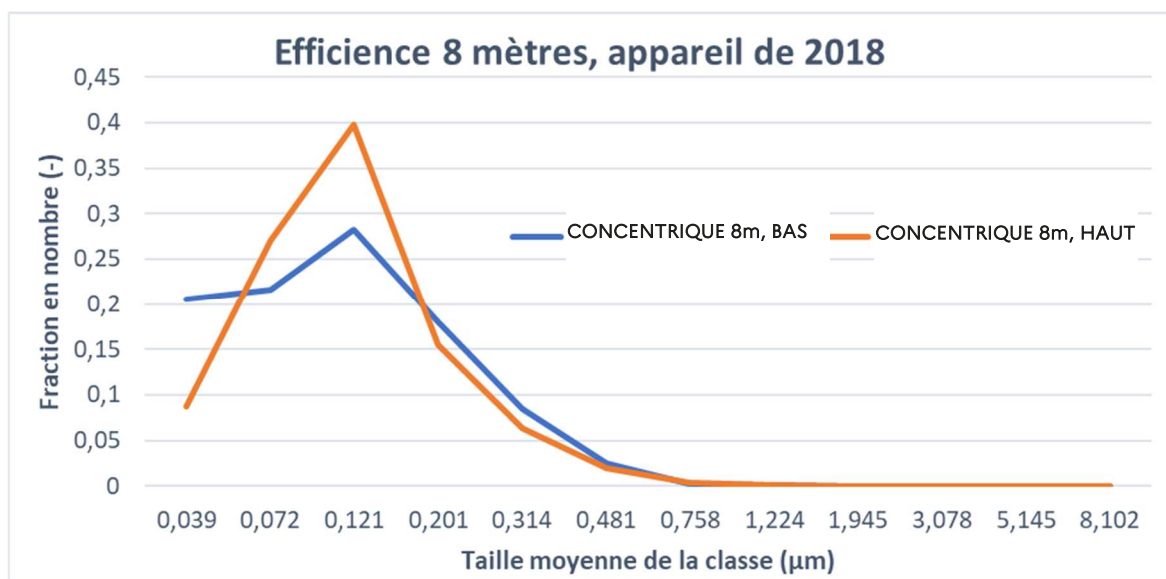


Figure 31 : Evolution de la répartition granulométrique entre le point bas et le point haut de prélèvement lors de l'essai 8 (Concentrique, 8 mètres, sans régulation, appareil de 2018).

La fraction la plus fine diminue en proportion entre le bas et le haut, au profit des trois fractions suivantes, bien plus élevées en proportion en haut qu'en bas. Cela montre plusieurs phénomènes : l'agglomération/accumulation/agrégation des nanoparticules et la condensation hétérogène des COVT. A partir de la fraction granulométrique centrée à un diamètre de 0,314 µm, la répartition semble rester stable. Ainsi, il est sans doute possible de déterminer des lois d'évolutions à partir de ces résultats.

Eléments à retenir :

- Le conduit concentrique étudié permet d'optimiser la qualité de la combustion mais induit une perte de rendement de l'installation par rapport à la configuration « raccordement simple paroi + conduit isolé ». Ceci s'explique par la faible température du conduit dans la pièce qui ne permet pas de récupérer beaucoup d'énergie. De plus, ce conduit induit une augmentation des émissions de particules, certainement à cause de la vitesse d'entrée plus importante de l'air comburant qui provoque des envols. Un travail sur l'optimisation des échanges en partie basse de ce conduit devrait permettre de réduire les émissions de TSP et de gagner en efficacité énergétique.
- Une grande colonne de conduits d'évacuation des fumées augmente le tirage, abaissant ainsi le temps de séjour au sein de l'appareil et induisant donc une combustion moins bien maîtrisée. Cela se traduit par une perte de rendement et une augmentation des émissions de CO et de COVT, mais aussi par l'augmentation de la teneur en carbone organique (OC) des particules.
- Le régulateur de tirage permet d'optimiser la combustion des appareils performants en maintenant un tirage plus constant. Cela permet de réduire les émissions de CO, de COVT et le ratio OC/EC des particules. En revanche, le régulateur limite, voire annule, le gain potentiel de rendement du conduit de raccordement à cause de la diminution de la température de paroi du conduit qui réduit les échanges. Son installation au-dessus du plafond permettrait de récupérer cette perte de rendement tout en conservant les avantages du système.
- La condensation des COVT semble plus liée au gradient de température dans le conduit qu'au niveau de température lui-même.
- La granulométrie des particules au point bas est plus fine qu'au point haut. Cela montre bien que les mécanismes de croissance se déroulent dans le conduit. Plus la colonne est grande, plus l'écart granulométrique entre le point bas et le point haut est important.

3.3. Recherche de corrélations entre les paramètres étudiés

L'ensemble des essais réalisés et des mesures effectuées permet d'obtenir une importante base de données avec de multiples paramètres variables. L'objectif dans cette partie du travail consiste à rechercher d'éventuelles corrélations entre différents paramètres et/ou de mettre en évidence certains mécanismes qui pourraient ensuite permettre de définir des conditions opératoires à rechercher.

3.3.1. Lien entre les émissions d'imbrûlés

Les émissions de CO et de COVT proviennent *a priori* du même phénomène : une combustion incomplète des gaz de pyrolyse. Si tel est le cas, les émissions de ces deux polluants devraient évoluer de façon équivalente pour l'intégralité des essais : en effet, la fumisterie peut influencer sur la qualité de la combustion, ce qui modifiera les émissions de CO et de COVT sans aucune distinction. Nous avons donc choisi d'observer l'évolution simultanée de ces deux polluants. Pour les COVT, la valeur considérée pour cette corrélation est celle issue de la mesure basse. En effet, cette valeur représente mieux la qualité de combustion que celle en position haute, qui contient plus d'informations sur l'évolution de la nature des fumées, les niveaux de températures, etc., paramètres n'ayant pas de relation directe avec la qualité de la combustion. La Figure 32 présente la courbe obtenue à puissance nominale.

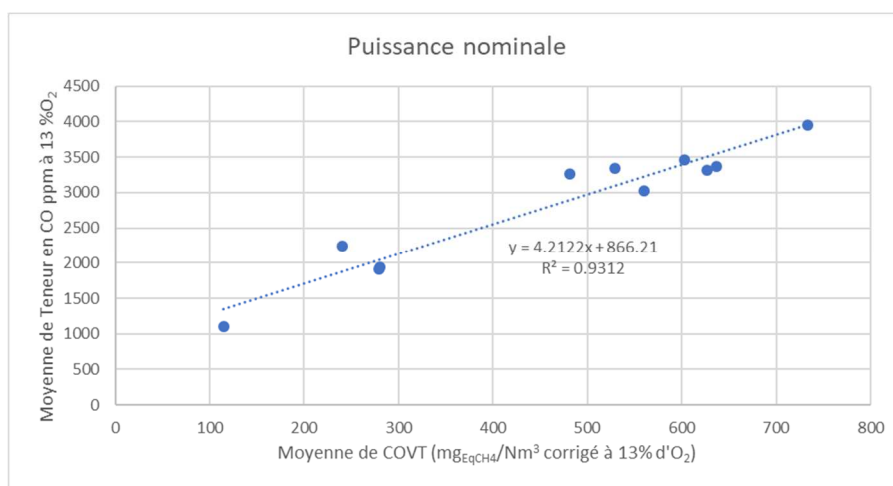


Figure 32 : Corrélation entre les émissions de CO et de COVT au point bas à puissance nominale pour l'intégralité des essais réalisés.

Cette très bonne corrélation montre bien l'origine commune de ces deux polluants, mais aussi leur relation universelle. En effet, cette courbe reprend l'intégralité des mesures réalisées dans ce projet, et donc différents appareils et différents conduits. Pour autant, la corrélation reste très bonne. De plus, comme le montre la Figure 33 obtenue à puissance réduite, cette relation reste solide même si la charge de l'appareil évolue.

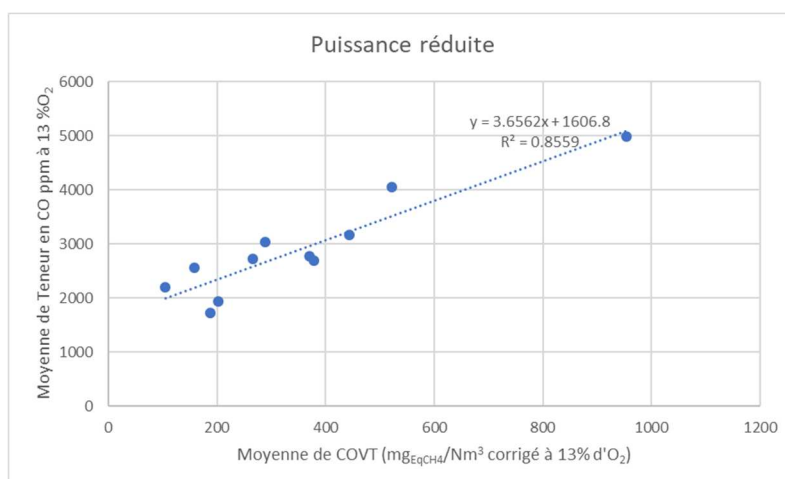


Figure 33 : Corrélation entre les émissions de CO et de COVT au point bas à puissance réduite pour l'intégralité des essais réalisés.

Les émissions de CO et de COVT ne sont pas les seules issues d'une combustion incomplète des gaz de pyrolyse. A priori, les émissions de Carbone Organique sont également liées à ce phénomène. Néanmoins, nous ne pouvons tracer cette courbe sur l'ensemble des points puisque comme l'a déjà montré Brandelet et al. en 2017 [8], les émissions de OC sont directement liées à la technologie de l'appareil. Nous avons donc choisi les points issus de l'appareil de 2018, qu'importe la hauteur de conduit mais toujours sans régulateur. Nous avons alors observé l'évolution des concentrations en COVT et le rapport OC/EC au point bas. Les résultats sont présentés dans la Figure 34.

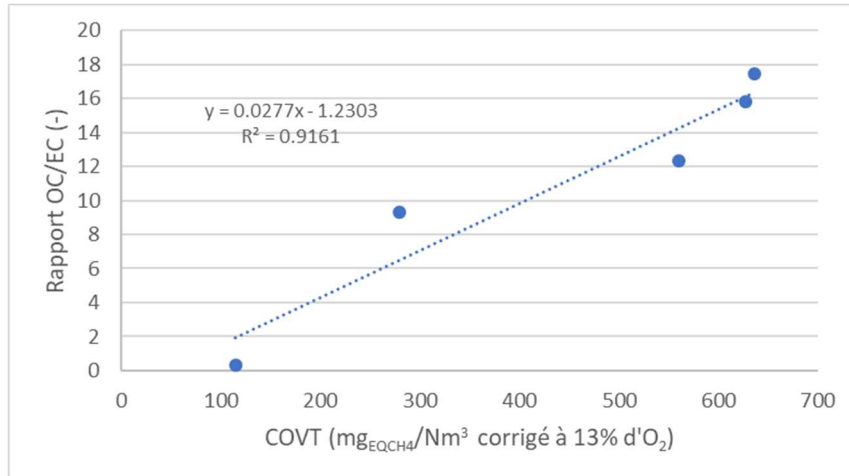


Figure 34 : Corrélation entre le rapport OC/EC au point bas et la concentration en COVT au point bas sur les essais sans régulateurs sur l'appareil de 2018.

La corrélation semble également très forte aussi avec ce nouveau paramètre. Elle indique que la qualité de la combustion influe directement sur la nature chimique des particules émises et donc sur leur toxicité. Une vérification serait intéressante à réaliser avec l'autre appareil, mais trop peu de points sont disponibles pour permettre de réaliser une corrélation robuste (seulement trois points).

3.3.2. Corrélation autour de l'évolution des COVT

Comme vu précédemment, la concentration en COV est toujours plus faible au point haut qu'au point bas. Cela signifie que le mécanisme de condensation hétérogène se déroule dans le conduit, ainsi que le mécanisme de nucléation si la concentration en COVT est suffisante. Ces COVT condensés sont alors déposés sur les particules et, au point haut, ils sont comptabilisés dans la mesure de TSP. Ainsi, le premier élément que l'on peut imaginer est la concordance entre l'écart de mesure TSP bas / TSP haut (delta TSP) avec l'écart COVT bas / COVT haut (delta COVT), présenté Figure 35.

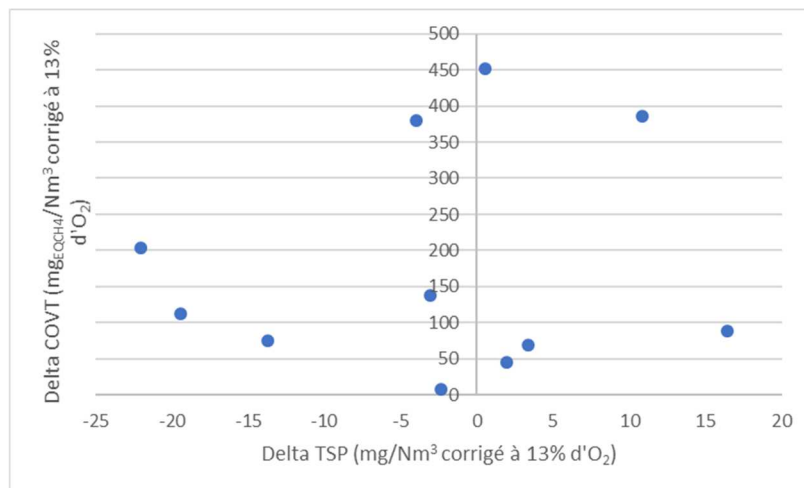


Figure 35 : Evolution du delta des COVT en fonction du delta de TSP à puissance nominale.

Aucun lien évident ne semble se dégager entre delta COVT et delta TSP. Cela peut s'expliquer en considérant que les mécanismes de dépôt/envols des particules doivent sans doute amener un « bruit » considérable.

Cependant, l'analyse des résultats réalisée dans la partie précédente a montré que la condensation des COVT semblait parfois plus liée au gradient de température qu'au niveau même de ces températures. Ainsi, nous avons sélectionné des points sur l'appareil de 2018 avec des solutions de fumisteries ne comprenant pas de régulateur (celui-ci perturbant la dynamique classique d'évolution). Nous avons, sur ces points, observé la relation entre la variation de COVT divisé par le tirage (pour illustrer un temps de séjour) et le gradient de température par mètre de conduit calculé avec la formule suivante :

$$\text{Gradient de température par mètre de conduit} = \frac{(T_{\text{température basse}} - T_{\text{température haute}})}{\text{Hauteur de conduit}}$$

Équation 5 : Calcul du gradient de température par mètre de conduit.

La Figure 36 présente le résultat obtenu.

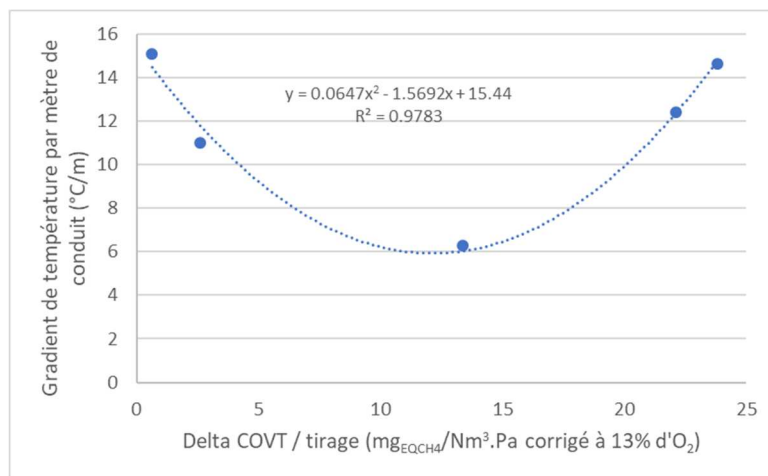


Figure 36 : Corrélation entre le delta de COVT divisé par le tirage et le gradient de température par mètre de conduit.

La corrélation semble très forte, mais sous une forme non linéaire. La limite évidente de cette figure est son petit nombre de point (cinq), même si cela est à relativiser en tenant compte de la robustesse des points (chaque point correspond à la moyenne de trois essais). Cette courbe semble montrer qu'il existe un lien entre le gradient de température par mètre et le delta de COVT divisé par le tirage, mais surtout qu'un autre paramètre joue sur la condensation des COVT, puisque cette relation montre que pour un gradient de température par mètre donné, deux réponses sont possibles : l'une où la condensation des COVT est forte, l'autre où elle est faible.

Un élément qui permettrait potentiellement d'apporter une explication est la capacité des COVT à condenser. En effet, si ces COVT sont majoritairement composés par des composés très volatils, (VVOC - Very-Volatile Organic Compound), alors leur capacité à condenser est plus faible que celles des COV plus lourds (puisque leur température de volatilisation est beaucoup plus basse, < 100°C). Nos mesures permettent d'évaluer (de manière grossière) le taux de VVOC dans les COVT puisque nous mesurons séparément les émissions de CH₄ (qui est un VVOC). Ainsi, le rapport CH₄/COVT peut être un indicateur de la présence plus ou moins importante de VVOC au sein de l'ensemble des COV. La Figure 37 présente l'évolution du delta de COVT en fonction du delta du rapport CH₄/COVT multiplié par le gradient de température par mètre.

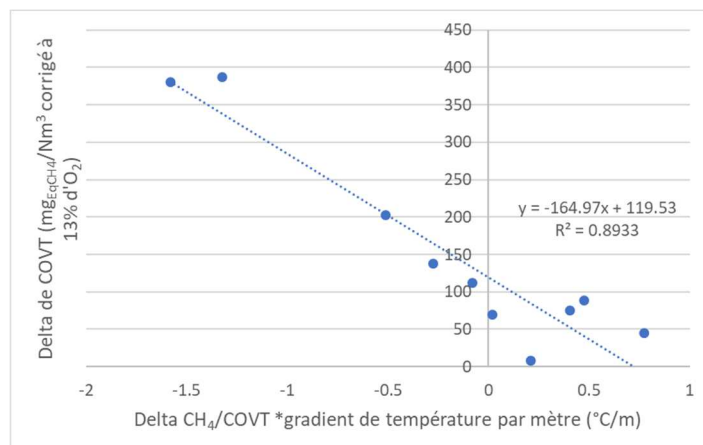


Figure 37 : Evolution du delta de COVT en fonction du delta du rapport CH₄/COVT multiplié par le gradient de température par mètre.

Tous les paramètres entrant en jeu dans la condensation hétérogène des COVT dans le conduit de fumées semblent avoir été identifiés. En effet, l'indice de corrélation est particulièrement élevé ($r^2 = 0,9$) et un sens logique rapide peut être donné à cette droite : la condensation hétérogène des COVT dépend du gradient de température (°C/m) dans le conduit, mais aussi de la teneur en VVOC. Une manière d'optimiser encore cette courbe serait de parvenir à identifier et mesurer séparément l'intégralité des VVOC pour observer leur évolution (à la place des CH₄ à l'heure actuelle).

De nombreuses publications mettent en évidence un mode dans la répartition granulométrique correspondant à la condensation des COVT aux alentours de 100 nm [9]. Pour pouvoir en vérifier la présence avec nos jeux de données, nous avons décidé d'observer l'évolution de la granulométrie des particules, en fonction du delta de COVT divisé par le gradient de température par mètre de conduit (cette valeur correspond à la tentative de corrélation précédente, n'expliquant pas l'intégralité du phénomène). Pour avoir une valeur de l'évolution de la granulométrie, nous avons choisi de considérer la somme des variations entre le point haut et le point bas des fractions granulométriques suivantes : diamètre moyen de 0,039 ; 0,072 ; 0,121 et 0,201 μm . Le choix de ces quatre fractions granulométriques est lié à la bibliographie et au mode observé pour les COVT. La Figure 38 présente le résultat obtenu.

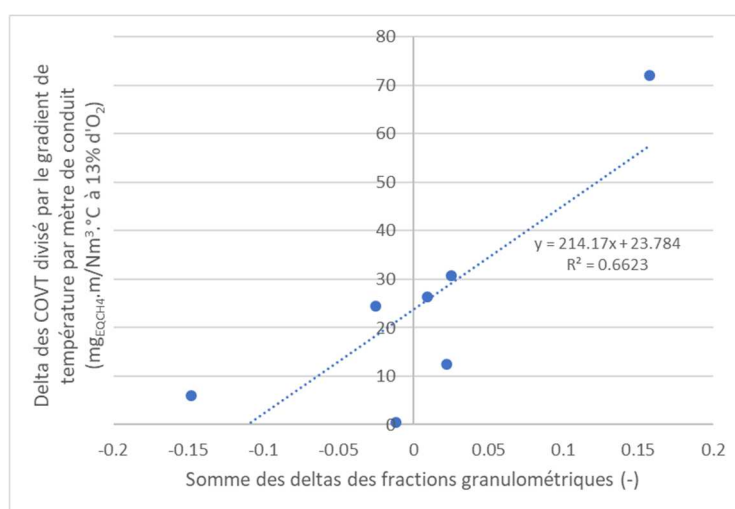


Figure 38 : Evolution des deltas de COVT divisés par le gradient de température par mètre de conduit en fonction de la somme des deltas des quatre fractions granulométriques les plus fines sur les essais sans régulateur.

La corrélation semble correcte, sachant que d'autres phénomènes que la condensation des COVT peuvent interférer (agglomération des particules, etc...). Cela prouve l'importance du lien, et ainsi que le mode constaté dans la littérature est aussi bien présent dans notre cas.

3.3.3. Corrélation autour des dépôts

3.3.3.1. Calcul des dépôts

Les dépôts concernés ici se trouvent le long du conduit de cheminée entre un point bas et un point haut. Pour estimer les dépôts, nous pouvons écrire une équation de bilan massique qui permet d'estimer les émissions de TSP au point haut. L'Équation 6 ci-dessous présente ce calcul :

$$\text{TSP Haut} = \text{TSP bas} + \text{COVT condensés} - \text{Dépôts totaux}$$

Équation 6 : Bilan massique.

Cette équation de bilan peut alors être utilisée pour obtenir la masse de dépôts en utilisant les mesures effectuées en chaque point. Nous obtenons alors l'Équation 7.

$$\text{Dépôts totaux} = (\text{TSP bas} - \text{TSP haut}) - \text{COVT condensés}$$

Soit :

$$\text{Dépôts} = \Delta \text{TSP} - \text{COVT condensés}$$

Équation 7 : Détermination des quantités de dépôts.

En couplant ce calcul avec celui du débit de fumées (issu de l'équation de combustion), nous pouvons estimer la vitesse des fumées dans le conduit. Si nous combinons ces données, avec la hauteur de conduit, nous obtenons alors un débit de dépôts exprimé en mg/s. L'Équation 8 présente ce calcul :

$$\text{Dépôts (mg/s)} = \text{dépôt totaux (mg)} * \frac{\text{Débit de fumées (Nm}^3\text{/s)}}{\frac{\text{Section de passage (m}^2\text{)}}{\text{hauteur de conduit (m)}}}$$

Équation 8 : Calcul du débit de dépôts en mg/s.

3.3.3.2. Corrélation

L'objectif de ce calcul est de rechercher d'éventuelles corrélations entre ce débit de dépôts et les conditions opératoires dans le conduit de cheminée. Parmi les paramètres qui influent sur le débit de dépôt, il y a certainement le gradient de température par mètre de conduit : en effet, puisque les COVT qui condensent selon ce critère peuvent condenser directement sur les parois du conduit, ils peuvent être directement considérés comme des dépôts. De plus, s'il y a un gradient de température élevé par mètre, cela signifie que les vitesses des fumées diminuent, ce qui doit obligatoirement faciliter les dépôts. Ensuite, la qualité de la combustion impactant la nature des émissions, nous avons vu préalablement qu'une mauvaise qualité de combustion induit des émissions plus riches en OC, et donc sans doute des particules plus propices à se « coller » aux parois de conduit.

Nous avons donc choisi d'observer les dépôts en fonction du gradient de température multiplié par la teneur en CO (principal marqueur de la qualité de la combustion). La Figure 39 présente le résultat sur l'intégralité des essais.

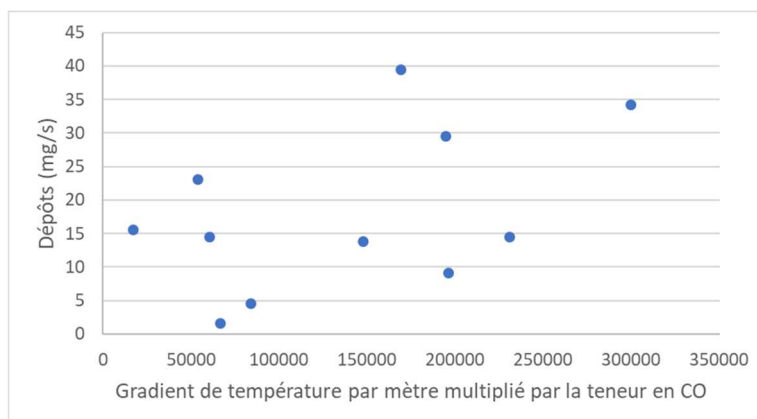


Figure 39 : Dépôts sur les parois du conduit en fonction du gradient de température multiplié par la teneur en CO des fumées pour tous les essais.

Si la tendance générale est à l'accroissement, les valeurs sont très éloignées et ne permettent pas de conclure à une corrélation simple. Néanmoins, si nous choisissons d'observer ces mêmes paramètres sans prendre en compte les essais où le régulateur de tirage est présent, nous obtenons la Figure 40.

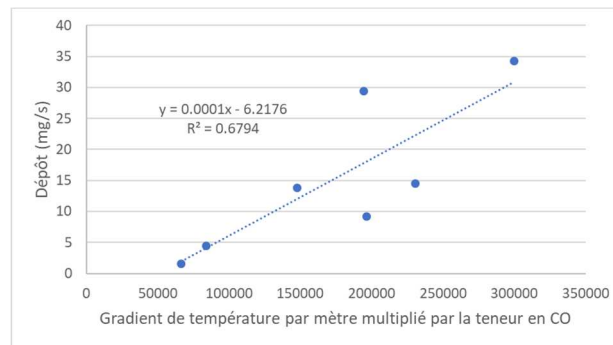


Figure 40 : Dépôts sur les parois du conduit en fonction du gradient de température multiplié par la teneur en CO des fumées pour tous les essais sans régulateur.

La tendance semble cette fois beaucoup plus forte. Le fait particulièrement étonnant est que, sur cette courbe, figurent des essais avec différents appareils et différents conduits. Cela signifie que les mécanismes de dépôts sont liés à environ 70 % ($r^2=0,7$) au gradient de température et à la qualité de combustion, et que les 30 % restants représentent sans doute les spécificités de chaque conduit, et tous les autres paramètres pouvant influencer.

Ainsi, pour augmenter ou réduire ces mécanismes de dépôts, il faudrait privilégier (i) l'optimisation de la combustion et (ii) un travail sur les températures de fumées plutôt que sur la surface des conduits.

Il est à noter que ce point s'applique avec les types de conduit testés dans ce projet. Les résultats sur des conduits ayant des surfaces extrêmement spécifiques pourraient être différents.

3.4. Conclusion de l'étude de l'impact des conduits sur la combustion et perspectives

Au cours de cette tâche, de nombreux essais ont été réalisés dans des configurations d'installations (appareils + conduits) variées. Les mesures effectuées ont permis d'obtenir une base de données importante.

Cet ensemble de résultats montre l'influence de différents paramètres :

- L'augmentation de la longueur de conduit de quatre à huit mètres augmente le tirage de manière significative et défavorable, et s'accompagne d'une diminution du rendement à la buse des appareils comprise entre cinq et treize points. Cette perte de rendement est due à la dégradation de la qualité de la combustion par une grande colonne, qui induit une augmentation des émissions de CO, de COVT et augmentent donc les émissions d'OC.
- Le régulateur de tirage permet d'optimiser la combustion des appareils performants en réduisant les émissions de CO, de COVT et le ratio OC/EC. En revanche, le régulateur induit aussi une perte de un à deux points de rendement de l'installation à cause de la diminution de la température de paroi de la partie du conduit présent dans la pièce.
- Le conduit concentrique isolé, en préchauffant légèrement l'air comburant, a un impact positif significatif sur la qualité de combustion. Cette solution permet d'obtenir des niveaux de CO réduits de 40 à 67 % et de COVT réduits de 60 à 80 % comparés aux autres conduits étudiés. Cependant, les échanges thermiques du conduit avec la pièce étant limités, ce conduit n'optimise pas le potentiel de récupération d'énergie dans la fumée émise. De plus, cette haute température des gaz comburants (air) induit une probable augmentation de la vitesse d'injection et donc une augmentation des envolées de cendres.
- La solution « raccordement simple paroi + boisseau tubé » permet un bon échange thermique avec la pièce, donc un rendement global de l'installation intéressant. Cependant, cette solution est moins la moins performante des solutions testées concernant les émissions polluantes de CO

et de COVT. Il faut aussi tenir compte des risques de condensation favorisés par ce type d'installation et du fait que le tirage peut aussi être dégradé (dimensionnement selon l'EN 13384-1).

- La solution « raccordement simple paroi + conduit isolé » permet un bon échange thermique avec la pièce, donc un rendement global de l'installation optimal (mesuré à près de 78 % en nominal pour l'essai 1 avec l'appareil de 2018). Cette solution présente l'avantage de réduire les émissions de CO de 42 % et celles de COVT de 55 % par rapport au boisseau tubé pour le poêle 2018, sans pour autant obtenir le niveau de performance du conduit concentrique. Ces écarts de performance sont moins marqués pour l'insert 2006 (réduction de 16 % pour le CO et 9 % pour le COVT) mais ils sont néanmoins significatifs.
- La condensation des COVT semble plus liée au gradient de température dans le conduit qu'au niveau de température lui-même.
- La granulométrie des particules au point bas est plus fine qu'au point haut. Cela montre bien que les mécanismes de croissance se déroulent dans le conduit. De plus, plus la colonne est grande, plus l'écart granulométrique entre le point bas et le point haut est important.
- La corrélation entre les différentes émissions d'imbrûlés (CO et COVT) est très bonne et ne dépend ni de l'appareil ni du conduit installé.
- La corrélation entre les COVT et le rapport OC/EC est très bonne pour un même appareil. Le ratio OC/EC varie différemment selon le design de l'appareil.
- Le mécanisme de condensation hétérogène des COVT a été décrypté et dépend principalement du gradient de température dans le conduit et de la capacité des COV à condenser, traduite dans notre étude par son ratio $CH_4/COVT$.
- La condensation hétérogène des COVT induit un mode granulométrique dans les fractions les plus fines que l'on parvient à retrouver dans nos mesures.
- Les mécanismes de dépôts ont été décrits et dépendent à environ 70 % de la qualité de combustion et du gradient de température et à 30 % d'autres paramètres (type de particules, spécificité de surface du conduit, ...).

À la suite de ces constats, deux pistes d'optimisations sont proposées :

- La suppression de l'isolant du conduit concentrique isolé sur la partie raccordement de manière à favoriser la récupération d'énergie sans risquer de trop abaisser la température de fumée (risque de condensation). Le risque serait limité du fait du préchauffage de l'air déjà opéré sur les quelques mètres au-dessus du plafond.
- Le positionnement du régulateur de tirage au niveau du plafond, qui permettrait de bénéficier d'un tirage régulé pour les fortes hauteurs de conduits, tout en favorisant la récupération d'énergie dans la pièce chauffée.

4. Etude de l'impact du type de conduit sur l'évolution des caractéristiques des particules

Les dispositifs primaires ou secondaires de piégeage ou de filtration sont une solution pour réduire les émissions de particules des installations de combustion. Pour des raisons économiques, réglementaires et de besoin de maintenance, ils sont majoritairement mis en place sur les installations de forte puissance. Quels que soient les dispositifs mis en œuvre, la granulométrie des particules est un facteur clé pour optimiser leur fonctionnement.

Même sans dispositif de filtration, donc en particulier pour les installations domestiques, les mécanismes conduisant au grossissement des particules et à leur dépôt dans le conduit ont une importance pour limiter les émissions polluantes et donc l'impact sur la qualité de l'air.

Or la taille des particules varie fortement dans le conduit d'évacuation des fumées : agglomération, condensation des aromatiques puis mûrissement d'Oswald. Ces phénomènes sont directement influencés par la température, le gradient de température et le temps de séjour dans le conduit. D'autres paramètres inconnus à l'heure actuelle impactent sans doute aussi cette évolution. Ainsi, le conduit d'évacuation des fumées peut servir de zone de conditionnement des particules pour faciliter leur piégeage ou leur traitement.

Pour maîtriser ces processus, il est important de connaître l'impact du conduit sur ces réactions, afin de pouvoir réduire, augmenter ou maintenir la taille des particules.

Afin de mieux comprendre ces phénomènes et obtenir des données théoriques indispensables à la recherche de solutions pratiques, cette tâche vise à étudier le comportement des particules lors de leur transport dans un conduit d'évacuation des fumées dans des conditions variées. Un générateur de particules est utilisé comme source d'émissions de particules stables en termes de caractéristiques physico-chimiques et de quantités émises (MINICAST). Les caractéristiques physico-chimiques de ces particules sont proches de celles issues du chauffage domestique au bois (particules issues d'une combustion : des suies). Sur cette source d'émission, des conduits présentant des caractéristiques distinctes ont été fixés. Les particules générées évoluent dans le conduit choisi dans un flux gazeux représentant les fumées. La teneur en eau du milieu gazeux est représentative celle des fumées de combustion de bois sec (Humidité sur brut de 16 %), tout comme sa teneur en O₂ et CO₂.

Les paramètres suivants sont étudiés :

- Le type de conduits (flexible, simple peau, concentrique) ;
- Des débits d'air variables dans la partie annulaire du concentrique ;
- L'évolution de la température des fumées.

La première étape de cette tâche est la conception puis la mise en place du dispositif expérimental. Cette étape a été réalisée par le LERMAB avec le soutien technique du CERIC concernant les conduits d'évacuation des fumées.

Ensuite, les essais ont été menés au LERMAB. La granulométrie en nombre permet de comprendre comment ces particules évoluent dans les différents conduits.

4.1. Méthodologie

Une plateforme d'essai expérimentale a été imaginée afin de pouvoir observer l'évolution des particules dans différents conduits. Ce chapitre détaille la méthodologie employée.

4.1.1. Les différents types de conduit

Trois conduits représentant les trois solutions de fumisterie de quatre mètres classiquement mise en œuvre ont été testés lors de cette tâche 4 (Figure 41):

- Conduit simple peau de 80 mm de diamètre ;
- Conduit flexible de 80 mm de diamètre ;
- Conduit concentrique sans isolant de 80 mm de diamètre.

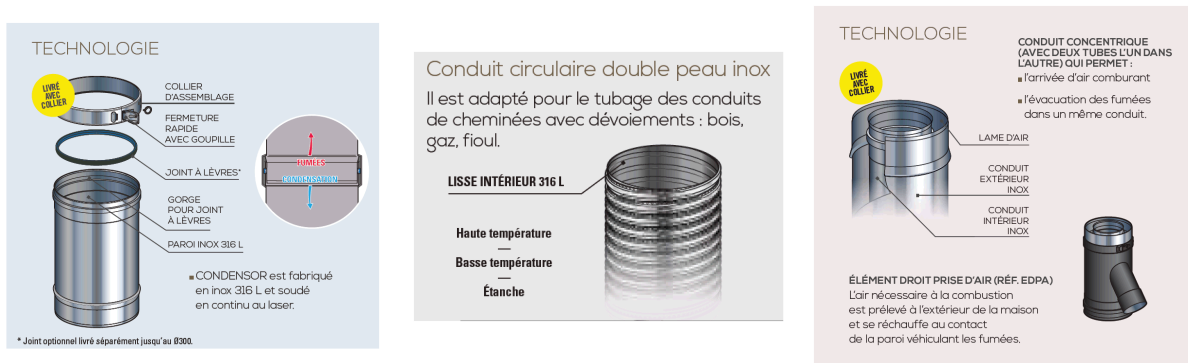


Figure 41 - Conduit simple peau, conduit flexible et conduit concentrique - source Poujoulat

Le conduit simple peau a été utilisé dans deux configurations : de manière classique ou avec un ventilateur soufflant sur ces parois pour accélérer le refroidissement des fumées.

Le conduit flexible n'a été utilisé que de manière classique.

En revanche, le conduit concentrique a été utilisé dans quatre configurations :

- Une turbine aspirait de l'air dans la double peau du conduit à une vitesse v_1 ;
- Une turbine aspirait de l'air dans la double peau du conduit à une vitesse v_2 ;
- Une turbine aspirait de l'air dans la double peau du conduit à une vitesse v_3 ;
- Une turbine soufflait de l'air dans la double peau du conduit à une vitesse v_4 .

Les trois premières configurations permettent de simuler le flux d'air qui passe dans la double peau et ainsi modifier le gradient de température. La dernière configuration permet d'obtenir un autre gradient de température, important pour vérifier son impact sur les mécanismes d'agglomérations.

4.1.2. La plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale est composée d'un brûleur gaz (dont les caractéristiques et le dimensionnement sont présentées à la page 61) enfermé dans une enceinte raccordée à un conduit. Sur ce conduit, des piquages sont réalisés pour injecter les particules et mesurer différentes températures, la composition des fumées ainsi que la granulométrie et le nombre de particules.

Les particules sont générées via un MINICast. Le fonctionnement de cet appareil ainsi que l'étude de sa stabilité et de sa reproductibilité sont présentés dans le paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Les mesures de températures sont réalisées à l'aide de thermocouple de type K d'une précision à $\pm 0.1^\circ\text{C}$. La composition des fumées est réalisée par un analyseur de gaz de la marque HORIBA, présenté dans le paragraphe 4.1.4. Les mesures du nombre de particules ainsi que de la distribution granulométrique sont réalisées à l'aide d'un impacteur basse pression (ELPI) dont les caractéristiques sont présentées au paragraphe 3.1.6.1.

Dans le cas du conduit simple paroi et du conduit flexible, la plateforme est relativement simple. La Figure 42 présente un schéma de l'utilisation de la plateforme dans ces conditions.



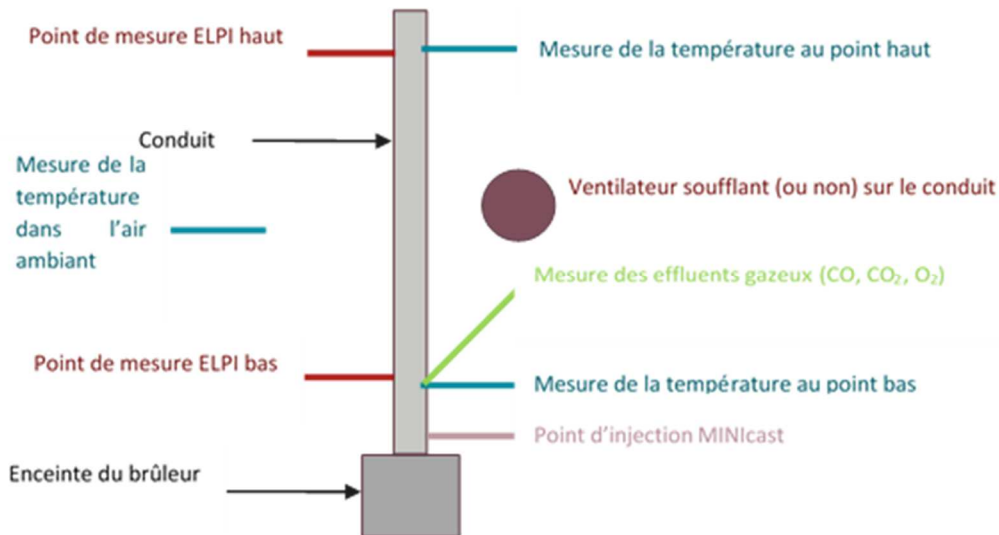


Figure 42 : Schéma de la plateforme expérimentale pour le conduit simple paroi et le conduit flexible.

Lors de l'installation du conduit concentrique sans isolant sur la plateforme, il a paru nécessaire de faire circuler de l'air dans cette double peau, afin de simuler le comportement classique de ce type de conduit. Ainsi, une turbine a été installée afin de pouvoir faire varier le débit d'air dans la partie annulaire, et donc finalement jouer sur le gradient de température entre le point bas des fumées et le point haut. Deux thermocouples ont aussi été ajoutés afin de mesurer la température de l'air au point bas et au point haut de la partie annulaire, ainsi qu'un anémomètre en sortie de turbine afin de connaître le débit d'aspiration ou d'injection. La Figure 43 présente schématiquement cette configuration de la plateforme.

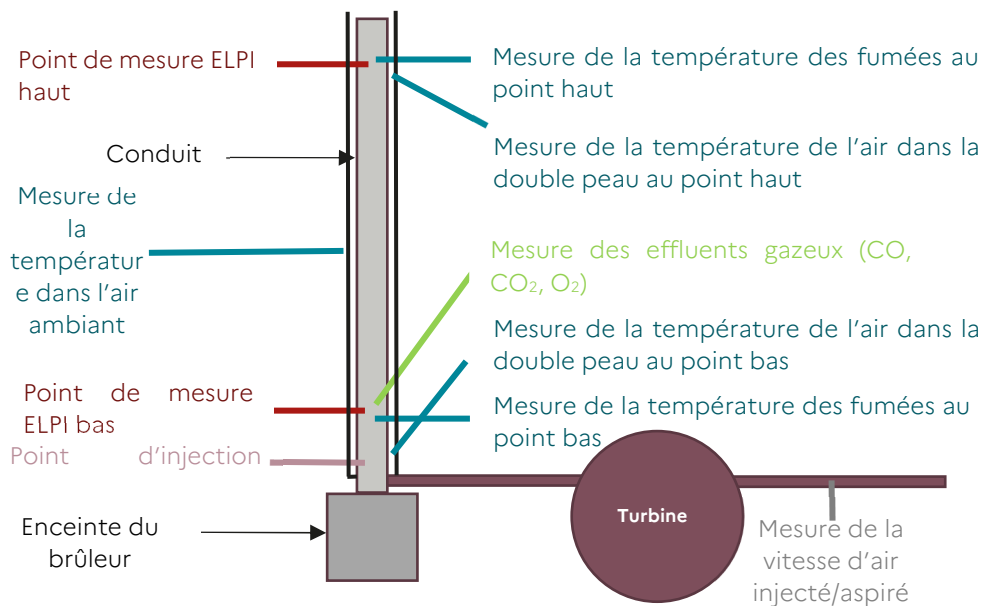


Figure 43 : Schéma de la plateforme expérimentale pour le conduit double peau sans isolant.

L'ensemble des données générées par l'installation était directement enregistré avec un pas de 10 secondes sur ordinateur, générant ainsi une base de données regroupant l'intégralité des mesures réalisées. La Figure 44 présente une photographie de chacun des montages réalisés.



Figure 44 : Photographies des différents montages sur la plateforme : simple paroi (a), flexible (b) et concentrique (c).

4.1.3. Dimensionnement du brûleur gaz

L'objectif de l'installation d'un brûleur gaz sur cette expérience est de reconstituer un effluent gazeux dont la composition et le débit soient proches de la réalité de celui émis lors de l'utilisation d'un appareil à bois bûches. Ainsi, le rôle du brûleur gaz est de fournir :

- De la chaleur ;
- Du CO₂ ;
- De la vapeur d'eau.

Dans cette tâche, les fumées ne comprennent pas de COVT (Composés Organiques Volatiles Totaux) puisque nous souhaitons observer l'évolution de la fraction solide des particules, et donc tout particulièrement des suies. C'est donc un des points qui peut modifier significativement les résultats de cette tâche 4 par rapport à ceux obtenus lors de la tâche 3 (qui a mis en évidence le rôle des COV).

L'objectif est de déterminer la puissance du brûleur permettant d'obtenir un taux d'O₂ dans les fumées comparable à celui observé dans la tâche 3, avec une vitesse des fumées dans le conduit comprise entre 0,5 et 1 m/s. De plus, comme la tâche 3 n'a pas pu mettre en évidence l'impact du taux de vapeur d'eau dans les fumées sur l'évolution des particules le long du conduit (ce paramètre n'était pas maîtrisable lors de ces essais), le brûleur devra aussi fournir une teneur en eau des fumées relativement proche de celle engendrée par la combustion de bois bûches.

Le Tableau 27 présente les proportions gazeuses nécessaires.

Tableau 27 : Bilan gazeux théorique pour dimensionnement du brûleur.

		N2	O2	CO2	H2O	Total
Bilan Normalisé	Débit Mincast (NL/min)	12.6	3.1	0.8	0.0	16.5
	Débit Bruleur (NL/min)	68.5	13.7	5.2	10.4	97.7
	Débit air (NL/min)	28.9	7.7	0.0	0.0	36.6
	Pourcentage (%)	72.9	16.2	4.0	6.9	100
	Débit d'air à injecter (NL/min)	36.6				
	Débit de CH 4 (NL/min)	5.2				



Pour obtenir ce taux de 16,2 % d'O₂, le facteur d'air au sein du brûleur est fixé à 1,75. Par retournement de l'équation de combustion du gaz de ville, il est alors possible de revenir au débit de gaz et donc la puissance du brûleur. Le résultat est de 3,1 kW. Ainsi le brûleur installé tourne à environ 3 kW pour avoir des conditions stables mais assez proches de la réalité.

4.1.4. Analyse de la composition des fumées

Les particules évoluent dans un effluent gazeux. Cet effluent doit être bien connu pour permettre une compréhension plus précise des mécanismes en jeu d'évolution des particules. La plateforme expérimentale est donc équipée d'un analyseur PG350 de chez HORIBA (Figure 45). Cet appareil mesure :

- O₂ via un détecteur paramagnétique ;
- CO₂ et CO via un détecteur à infrarouge non-dispersif.



Figure 45 : Photographie de l'analyseur PG350 de chez HORIBA.

Cet appareil, comme de nombreux appareils d'analyse de la composition des fumées, nécessite un traitement des fumées en amont pour fonctionner. Ainsi, une valise PSS5 de chez M&C est placée en amont de l'analyseur afin d'éliminer l'eau de l'effluent à mesurer. Ainsi, tous les résultats gazeux sont présentés via des proportions sur fumées sèches.

4.1.5. Mesure granulométrique des particules

Les mesures granulométriques sont réalisées avec un impacteur Electrique Basse Pression (ELPI). Le schéma de principe et le descriptif de l'utilisation de cet appareil est déjà décrit en 3.1.6.1.

Dans ce chapitre, les résultats seront présentés selon des classes granulométriques comprises entre 1 et 12. Leur correspondance avec le diamètre moyen des particules sont données ci-dessous :

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| - Etage 1 : 0,030 μm ; | - Etage 7 : 0,610 μm ; |
| - Etage 2 : 0,060 μm ; | - Etage 8 : 1,000 μm ; |
| - Etage 3 : 0,090 μm ; | - Etage 9 : 2,500 μm ; |
| - Etage 4 : 0,150 μm ; | - Etage 10 : 4,000 μm ; |
| - Etage 5 : 0,260 μm ; | - Etage 11 : 6,700 μm ; |
| - Etage 6 : 0,380 μm ; | - Etage 12 : 10,000 μm . |

Il est important de noter que la somme des étages 1 à 8 correspond aux PM₁, celle des étages 1 à 9 correspondent aux PM_{2,5} et celle des étages 1 à 12 aux PM₁₀.

4.1.6. Génération de particules avec le générateur de particules MINICast

Le générateur de suie MINICast (Miniature Combustion Aerosol Standard, de Jing Ltd.) est un brûleur portable, disponible dans le commerce, très utilisé pour les mesures de suie en laboratoire. Cet appareil alimente de façon contrôlée une flamme de mélange propane-azote assistée par un jet d'air (Figure 46

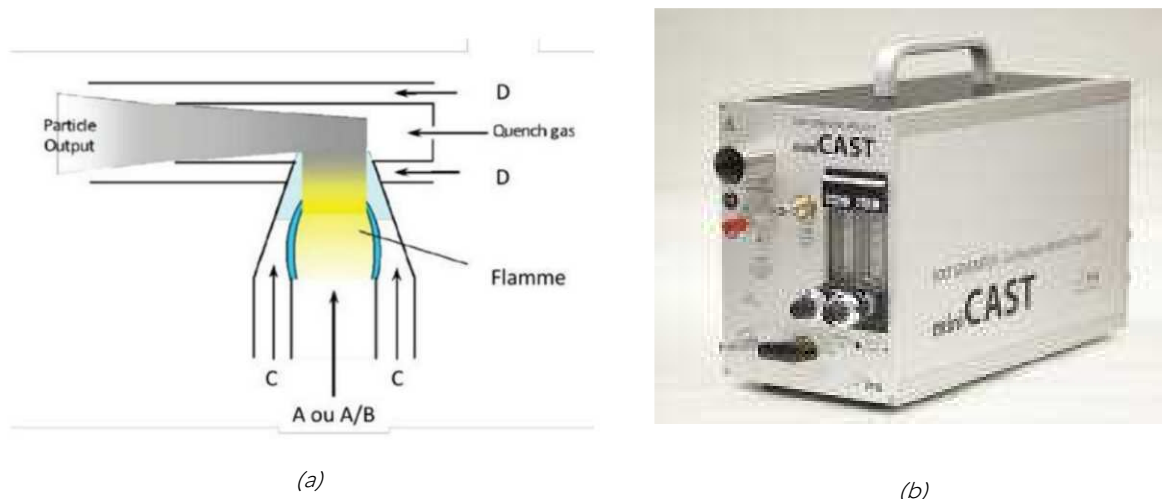


Figure 46).

Les fumées générées par cette combustion sont mélangées à un gaz neutre (Azote) qui fige le processus de formation des suies. Le choix des débits (propane, air, azote, air de dilution) conditionne, entre autres, la richesse globale de la flamme, ce qui permet la génération de suies de propriétés morphologiques, optiques et chimiques variées.

Le contrôle des débits injectés se présente sous la configuration suivante A/B/C/D et est représentée sur la Figure 46:

- A : Débit de propane en ml/min ;
- B : Débit d'azote en l/h ;
- C : Débit d'air d'oxydation en l/min ;
- D : Débit d'air de dilution en l/min.

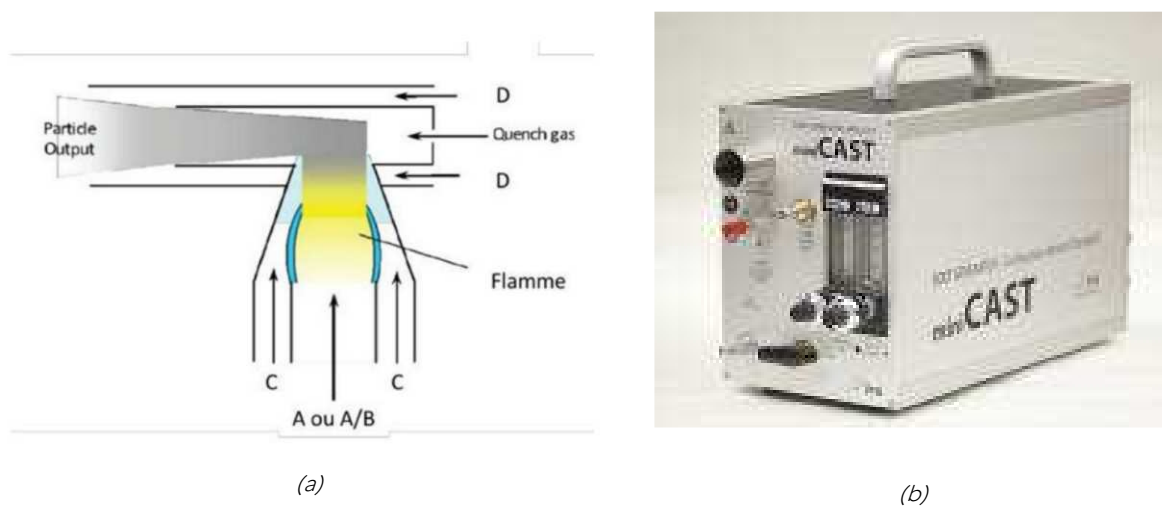


Figure 46 : Schéma de principe de la génération de suie (a) et photographie du générateur MINICast (b).

Le réglage du MINICast sera donc toujours exprimé de la même manière : C/A/B.

- Les deux premières valeurs, C et A, seront constantes avec C = 1200 NL/h et A = 10 mL/min.
- Le paramètre B, aussi appelé PC (Particles Controller), varie de 0 à 30 NL/h par palier de 10. Ainsi, les réglages possibles sont donc les suivants : 1200/10/0 ; 1200/10/10 ; 1200/10/20 ; 1200/10/30. Comme les deux premiers paramètres sont toujours constants, nous utiliserons plus tard dans le

rapport les notations suivantes : PC0 (1200/10/0) ; PC10 (1200/10/10) ; PC20 (1200/10/20) ; PC30 (1200/10/30).

4.2. Validation de la méthodologie appliquée

La méthode employée étant expérimentale, des essais de validation ont préalablement été mis en œuvre de manière à en connaître les limites (répétabilité, fidélité...). Les résultats de cette étape de validation sont disponibles dans le rapport d'annexe en Annexe 2. Cette annexe précise notamment l'homogénéité de la génération de particules au point bas de prélèvement, l'impact du brûleur sur l'ajout de particules ou la distribution de celles-ci pour les différents réglages du générateur.

Éléments à retenir :

- Le brûleur gaz a été dimensionné pour obtenir des vitesses et des compositions en O₂ et en H₂O proches des valeurs obtenues lors de la Tâche 3.
- Le MINIcast génère des particules de manière stables et reproductibles.
- Trois types de conduits ont été testés : simple peau, flexible et concentrique.



4.3. Résultats généraux

Un peu plus de soixante-dix essais ont été réalisés. Pour des raisons de clarté, nous avons choisi de présenter les résultats selon plusieurs thématiques.

L'évolution des caractéristiques des particules dans le conduit selon la solution de fumisterie mise en place est observée. Une partie est ensuite dédiée à l'observation de l'évolution des particules selon le débit d'air dans la lame d'air du conduit concentrique, influant directement sur la température au point haut. Afin de vérifier l'importance de l'effet de la température mis en évidence dans la tâche 3, l'impact du gradient de température est observé via des tentatives de corrélations. Des conclusions sont ensuite proposées sur cette partie et permettent d'alimenter le choix des prototypes à développer dans la tâche 5.

4.3.1. Evolution des particules selon le conduit

Dans cette partie, l'évolution des particules entre le point bas et le point haut est étudiée, pour l'ensemble des réglage MINIcast, conduit par conduit.

4.3.1.1. Le conduit Simple paroi

Pour le conduit Simple paroi, aucune ventilation mécanique n'a été appliquée sur le conduit. L'impact de la ventilation sera vu lors de l'utilisation du conduit concentrique (cf 4.4.1.1).

4.3.1.1.1. Caractérisation de l'effluent gazeux

Pour pouvoir comprendre l'évolution des particules dans un conduit, il est particulièrement important que l'effluent gazeux dans lequel elles évoluent soit caractérisé. Quatre mesures sont essentielles pour cette caractérisation de l'effluent :

- La mesure de la teneur en oxygène dans les fumées ;
- La mesure de la concentration en CO des fumées ;
- La température au point bas ;
- La température au point haut.

Les deux dernières valeurs permettent de déterminer le gradient de température, dont l'influence sur l'évolution des particules avait été clairement mis en évidence lors de la Tâche 3. Le Tableau 28 présente les résultats avec ce conduit.

Tableau 28 : Caractérisation de l'effluent gazeux évoluant dans le conduit Simple paroi.

Teneur en O ₂ (%) sur fumées sèches)	CO (ppm à 13 % d'O ₂)	Température au point bas (°C)	Température au point haut (°C)	Delta de température (bas- haut, °C)
16,6	74	460	353	107

Même si les valeurs de CO sont plus faibles que celles obtenues lors de la Tâche 3 avec de la combustion de bûches dans différents appareils de chauffage domestique, les autres caractéristiques sont comparables.

4.3.1.1.2. Réglage PC0

Les réglages du MINIcast sont toujours testés dans l'ordre PC0, puis PC10, puis PC20 et enfin PC30. Les résultats sont donc présentés dans cet ordre. La Figure 47 présente l'évolution en nombre total et en pourcentage des particules entre le point bas et le point haut dans le cas du conduit Simple paroi avec le réglage du MINIcast à PC10. Pour des questions de lisibilité, cette figure ne présente que l'évolution sur les cinq premiers niveaux granulométriques. Les niveaux suivants sont tellement proches de zéro qu'ils n'apportent pas de connaissances particulières.



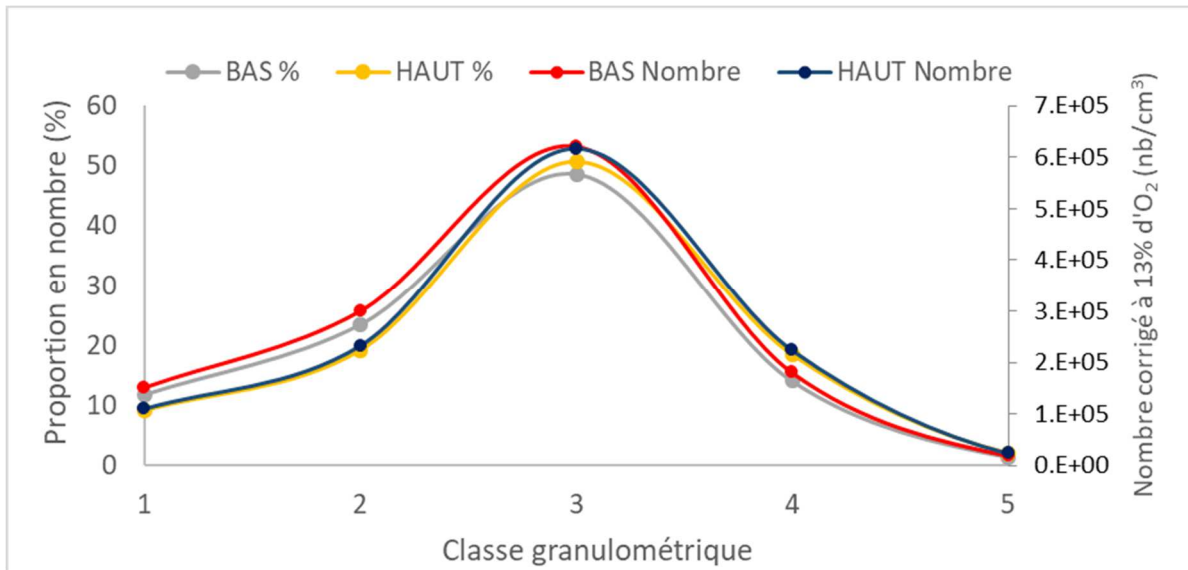


Figure 47 : Conduit Simple paroi, PC0 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Cette figure permet clairement de visualiser le grossissement des particules entre le point bas et le point haut. En effet, si l'on regarde les courbes rouge (point Bas, en nombre) et bleu foncé (point Haut, en nombre) : La courbe rouge est au-dessus de la bleue pour les granulométries 1 et 2 ce qui signifie donc une granulométrie plus fine. Ensuite, les deux courbes se rejoignent au niveau 3, puis la courbe bleue est au-dessus de la courbe rouge pour les niveaux 4 et 5. Cela signifie bien que des particules de niveaux 1 ont grossi pour produire des particules de niveau 2, qui ont elles-mêmes produit des niveaux 3, etc... jusqu'au niveau 5. Le point de jonction entre les courbes sur le niveau 3 ne signifie en rien que cette granulométrie n'a pas évolué, mais seulement que la nouvelle fraction de particules de niveau 2 qui ont grossi et sont devenues de niveau 3 compensent les particules de niveau 3 qui ont grossi et sont devenues de niveau 4.

4.3.1.1.3. Réglage PC10

Comme vu précédemment, c'est le réglage PC10 qui génère le nombre de particules le plus élevé. La Figure 48 présente les courbes de résultats avec ce réglage.

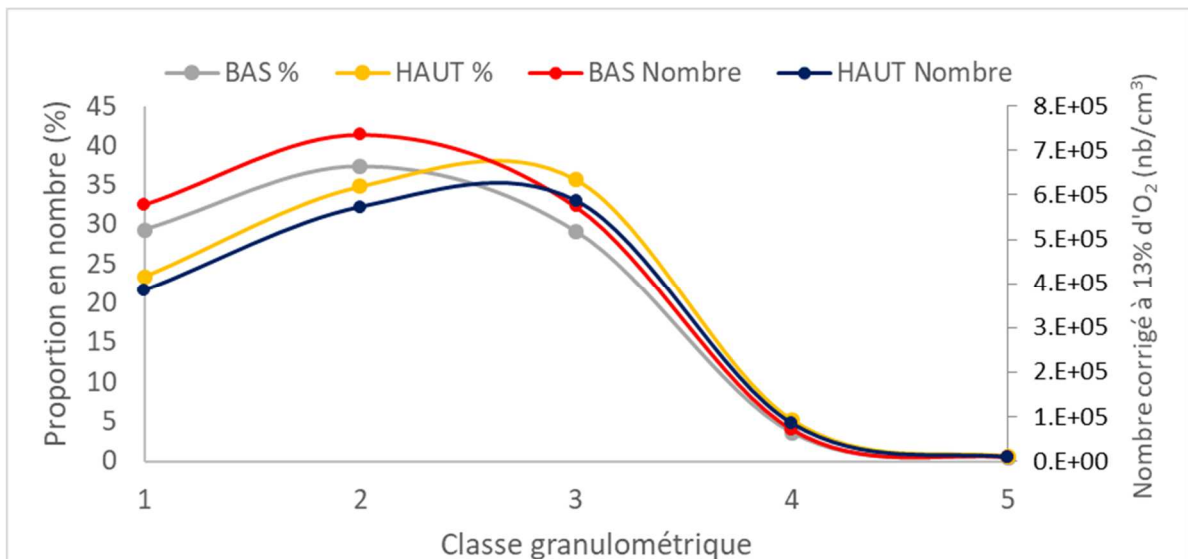


Figure 48 : Conduit Simple paroi, PC10 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Avec ce réglage, nous constatons un grossissement des particules assez prononcé entre le point bas et le point haut de caractérisation. En effet, la fraction de niveau 1 passe d'environ 30 % et 5.79×10^5 au point bas à moins de 24 % et 3.84×10^5 au point haut. Ces valeurs mettent en évidence que les mécanismes de

croissance des particules induisent une réduction du nombre total de particules. Cela est bien logique, il faut que plusieurs particules de niveau 1 s'assemblent pour former une particule de niveau 2, et ainsi de suite.

4.3.1.1.4. Réglage PC20

De la même manière, la Figure 49 présente les résultats avec le réglage PC20 sur le MINICAST. Tout d'abord, la courbe « BAS % » est quasiment totalement camouflée par la courbe « BAS Nombre ». Sur cette figure, un nouvel élément de compréhension des phénomènes apparaît : les mécanismes de dépôts. En effet, quelle que soit la granulométrie observée, le nombre de particules au point haut est significativement plus faible qu'au point bas. Même si les proportions de chaque niveau granulométrique montrent un grossissement léger, le nombre de particules au point haut est toujours plus faible qu'au point bas. Ainsi, cela induit qu'entre le point bas et le point haut des mécanismes de dépôt se sont déroulés, et donc sans aucun doute dans le cas des particules, de la thermophorèse.

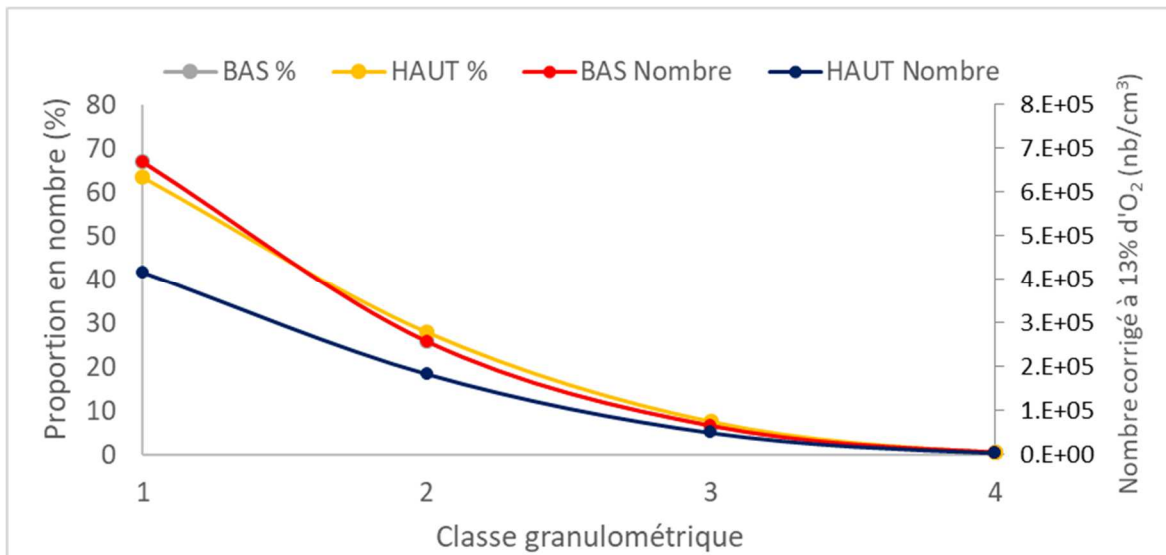


Figure 49 : Conduit Simple paroi, PC20 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

4.3.1.1.5. Réglage PC30

Maintenant que nous avons identifié lors du réglage PC20 le mécanisme de thermophorèse, nous pouvons observer les résultats avec le réglage PC30, présenté dans la Figure 50.

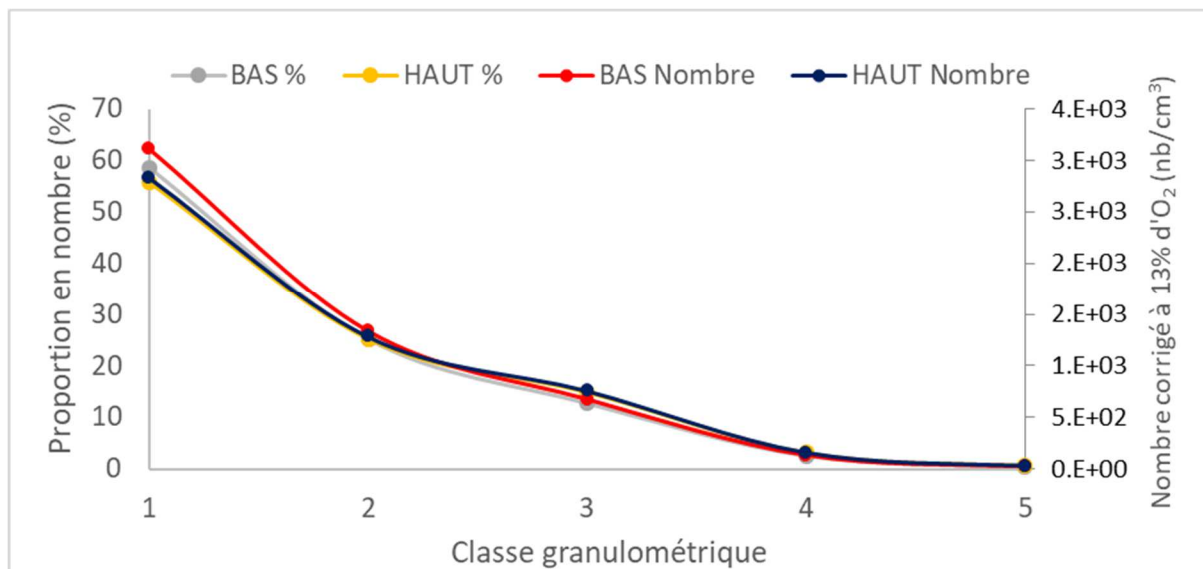


Figure 50 : Conduit Simple paroi, PC30 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Le premier élément à rappeler est qu'avec ce réglage de PC30, la quantité de particules évoluant dans le conduit est beaucoup plus faible qu'avec les autres réglages. Cette figure montre que, même si un grossissement semble se dérouler (visible en observant les courbes rouge et bleue), les particules ne semblent pas évoluer de manière significative entre le point bas et le point haut. Comme le grossissement se déroule bel et bien, cela signifie que, contrairement au réglage PC20, la thermophorèse ne se déroule pas, ou de manière extrêmement faible dans cette configuration. Cela pourrait signifier l'existence d'un seuil de concentration pour que ce phénomène se déroule.

4.3.1.1.6. Conclusion pour le conduit Simple paroi

L'installation du conduit simple paroi induit une différence de température (delta T) entre le point bas et le point haut d'un peu plus de 100°C. Les mécanismes de croissance ont bien été mis en évidence et sont très visibles lors du réglage du MINIcast sur PC10. Néanmoins, sur cette longueur de conduit, ces débits de gaz et donc ces temps de séjour, les mécanismes de croissance ne permettent globalement pas de modifier drastiquement les caractéristiques des particules émises. Globalement, on observe plutôt une croissance sur un à deux niveaux, maximum.

Un autre phénomène a été mis en évidence lors du réglage du MINIcast à PC20. En effet, le nombre de particules, quel que soit le niveau granulométrique observé, est plus faible au point haut qu'au point bas. Cela montre bien qu'en plus des phénomènes de grossissement, qui par nature diminuent le nombre de particules, se déroulent aussi des mécanismes de dépôts. Dans le cas de l'évolution de particules, le mécanisme de dépôt est la thermophorèse.

Les réglages PC20 et PC30 présentent une distribution assez proche des particules générées, mais en quantité totalement différente : le réglage PC30 induit une très faible émission de particules en nombre. Lors de ce réglage PC30, les mécanismes de thermophorèse ne sont pas visibles. Cela ne signifie pas forcément qu'aucune thermophorèse ne se déroule, mais en tout cas, elle se déroule dans des proportions extrêmement faible (d'où sa disparition des courbes). Ainsi, la proportion de particules qui subiraient de la thermophorèse est sans doute directement liée à la quantité de particules émises, et une valeur seuil permettrait de rendre ce phénomène assez important pour être visualisé sur ce type de courbe.

4.3.1.2. Le conduit Flexible

4.3.1.2.1. Caractérisation de l'effluent gazeux

De la même manière que dans le cas du conduit simple paroi, la première étape consiste à caractériser l'effluent gazeux dans lequel les particules évoluent. Le Tableau 29 présente ces résultats.

Tableau 29 : Caractérisation de l'effluent gazeux évoluant dans le conduit Flexible.

Teneur en O ₂ (% sur fumées sèches)	CO (ppm à 13 % d'O ₂)	Température au point bas (°C)	Température au point haut (°C)	Delta de température (bas-haut, °C)
16,3	72	437	243	194

La composition gazeuse des fumées est très proche de celle mesurée avec le conduit simple paroi et donc assez proche des fumées de combustion de bois, sauf pour la teneur en CO qui est un peu faible. En revanche, le conduit Flexible induit une baisse de température entre le point bas et le point haut beaucoup plus important que le conduit simple paroi, proche de 200°C. Cela semble cohérent que le delta T soit plus important avec le Flexible qu'avec le conduit Simple paroi. En effet, la structure annelée créée de la turbulence qui augmente le coefficient de transfert de chaleur par convection et la surface d'échange avec l'extérieur est beaucoup plus importante pour une même longueur de conduit.



4.3.1.2.2. Réglage PC0

Les résultats vont être présentés de la même manière que pour le conduit simple paroi. Seul le nombre de niveau granulométrie peut évoluer en fonction des granulométries mesurées. Ainsi, la Figure 51 présente les résultats pour le conduit flexible avec le réglage PC0.

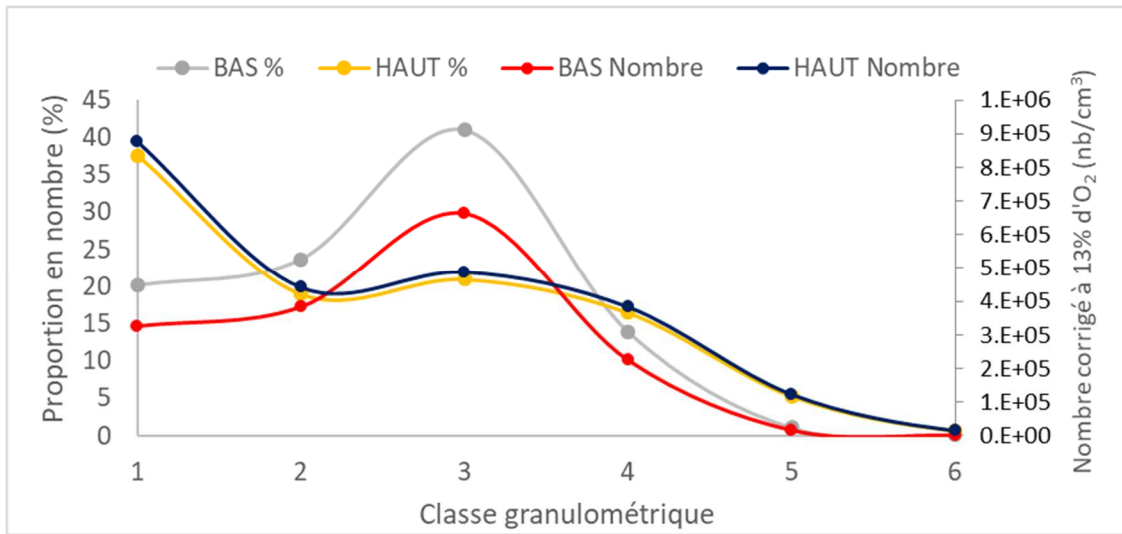


Figure 51 : Conduit Flexible, PC0 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Cette courbe met en évidence un résultat très particulier. En effet, sur les deux niveaux granulométriques les plus fins (niveau 1 et niveau 2), le nombre de particules est plus élevé au point haut qu'au point bas, et ce de manière très conséquente pour le niveau 1. Cet élément est très étrange et ne peut être expliqué que par trois hypothèses :

- Soit de nouvelles particules ultrafines se sont formées entre le point bas et le point haut ;
- Soit il s'agit de l'expression de la dispersion liée à la plateforme (soit du brûleur soit du MINICast) ;

Soit la structure annelée de ce conduit induit un champ de vitesse différent des autres conduits. En effet, les parois annelées induisent une couche limite plus importante contre les parois et donc une vitesse plus élevée au centre. Cela pourrait engendrer des mécanismes d'évolution des particules différents.

Si cette observation ne se cantonne qu'à un seul et unique réglage, l'option de la dérive de la plateforme semble plus cohérente. Néanmoins, les parties suivantes (cf 4.3.1.2.4 et 4.3.1.2.5) réfutent cette explication.

Si ce particularisme est laissé de côté et que seuls les niveaux granulométriques à partir du niveau 2 sont analysés, nous observons tout de même un net grossissement, beaucoup plus important qu'avec le conduit Simple paroi. Cette augmentation est sans doute directement liée au delta T beaucoup plus important dans le cas du conduit Flexible.

4.3.1.2.3. Réglage PC10

La Figure 52 présente les résultats obtenus sur le conduit Flexible avec le réglage PC10 sur le MINICast.

Sur cette figure, nous retrouvons une allure plus classique, avec un nombre de particules pour les niveaux granulométriques 1 et 2 plus élevé au point bas qu'au point haut. Les mécanismes de grossissement semblent très importants et cette fois modifient de manière très significative les caractéristiques des particules au point haut. Le fait que les mécanismes de grossissement sont amplifiés est sans doute dû au gradient de température très élevé avec ce type de conduit.

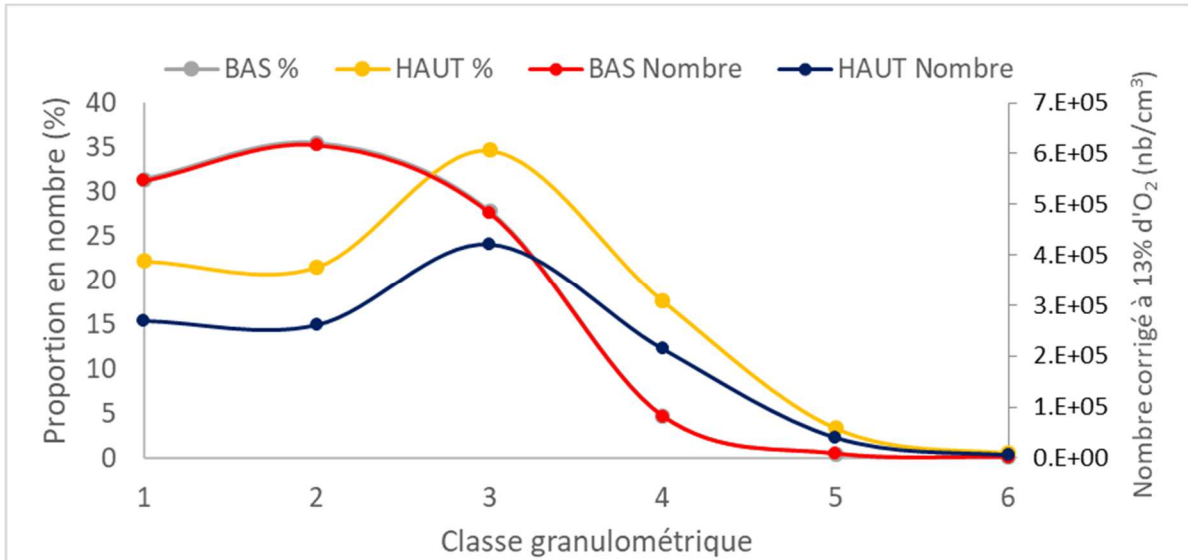


Figure 52 : Conduit Flexible, PC10 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

4.3.1.2.4. Réglage PC20

Poursuivons donc l'analyse de l'évolution des particules dans le conduit Flexible avec le réglage du MINICast à PC20. La Figure 53 présente les résultats.

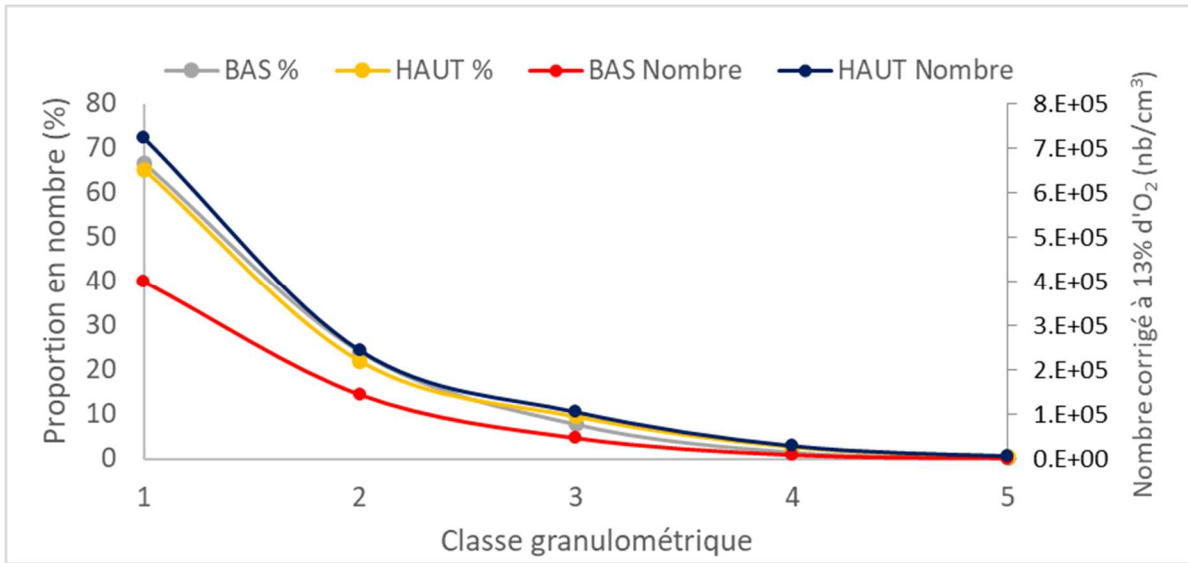


Figure 53 : Conduit Flexible, PC20 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Nous retrouvons le même phénomène que celui observé pour le réglage PC0, à savoir, il y a plus de particules au point haut qu'au point bas, même sur les granulométries les plus fines. Pour autant, la courbe grise et la courbe jaune semblent bien signifier qu'un léger grossissement en proportion a eu lieu. Un potentiel ré-envol des particules collées sur les parois s'est peut-être déroulé. Observons ce qu'il en est avec le réglage PC30.

4.3.1.2.5. Réglage PC30

La Figure 54 présente les résultats obtenus sur le conduit Flexible avec le réglage PC30 sur le MINICast. Pour rappel, ce réglage ne génère qu'un flux très faible en nombre de particules.

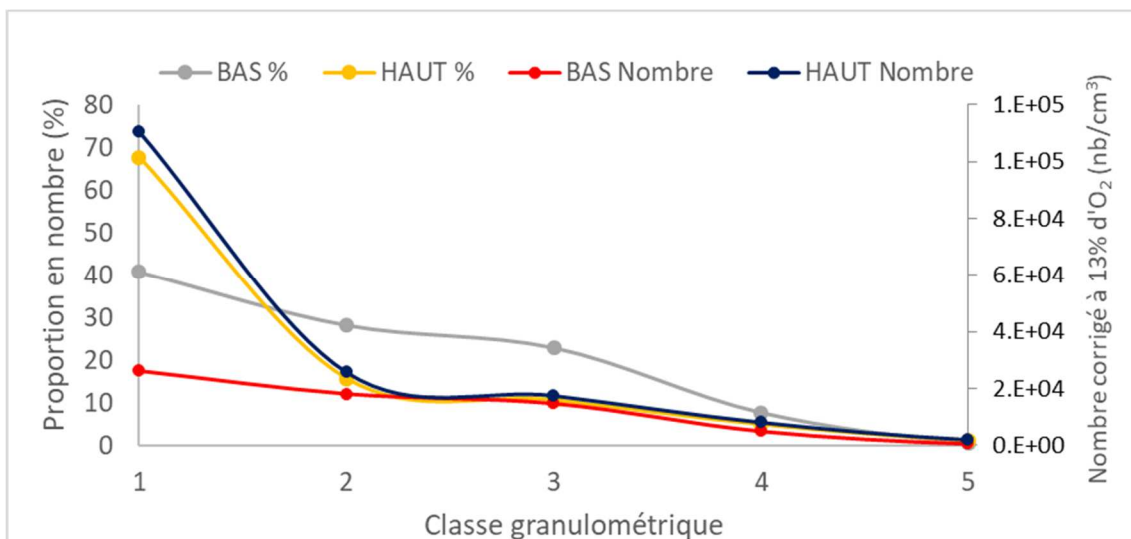


Figure 54 : Conduit Flexible, PC30 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Le même phénomène se déroule que pour les réglages PC0 et PC20. Ainsi, il ne s'agit pas d'une quelconque dérive de la plateforme expérimentale. Deux hypothèses se présentent alors à nous :

- Soit le gradient de température élevé engendre une formation de particules très fines, sans doute par le mécanisme de nucléation. Ainsi, des particules très fines continueraient de se former dans le conduit, d'où l'augmentation du nombre de particules entre le point bas et le point haut ;
- Soit les particules qui apparaissent au point haut existaient déjà bel et bien au point bas, mais étaient trop petites pour être comptabilisées par l'ELPI. Le profil de la courbe pourrait effectivement suggérer une gaussienne tronquée. En effet, l'ELPI ne peut pas compter les particules plus petites que 30 nm. Or, le chapitre bibliographique explique bien que la nucléation génère des particules de moins de 10 nm.

Avec ces données, nous ne possédons pas de moyen pour trancher entre ces deux hypothèses. Néanmoins, la seconde paraît plus probable, compte tenu des niveaux de températures au point bas qui ne doivent pas tout à fait permettre de générer des particules. De plus, cette seconde hypothèse expliquerait aussi l'allure de la courbe des réglages à PC20 et PC30 sur tous les conduits testés.

4.3.1.2.6. Conclusion pour le conduit Flexible

Le conduit Flexible semble se comporter totalement différemment du conduit Simple paroi préalablement étudié. En effet, sa paroi n'étant pas lisse, elle engendre un gradient de température beaucoup plus important. Ce gradient de température impacte significativement les mécanismes de grossissement, très importants dans le cas du réglage PC10.

En revanche, sur les trois autres réglages, un phénomène plus étrange se produit, avec une augmentation du nombre de particules entre le point bas et le point haut. Il s'agit sans doute de particules non comptabilisées au point bas du fait de leur taille inférieure à 30 nm, qui subissent des mécanismes de croissance et atteignent pour partie cette taille au point haut.

Mais, le dernier élément étonnant, c'est qu'aucune trace forte de thermophorèse n'est apparue lors du traitement de ces courbes. Pourtant, lors du démontage du conduit Flexible, ses parois sur la première moitié du conduit étaient tapissées de particules, de manière beaucoup plus importante que sur les autres conduits. Ainsi, il est certain que la thermophorèse s'est déroulée, et ce de manière assez forte. Qui plus est, cela semble logique puisqu'il est connu que la thermophorèse est d'autant plus importante que le gradient de température augmente. Mais finalement, comme des nanoparticules sont sans doute non-comptabilisées au point bas, et seulement en partie comptabilisées au point haut, et qu'elles sont sans doute les plus nombreuses, cela efface toute visualisation du mécanisme de thermophorèse (observé précédemment sur des évolutions en nombre, valeur qui dans ce cas est totalement biaisée).

Ce conduit engendre une thermophorèse importante et dope les mécanismes de croissance des particules du fait du gradient de température qu'il occasionne et de sa surface non lisse.



4.3.1.3. Le conduit concentrique

Dans le cas du conduit Concentrique, nous avons choisi d'observer son utilisation en faisant passer de l'air dans la partie prévue à cet effet avec un débit d'environ 15m³/h, soit 0.7 m/s, ce qui correspond à un réglage à 10 Hz sur notre variateur. Les autres configurations seront étudiées dans le paragraphe 4.4.1.2.

4.3.1.3.1. Evolution des températures

De la même manière que pour les deux autres conduits, le Tableau 30 présente les résultats moyens de la caractérisation des fumées dans lesquelles les particules ont évolué.

Tableau 30 : Caractérisation de l'effluent gazeux évoluant dans le conduit Concentrique.

Teneur en O ₂ (%sur fumées sèches)	CO (ppm à 13 % d'O ₂)	Température au point bas (°C)	Température au point haut (°C)	Delta de température (bas- haut, °C)
16	62	476	390	86

Les concentrations dans les fumées en O₂ et en CO sont similaires à celles observées avec les deux autres conduits. En revanche, la température au point bas est plus élevée que pour les autres conduits, alors que le delta de température est le plus faible. Cela provient du fait de la lame d'air autour du conduit d'évacuation des fumées, qui joue un rôle d'isolant autour des fumées, et lisse les pertes de températures via le chauffage de l'air dans la lame d'air. En effet, la température de la lame d'air n'est pas constante en fonction de la hauteur (contrairement à l'air ambiant presque stable). Les échanges sont donc différents de ceux pour le conduit simple paroi (si l'on compare par exemple le delta de température Fumée-air entre le haut et le bas). Observons les impacts de telles conditions sur les particules.

4.3.1.3.2. Réglage PCO

La même démarche d'analyse des résultats est opérée sur ce type de conduit. Ainsi, la Figure 55 présente les résultats pour le conduit Concentrique avec le réglage du MINIcast à PCO.

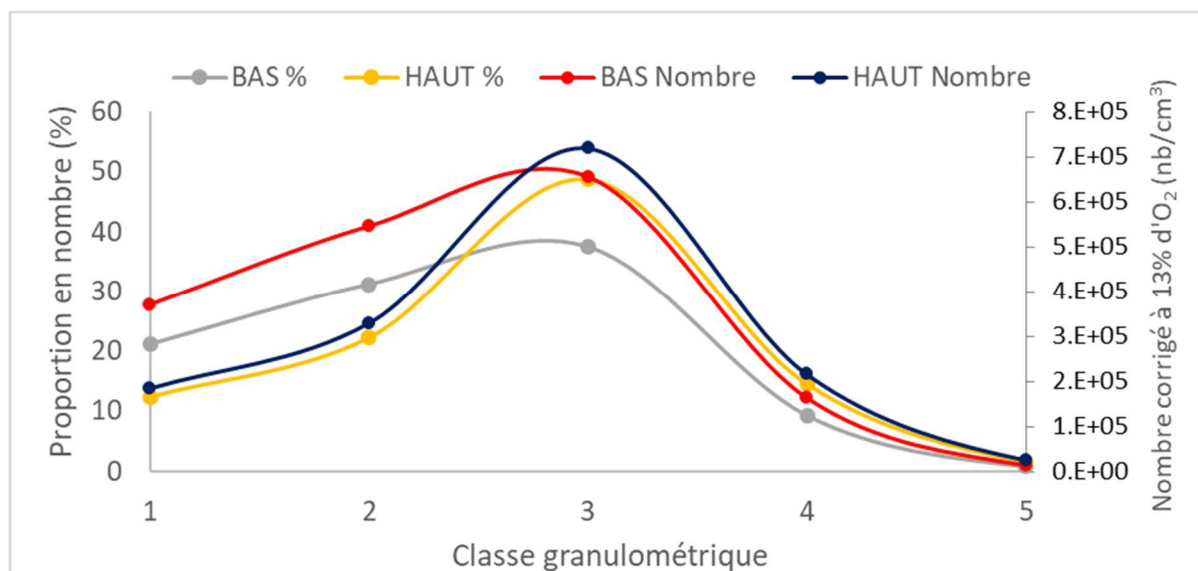


Figure 55 : Conduit Concentrique 10Hz, PCO : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Cette figure montre que le conduit Concentrique induit un fort coefficient de grossissement, comme le conduit Simple paroi. Un temps de séjour plus long dans le conduit aurait sans doute permis de poursuivre ces mécanismes de croissance, et ainsi de même modifier le niveau granulométrique majoritaire. Avec ce réglage, il y a une diminution de 16 % du nombre de particules entre le point bas et le point haut, ce qui est significatif.

4.3.1.3.3. Réglage PC10

La Figure 56 présente les résultats obtenus sur le conduit Concentrique avec le réglage PC10 du MINICAST.

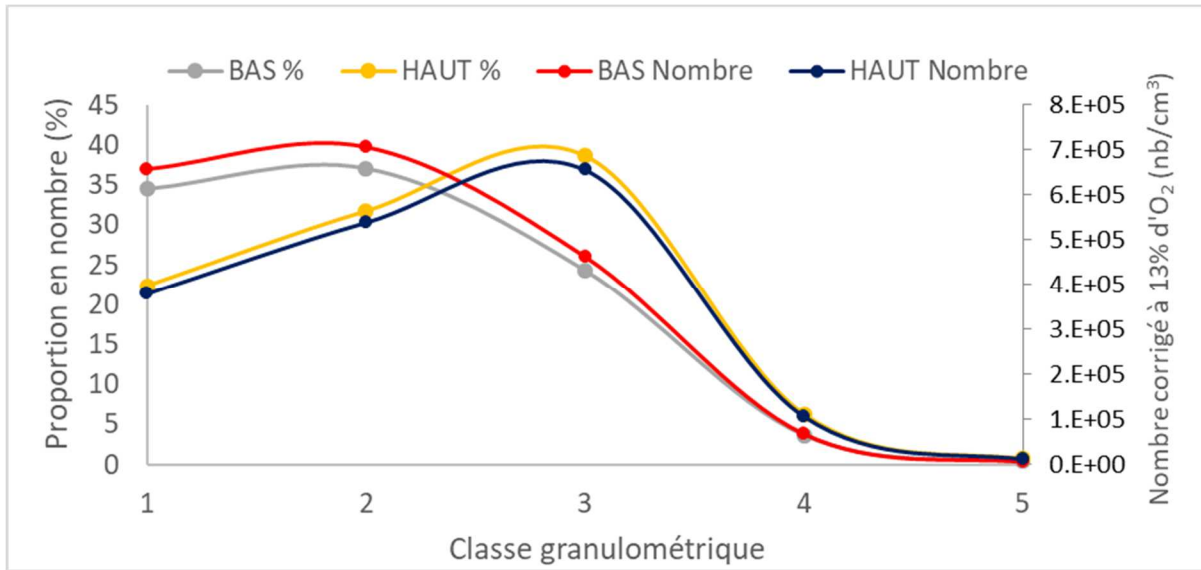


Figure 56 : Conduit Concentrique 10Hz, PC10 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Une fois de plus, cette figure illustre très bien le grossissement des particules, tout particulièrement visible sur ce conduit avec ce réglage de MINICAST. En effet, le niveau granulométrique majoritaire est même décalé d'un cran tant les mécanismes de grossissement sont importants. Cela signifie donc que d'autres facteurs que le gradient de température impacteraient les mécanismes de croissance en jeu. Dans la Tâche 3, la présence de COV dans les fumées induisait un impact du gradient de température sur la condensation hétérogène des COV, puis le mûrissement des particules. Or, dans la Tâche 4, il n'y a pas de COV dans les fumées. Ainsi, l'impact du gradient de température n'est sans doute pas exactement le même. En revanche, ce gradient impacte directement et de manière certaine le mécanisme de la thermophorèse.

4.3.1.3.4. Réglage PC20

La Figure 57 présente les résultats pour le réglage PC20.

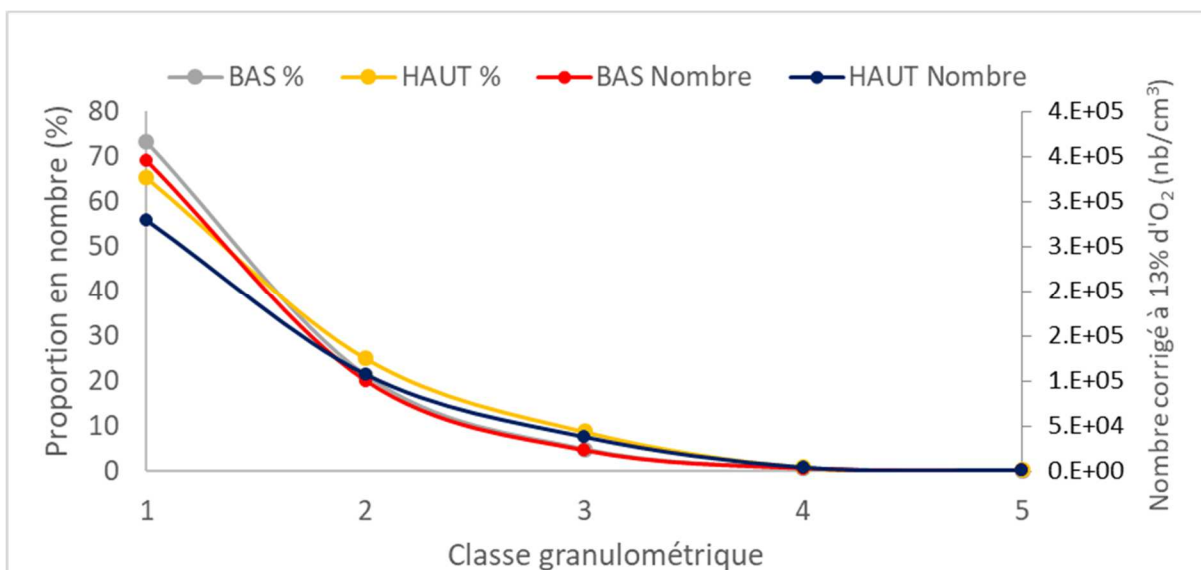


Figure 57 : Conduit Concentrique 10Hz, PC20 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Le même constat peut être fait sur cette figure que lors de la configuration PC20 avec le conduit Simple paroi, à savoir : les mécanismes de grossissement se déroulent toujours, mais semblent être plus faibles sur ces niveaux de granulométrie.

4.3.1.3.5. Réglage PC30

La Figure 58 présente les résultats du dernier réglage effectué sur le conduit Concentrique.

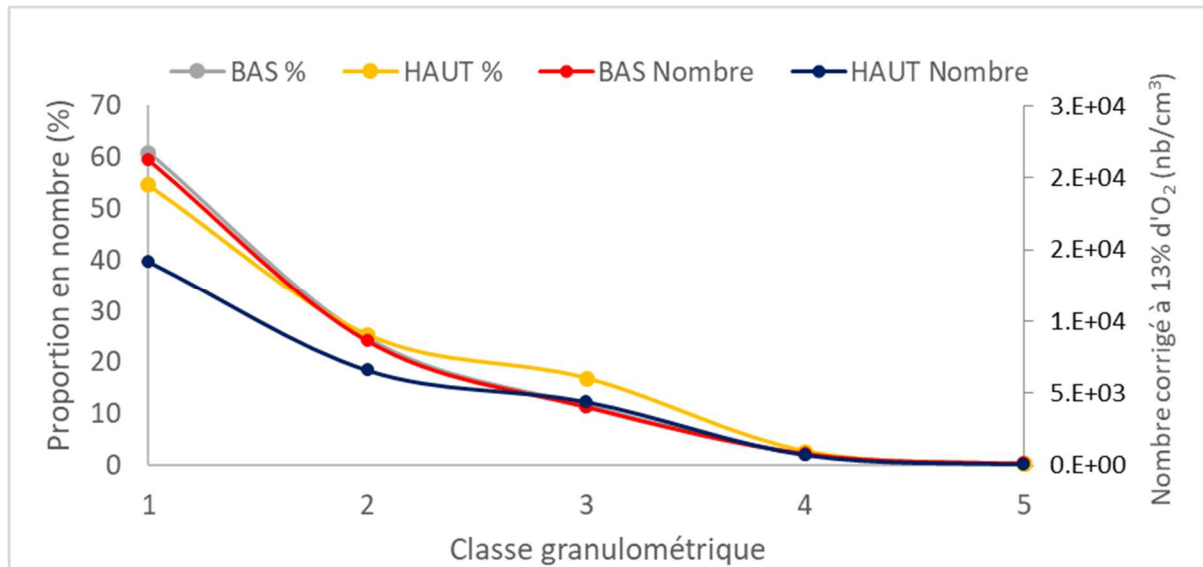


Figure 58 : Conduit Concentrique 10Hz, PC30 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.

Cette figure illustre bien la complexité d'évolution des particules dans le conduit. En effet, le mécanisme de grossissement est visible sur les courbes grise et jaune, et pourtant la très légère augmentation du nombre de particules de classe granulométrique trois au point haut ne permet pas de compenser le mécanisme de grossissement. Ainsi, il est certain que le mécanisme de thermophorèse se déroule, mais il est très difficile à évaluer.

4.3.1.3.6. Conclusion pour le conduit Concentrique

Le conduit Concentrique, avec une aspiration d'air de l'ordre de 15 m³/h, induit un gradient de température assez faible. Néanmoins, les mécanismes de croissance sont très forts. Ainsi, le gradient de température ne serait pas le seul élément qui impacterait sur les mécanismes de croissance lorsque les fumées ne contiennent pas de COV. Néanmoins, ce gradient impacte directement la thermophorèse, qui augmente lorsque le gradient de température augmente.

En dehors de ces points, le conduit Concentrique se comporte à peu près de la même manière que le conduit Simple paroi. Cela semble assez cohérent, étant donné que l'effluent gazeux est quasi identique, que les parois sont les mêmes (inox lisse). Seul le gradient de température est différent.

Ce point permet donc aussi de valider le fait que le type de paroi doit impacter non seulement sur le gradient de température, mais aussi directement sur la surface de contact avec les fumées, et donc sur l'importance de la thermophorèse.

Éléments à retenir :

- Le conduit Simple paroi et le conduit Concentrique se comportent de manière équivalente. Un grossissement significatif des particules est constaté.
- Le conduit Flexible induit, du fait de ses parois non lisses, un gradient de température très élevé. Cet important gradient de température enclencherait des mécanismes de croissance très importants dans le conduit.
- Le mécanisme de thermophorèse a été mis en évidence dans les cas du conduit Simple paroi et du conduit Concentrique. Malgré des constats moins marqués sur le conduit flexible, les parois de la première moitié du conduit sont tapissées de particules, en quantités beaucoup plus importantes que pour les autres conduits. Cette observation est cohérente avec l'hypothèse que le conduit Flexible, du fait de ses forts échanges thermiques, favorise la thermophorèse. La visualisation de ce mécanisme lors des mesures a cependant été masquée par la croissance accrue des nanoparticules non comptabilisées au point bas.
- Les différents types de conduits induisent différentes évolutions des caractéristiques des particules.

4.4. Analyses approfondies

Dans ce chapitre, nous allons observer plus finement les impacts des différents éléments connus, comme l'effet du gradient de température sur les mécanismes de croissance et/ou la thermophorèse. Ces observations nous mèneront à essayer de déterminer des lois permettant de réaliser des corrélations.

4.4.1. Impact du gradient de température

L'impact du gradient de température va être observé finement via deux types d'expérience :

- Sur le conduit Simple paroi en ajoutant une soufflerie qui permet d'augmenter le gradient de température ;
- Sur le conduit Concentrique en faisant varier le débit d'aspiration de la turbine, impactant directement le gradient de température.

4.4.1.1. Conduit Simple paroi

Dans un premier temps, nous allons donc observer l'impact de l'ajout d'une soufflerie sur le conduit Simple paroi. Aucune mesure de débit n'est réalisée sur cette partie. En effet, l'objectif est simplement de créer du « vent » sur le conduit pour augmenter son gradient de température et pouvoir en visualiser l'effet. Il ne s'agit donc ici aucunement d'une situation réelle. Le Tableau 31 présente la caractérisation de l'effluent gazeux et la mesure du gradient de température en fonction de l'activation de la soufflerie.

Tableau 31: Caractérisation de l'effluent gazeux selon l'activation de la soufflerie sur le conduit Simple paroi.

Configuration	Teneur en O ₂ (% sur fumées sèches)	CO (ppm à 13 % d'O ₂)	Température au point bas (°C)	Température au point haut (°C)	Delta de température (bas-haut, °C)
Soufflerie = OFF	16,6	74	460	353	107
Soufflerie = ON	16,5	83	421	278	143

L'activation de la soufflerie ne modifie en rien la composition des fumées. En revanche, nous parvenons via ce biais à augmenter de 36°C le gradient de température (malgré une baisse générale de la température). Nous allons pouvoir essayer de visualiser l'impact que cette augmentation peut engendrer sur la granulométrie des particules au point haut.

Comme le chapitre précédent a montré que c'était pour le réglage PC10 que les mécanismes de grossissement étaient souvent les plus visibles, ce sont les résultats de ce réglage sont présentés sur la Figure 59.



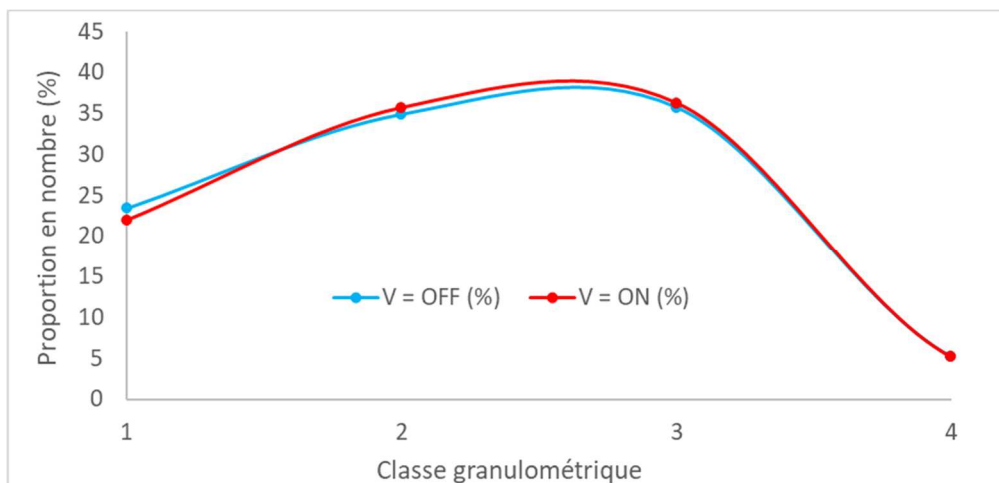


Figure 59 : Mesure de la répartition granulométrique au point haut du conduit Simple paroi avec la soufflerie OFF et ON.

Cette figure permet de visualiser l'impact que cette augmentation de 36°C du gradient de température a sur les mécanismes de croissance des particules au point haut. Cet impact est trop léger pour être clairement significatif sur ces deux courbes.

Néanmoins, en observant les résultats totaux en nombre, on aperçoit un autre phénomène. Le Tableau 32 présente les résultats.

Tableau 32 : Résultats en nombre total des émissions de particules selon le réglage du MINicast et de l'activation de la soufflerie dans le cas du conduit Simple paroi au point haut.

Configuration	PC0	PC10	PC20	PC30
Soufflerie = OFF (nb/cm³ à 13% d'O₂)	1215452	1644088	657012	5084
Soufflerie = ON (nb/cm³ à 13% d'O₂)	1151622	1581782	724802	5923
S=OFF - S=ON (nb/cm³ à 13% d'O₂)	63830	62306	-67789	-839
(S=OFF - S=ON)/(S=OFF) (%)	5,3	3,8	-10,3	-16,5

Ainsi, sur les deux premiers réglages du MINicast (PC0 et PC10), l'activation de la soufflerie génère une légère diminution du nombre de particules entre le point bas et le point haut (de l'ordre de 5%). Cela traduit le fait que les mécanismes de grossissement se sont plus déroulés et/ou que le mécanisme de thermophorèse était légèrement plus important.

En revanche, pour les deux réglages suivants (PC20 et PC30), une augmentation de plus de 10 % du nombre de particules se déroule avec l'activation de la soufflerie. Pour rappel, ces réglages génèrent majoritairement des particules de niveau granulométrique 1, donc les plus fines. Ainsi, le gradient de température plus important avec la soufflerie engendre sans doute un dopage de la croissance des particules ultra-fines non-comptabilisées au point bas (du fait de leur taille < 30 nm). C'est exactement ce qui avait été observé avec le conduit Flexible dans la partie précédente.

4.4.1.2. Conduit Concentrique

Pour cette étude du gradient de température, dans le cas du conduit concentrique, l'objectif est de faire varier le débit d'air circulant dans la lame d'air et d'en observer l'impact sur la granulométrie au point haut. De la même manière que précédemment, nous allons débuter en observant l'impact de ces réglages sur les caractéristiques de l'effluent gazeux. Ainsi, le



Tableau 33 présente les résultats pour chaque configuration testée.



Tableau 33 : Caractérisation de l'effluent gazeux selon la fréquence d'aspiration ou de soufflerie de la turbine dans la lame d'air du conduit Concentrique.

Configuration	Teneur en O ₂ (%) sur fumées sèches)	CO (ppm à 13 % d'O ₂)	Température, bas, fumées (°C)	Température, haut fumées (°C)	Delta température fumées (bas-haut, °C)	Température, bas lame d'air (°C)	Température, haut lame d'air (°C)	Delta température lame d'air (bas-haut, °C)
Aspiration : 10Hz	16	62	476	390	86	131	24	107
Aspiration : 20Hz	16	63	469	367	102	149	23	126
Aspiration : 30Hz	16	62	468	358	110	132	23	109
Soufflerie : 80Hz	16	89	425	287	138	53	89	-36

Le premier élément à noter est que la modification des réglages de la turbine ne modifie en rien la composition gazeuse des fumées, ce qui montre que notre système était bel et bien étanche. En revanche, comme nous le souhaitons, cette modification modifie considérablement les gradients de température. Les trois premières configurations (aspiration 10, 20 et 30Hz) induisent un gradient de température passant de 86 à 110°C, en passant par 102°C. De plus, ces configurations représentent une véritable utilisation du conduit. En revanche, le réglage de 80 Hz en soufflerie dans la lame d'air ne représente en aucun cas un cas réel, mais nous permet d'observer ce qu'il advient aux particules avec un gradient de presque 140°C.

Comme dans la partie sur l'étude de l'évolution des particules dans le conduit (paragraphe 4.3.1.3), l'étude du conduit concentrique a montré une visualisation particulièrement claire des mécanismes de grossissement avec le réglage PC10 du MINICAST. Les résultats sont présentés Figure 60.

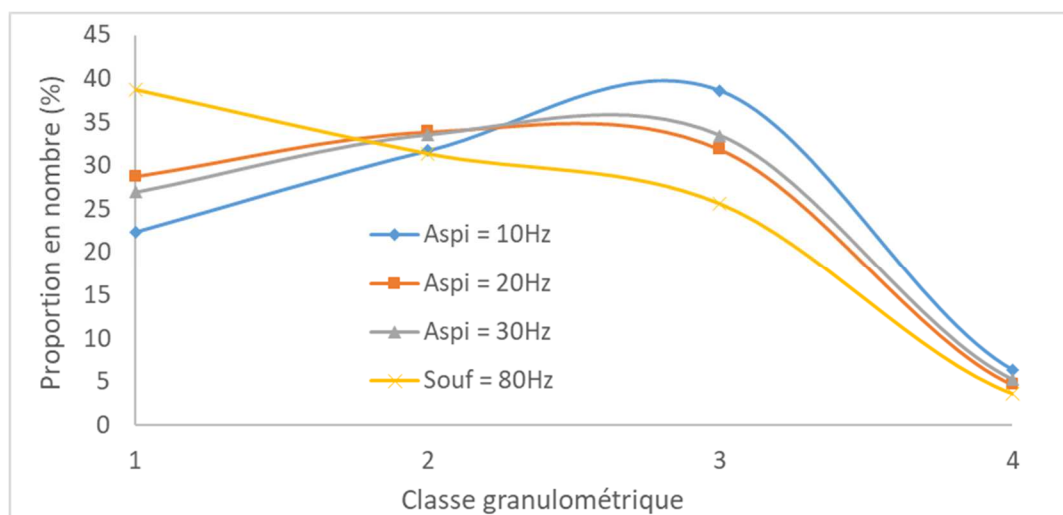


Figure 60 : Mesure de la répartition granulométrique au point haut du conduit Concentrique selon les réglages de la turbine.

Le premier élément à noter est que cette figure met bien en évidence que le réglage de la turbine, et donc du gradient de température dans le conduit Concentrique, influe de manière significative sur la distribution des particules au point haut. Ensuite, les réglages de turbine en aspiration à 20 Hz ou 30 Hz présentent des résultats extrêmement proches, qui, compte tenu de la précision de mesure, peuvent être considérés comme équivalents.



Ainsi, le résultat obtenu en proportion indique une nouvelle fois que l'augmentation du gradient de température induit une augmentation de la fraction de particules de niveau granulométrique 1, donc des plus fines. Cela sous-entend tout de même toujours la même chose : dopage des mécanismes de croissance des particules les plus fines, non-comptabilisées au point bas du fait de leur taille, qui atteignent pour partie le seuil des 30 nm au point haut et sont alors comptabilisées. Mais la Figure 61 permet une autre grille de lecture en présentant les émissions totales en nombre au point haut du conduit Concentrique selon les quatre réglages testés de la turbine.

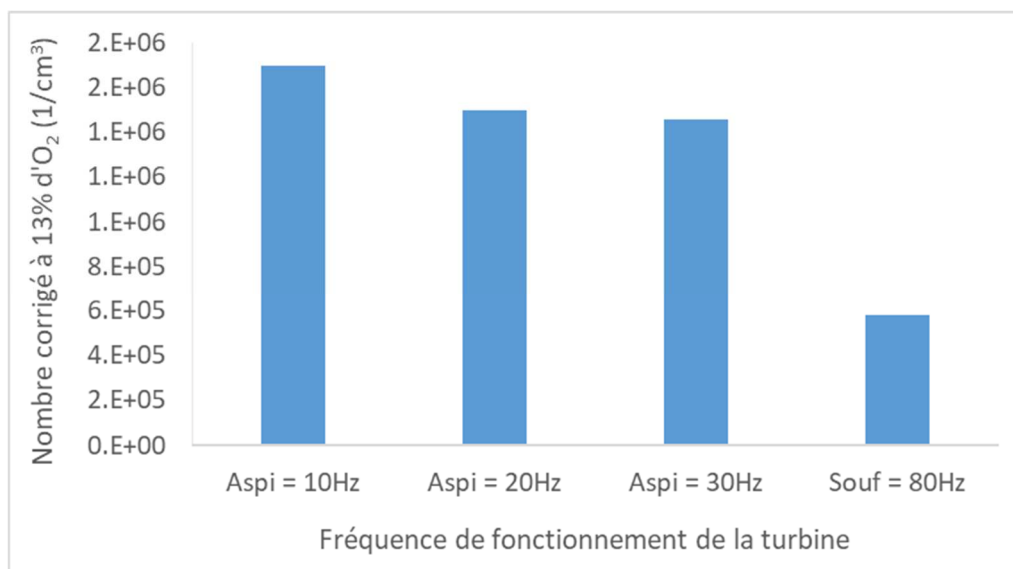


Figure 61 : Nombre total de particules au point haut du conduit concentrique en fonction des réglages de turbine avec un réglage MINICast de PC10.

Tout d'abord, on retrouve le même phénomène que sur la figure précédente, à savoir que les réglages de la turbine en aspiration à 20 Hz et à 30 Hz semblent engendrer des résultats équivalents. Ensuite, le second élément à noter est que le nombre total de particules au point haut chute de manière drastique si la fréquence de la turbine augmente, et donc si le gradient de température du conduit augmente.

Ainsi, sur cette étude, le bilan final obtenu avec le conduit concentrique est bien différent de celui obtenu avec le conduit Simple paroi. En effet, dans le cas du conduit Simple paroi, un gradient de température élevé induisait directement une augmentation du nombre de particules de niveaux granulométrique 1 au point haut, suggérant la croissance des plus petites particules, non-comptabilisées au point bas. Donc, les mécanismes de croissance semblent dominer le mécanisme de thermophorèse. Même si le conduit flexible n'a pas été étudié dans cette partie, les conclusions sur les mécanismes majoritaires dans le cas du conduit simple paroi sont sans aucun doute applicables au conduit flexible.

Avec le conduit Concentrique, le nombre de particules chute significativement si le gradient de température augmente. Dans ce conduit, c'est bien le mécanisme de thermophorèse qui serait majoritairement impacté par le gradient de température.

Afin de pouvoir mieux visualiser l'évolution des particules dans un conduit, nous avons essayé de développer un indice d'évolution, présenté ci-après.

4.4.2. L'indice d'évolution

4.4.2.1. Définition de l'Indice d'Evolution

Il semble particulièrement complexe de réussir à bien évaluer les mécanismes se déroulant dans un conduit entre son point bas et son point haut. En effet, divers mécanismes se déroulent, engendrant des résultats différents :

- Les mécanismes de croissance : ils induisent une augmentation de la taille des particules via l'agglomération, l'accumulation et l'agrégation (cf Chapitre Bibliographique) et donc soit une chute du nombre de particules si celles-ci présentaient un diamètre aérodynamique au point bas supérieur à 30 nm (puisque des particules différentes s'assemblent pour en former une seule de



taille plus importante), soit une augmentation factice du nombre de particules si celles-ci présentaient un diamètre aérodynamique au point bas inférieur à 30 nm et n'étaient donc pas comptabilisées par l'ELPI. Quoi qu'il en soit, tous sont dépendants du gradient de température ;

- Le mécanisme de thermophorèse : il induit une chute de la concentration en particules au point haut et donc un dépôt de ces particules sur le conduit et est d'autant plus important que le gradient de température augmente ;
- Les mécanismes de génération : un gradient de température très important favorise le mécanisme de nucléation et augmente ainsi le nombre de particules au point haut.

Ces mécanismes ont un seul et unique point commun : ils sont tous impactés par le gradient de température. Ainsi, nous avons créé un Indice d'Evolution (IE), défini par l'Équation 9.

$$IE_i = \frac{(\text{Nb haut ng}(i) - \text{Nb bas ng}(i))}{\text{Nb haut total} - \text{Nb bas total}}$$

Avec :

IE_i : Indice d'Evolution au niveau granulométrique i ;

Nb haut ng(i) : Nombre de particules au point haut par cm³ corrigé à 13 % d'O₂ sur le Niveau Granulométrique i ;

Nb bas ng(i) : Nombre de particules au point bas par cm³ corrigé à 13 % d'O₂ sur le Niveau Granulométrique i ;

Nb haut total : Nombre de particules totales au point haut par cm³ corrigé à 13 % d'O₂ ;

Nb bas total : Nombre de particules totales au point bas par cm³ corrigé à 13 % d'O₂ ;

Équation 9: Définition de l'Indice d'Evolution.

Cet IE ne permet en rien de déterminer quels sont les mécanismes qui se déroulent, puisque nous avons démontré que cela était bien trop complexe. Néanmoins, il permet d'observer l'évolution d'une plage granulométrique en fonction de l'évolution globale du nombre de particules.

En effet, si cet IE est positif, cela signifie que le mécanisme majoritaire dans la plage granulométrique observé est celui qui impacte le plus l'ensemble des particules émises.

S'il est négatif, cela démontre que le mécanisme majoritaire sur la plage granulométrique observée n'est pas le mécanisme majoritaire sur l'ensemble des particules émises.

4.4.2.2. Corrélation autour de l'Indice d'Evolution

L'IE ne prend pas du tout en compte le gradient de température, puisque finalement, on peut dire qu'il en évalue l'impact. Ainsi, nous pouvons essayer de faire corrélérer cet IE en fonction du nombre total de particules émis divisé par le gradient de température.

Le premier élément à prendre en compte est que l'observation de l'IE est intéressante sur les trois premiers niveaux granulométriques. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, c'est dans ces niveaux granulométriques que les mécanismes d'évolutions, quels qu'ils soient, se déroulent majoritairement.

Le second élément est que nous avons pu visualiser est que selon les conduits, les réactions se déroulaient plus pour un niveau granulométrique que pour un autre. Ainsi, nous allons essayer d'observer l'évolution de l'IE du/des niveau(x) granulométrique(s) défini(s) dans le chapitre 0.

Bien entendu, nous avons aussi pu vérifier que chaque conduit se comportait de manière drastiquement différente. Ainsi, nous observerons ces résultats conduit par conduit, quitte à réduire le nombre de points par graphique. Néanmoins, toutes les configurations d'un conduit figureront sur les courbes.

Ainsi, selon tous ces éléments, le niveau granulométrique le plus variable dans le cas du conduit Simple paroi était le niveau granulométrique 2, pour lequel semblaient s'exprimer le plus les mécanismes de croissance. La Figure 62 présente les résultats de l'Indice d'Evolution pour ce niveau (appelé IE2).



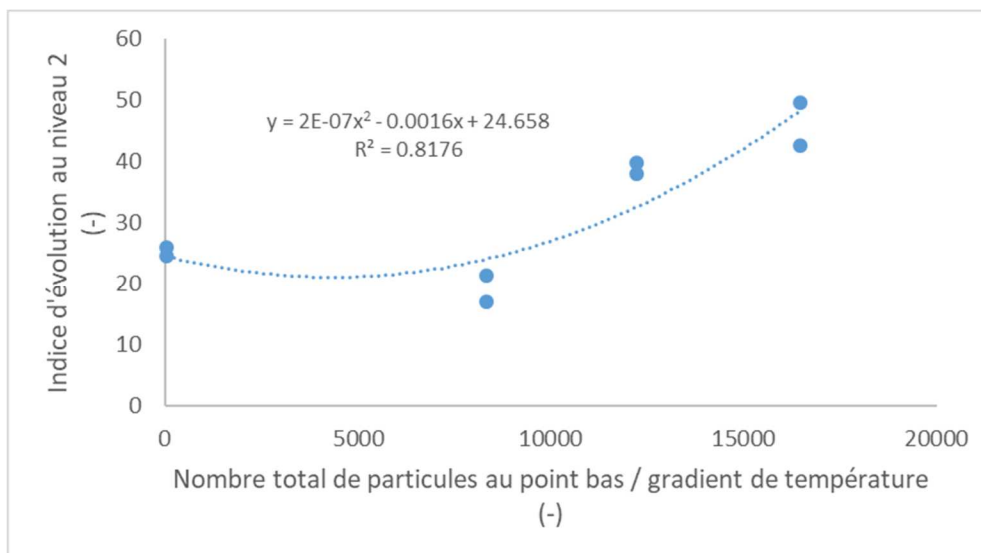


Figure 62 : Evolution de l'IE2 en fonction du nombre total de particules au point bas divisé par le gradient de température pour le conduit Simple paroi.

Tout d'abord, l'IE2 pour le conduits Simple paroi est toujours positif. Cela valide le fait que ce niveau granulométrique est bien représentatif de l'évolution de l'ensemble des particules. Ensuite, les évolutions des particules dans le conduit Simple paroi au niveau granulométrique deux semblent bien directement liées au gradient de température.

Pour le conduit Flexible, même si les points sont moins nombreux, nous avons tout de même réalisé cette même courbe. Dans le cas de ce conduit, nous avons pu voir que le niveau un évoluait énormément (sans doute du fait de la croissance de nanoparticules non comptabilisées au point bas). Nous choisissons donc d'observer la somme IE1 + IE3. La Figure 63 présente le résultat obtenu.

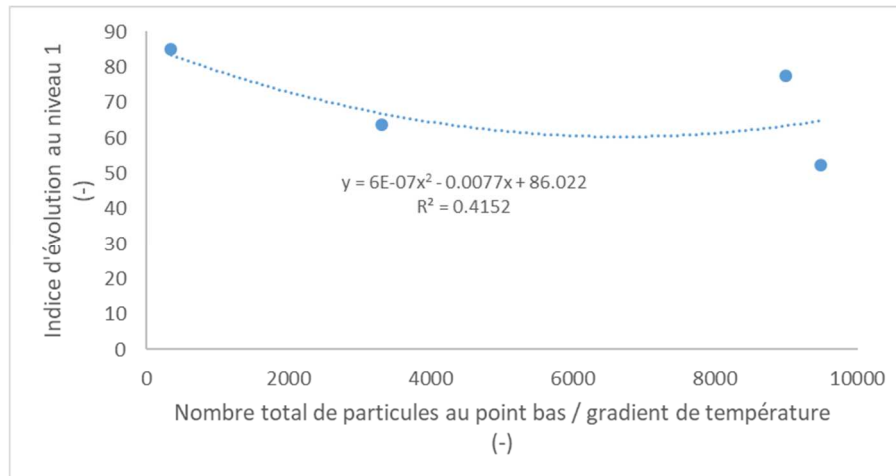


Figure 63 : Evolution de l'IE1+IE3 en fonction du nombre total de particules au point bas divisé par le gradient de température pour le conduit Flexible.

De la même manière, l'IE est toujours positif, prouvant que nous observons bien le mécanisme majoritaire : la croissance des nanoparticules. Même s'il n'y a que quatre points sur cette courbe, une tendance est tout de même présente. C'est une fois de plus le gradient de température qui a le plus influé sur ces plages granulométriques. Néanmoins, du fait d'un grand nombre de particules ultrafines non comptabilisées au point bas qui le sont au point haut (du fait du mécanisme de croissance), la thermophorèse est camouflée par l'observation du nombre. Ainsi, la conclusion reste très fragile sur ce type de conduit.

Pour le conduit Concentrique, nous avons observé les mécanismes sur les mêmes niveaux granulométriques que pour le conduit Simple paroi, mais de manière plus prononcée (Figure 64).



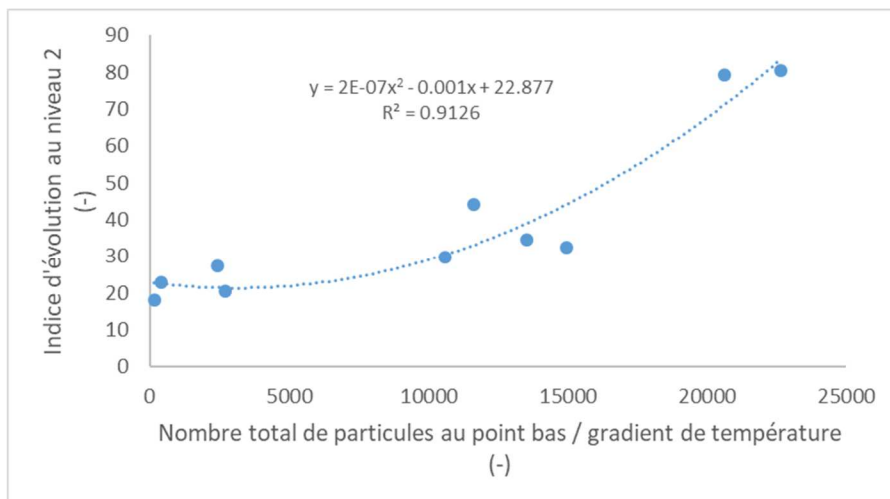


Figure 64 : Evolution de l'IE2 en fonction du nombre total de particules au point bas divisé par le gradient de température pour le conduit Concentrique.

Le bilan est le même, avec cette fois beaucoup plus de points.

Ainsi, nous pouvons affirmer que le paramètre le plus impactant, quels que soient le conduit, le type de particules dans le conduit, le mécanisme observé, etc..., est le gradient de température.

Éléments à retenir :

- Au sein d'un même conduit, le gradient de température modifie significativement la distribution granulométrique des particules au point haut.
- Dans le cas du conduit Concentrique, plus le gradient de température est élevé, plus la thermophorèse est forte.
- Dans les cas des conduits Simple paroi et Flexible, plus le gradient de température est élevé, plus les mécanismes de croissance sont forts.
- L'étude de l'Indice d'Évolution en fonction du gradient de température permet de valider le fait que le gradient de température est le paramètre qui influence le plus les différents mécanismes préalablement cités.



4.5. Conclusion / Perspectives

Pour mener à bien cette troisième partie du projet, une plateforme expérimentale a été élaborée. Un générateur de particules, dont la stabilité et la reproductibilité ont été validées, a permis de générer un flux de particules dans un conduit. Ces particules évoluaient dans un effluent gazeux composé des gaz de combustion issus d'un brûleur gaz. L'ensemble a été dimensionné pour obtenir des vitesses de fumées dans le conduit comprises entre 0,5 et 1 m/s, soit les vitesses classiquement observées dans des installations réelles en tirage naturel. De plus, le brûleur gaz permettait de générer un effluent gazeux proche de celui de la combustion de bois bûches, notamment en O₂, CO₂ et H₂O. Néanmoins, la teneur en CO est plus faible, et il n'y a pas de COV dans l'effluent.

Sur cette plateforme, un ELPI permettait de mesurer la distribution en nombre des particules au point bas et au point haut, sans faire varier la longueur de la ligne chauffée le reliant au conduit (point clé).

Trois types de conduits ont été testés sur cette installation : un conduit Simple paroi, un Flexible et un Concentrique. Plus de 70 essais ont été menés sur cette installation.

Le conduit Simple paroi et le conduit Concentrique se comportent de manière équivalente. Un grossissement significatif des particules est visualisé sur les niveaux granulométriques les plus fins.

En revanche, le conduit Flexible induit, du fait de ses parois non lisses, un gradient de température beaucoup plus important. Ce gradient de température enclencherait des mécanismes de croissance très importants dans le conduit, et permettrait aux particules les plus fines (<30 nm, non détectées par l'ELPI au point bas) de croître.

En plus des mécanismes de croissance, le mécanisme de thermophorèse a été mis en évidence dans le cas du conduit Simple paroi et du conduit Concentrique via un nombre de particules plus faibles au point haut qu'au point bas. Néanmoins, c'est sans doute dans le conduit Flexible que la thermophorèse est la plus importante. En effet, même si la visualisation de ce mécanisme est masquée par la croissance accrue des nanoparticules non comptabilisées au point bas, la surface de contact avec les fumées par mètre de conduit est beaucoup plus élevée dans le cas du conduit Flexible, et le gradient de température (lui aussi beaucoup plus élevé avec ce conduit) est un paramètre qui impacte le mécanisme de thermophorèse. Pour preuve, même si ce mécanisme n'était pas visible sur les courbes avec le conduit Flexible, ce conduit était clairement le plus chargé en particules lors du démontage. Ainsi, les différents types de conduits induisent des évolutions différentes des particules.

Ensuite, une étude approfondie sur l'impact du gradient de température a montré que, au sein d'un même conduit, il modifie significativement la distribution granulométrique des particules au point haut. En effet, dans le cas du conduit Concentrique, plus le gradient de température est élevé, plus la thermophorèse est forte. En revanche, dans le cas du conduit Simple paroi, plus le gradient de température est élevé, plus les mécanismes de croissance sont forts.

Pour bien appréhender l'évolution des particules, nous avons alors défini par calcul un Indice d'Evolution, propre à chaque classe granulométrique de chaque essai sur chaque conduit. **L'étude de cet Indice d'Evolution en fonction du gradient de température permet de valider le fait que le gradient de température est le paramètre qui influence le plus les différents mécanismes, qu'il s'agisse de mécanismes de croissance ou de thermophorèse.**

Ainsi, tous les mécanismes d'évolution des particules dans un conduit sans COVT ont été mis en évidence. Le paramètre le plus impactant est le gradient de température, qui dope ces mécanismes. L'état de surface du conduit est donc un point clé, puisqu'il favorise ou non les échanges avec l'extérieur, et joue donc un rôle significatif sur le gradient de température. Tout ceci peut être schématisé de manière générale, comme sur la Figure 65.

L'objectif de la partie suivante (§5), est de créer des conduits prototypes regroupant les qualités des meilleures solutions, déterminées dans la partie (§3), tout en jouant davantage sur le gradient de température, afin de favoriser le stockage des particules sur le conduit via la thermophorèse et d'augmenter la taille des particules restantes à l'émission.

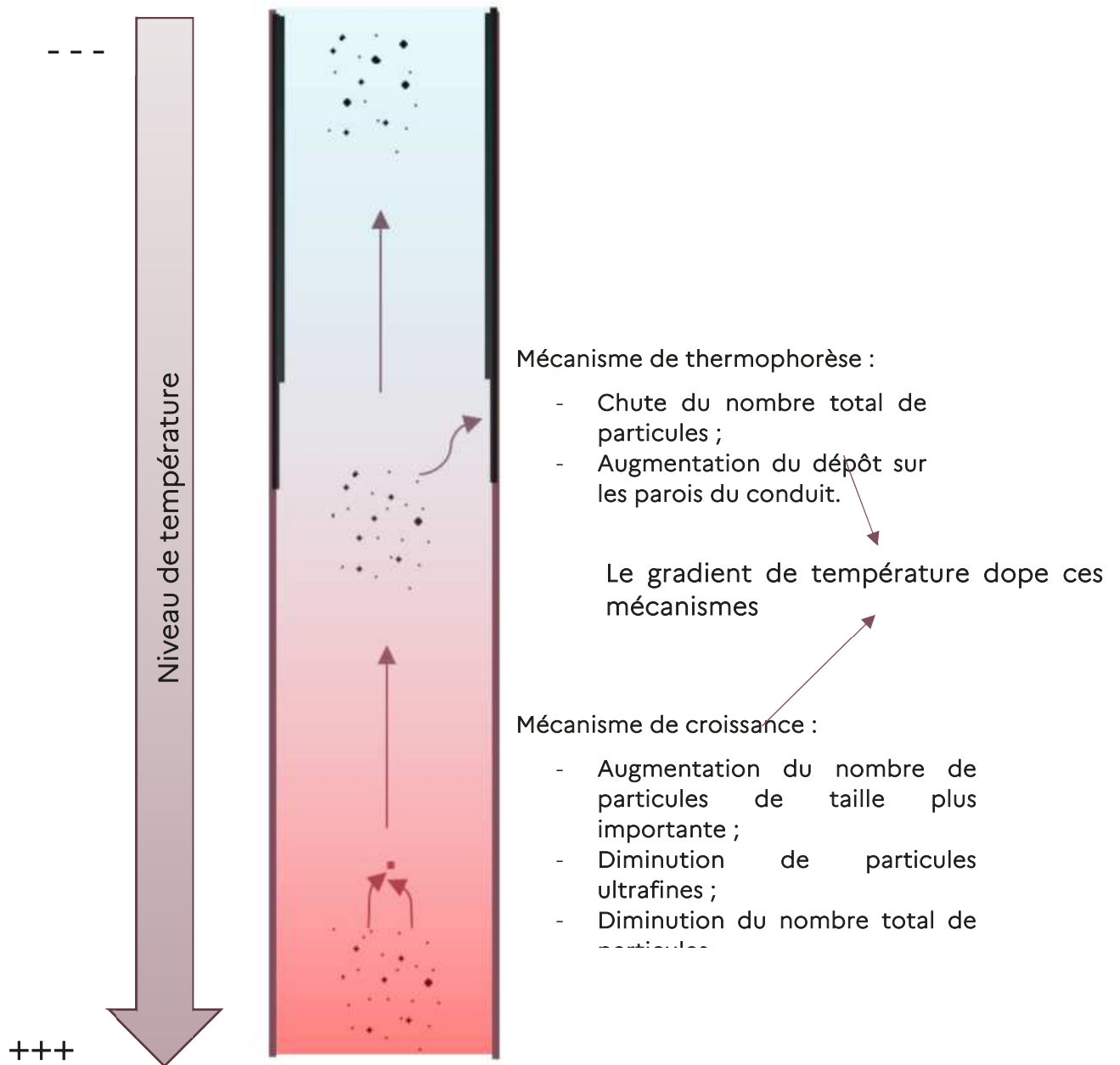


Figure 65 : Schéma général des mécanismes d'évolution des particules dans un conduit de fumées.

5. Prototypes et tests en conditions réalistes

Ce chapitre concerne la réalisation de mesures simulant des conditions réalistes (tirage naturel, allures, rechargements) de fonctionnement sur des prototypes de conduits regroupant les avantages de chacune des solutions précédemment évaluées. L'objectif ici consiste à explorer les pistes d'optimisation déterminées grâce aux résultats des tâches précédentes afin de favoriser :

- Un tirage régulé ;
- Le refroidissement de la fumée par le conduit de raccordement ;
- Une restitution d'énergie dans la pièce par le conduit de raccordement.

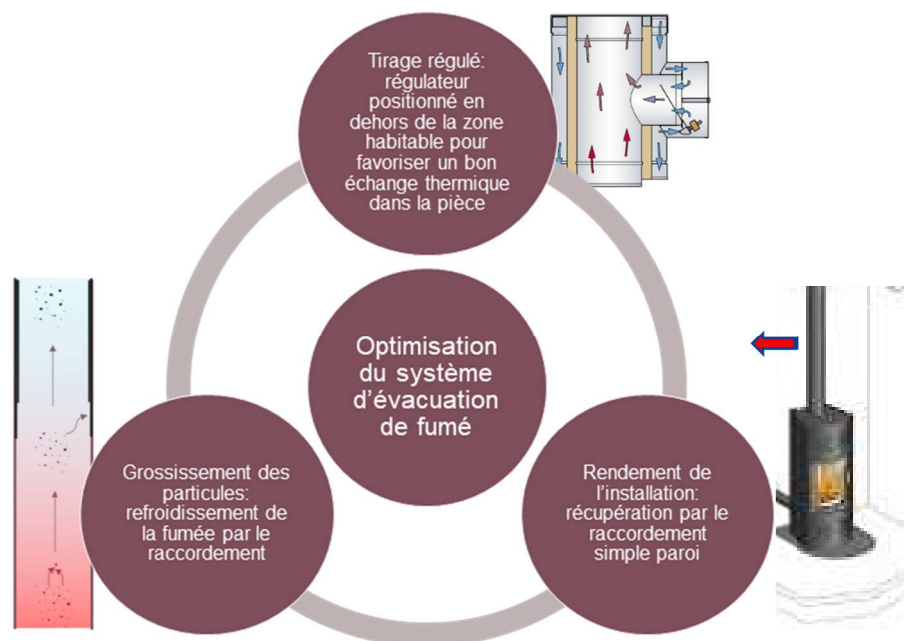


Figure 66 - Fonctions recherchées pour les essais de prototypes

Les mesures ont été réalisées selon le même protocole que pour l'étude de l'impact des conduits sur la combustion 3.1.3 de manière à pouvoir comparer les résultats obtenus et les améliorations apportées par ces nouvelles solutions d'évacuation.

5.1. Méthodologie

5.1.1. Les échantillons testés dans la tâche 5 de l'étude BOICLEAN

5.1.1.1. Le poêle à bûches 2018

Compte tenu des prototypes de solution de fumisterie évalués dans cette tâche, et de la nécessité d'utiliser un poêle à bûche étanche avec le conduit concentrique triple paroi isolé, le poêle 2018 est choisi pour ces essais.

5.1.1.2. Les combustibles

Les bûches utilisées sont identiques à la tâche 3 (3.1.2.3). Ce sont des bûches de longueur 25 cm de classe H1/G1. Leur PCI est de 14 824 kJ/kg et leur humidité de 14% sur brut.

5.1.1.3. Les conduits

Les solutions de fumisterie sont des « prototypes » basés sur des gammes préexistantes. Elles permettent d'explorer les solutions d'optimisations précédemment évoquées mais ne sont pas nécessairement réalistes au regard des réglementations d'installation en vigueur. La qualité de combustion optimale (à la buse) ayant été observée avec le conduit concentrique triple paroi isolé dans le chapitre précédent, c'est celui-ci qui servira de base aux prototypes testés. En effet, ce conduit permet de préchauffer l'air comburant, ce qui améliore le fonctionnement du poêle. Cependant, les résultats des tâches 5 et 6 montrent aussi l'intérêt de créer un gradient de température de fumée important (pour le rendement global de l'installation et pour les émissions), ce qui n'est pas le cas pour le conduit triple paroi isolé du commerce (isolé toute hauteur). La partie « raccordement », visible dans la pièce d'utilisation, a donc été modifiée, et conformément aux conclusions de la tâche 4 (4.5), deux types de raccordement (simple paroi et flexible double-peau) ont été étudiés. En complément de l'impact positif du préchauffage de l'air (sur le rendement et les émissions de l'appareil en lui-même) apporté par le conduit concentrique triple paroi, l'objectif de ces nouveaux essais est donc de tester :

- L'optimisation de la récupération d'énergie dans la pièce d'installation en séparant le flux de fumée et celui d'air comburant au niveau du plafond à l'aide d'un séparateur de flux spécifique.
- L'impact d'un gradient de température important sur la formation des particules (favorisé par les raccordements simple paroi, émaillé et flexible).
- L'impact du positionnement du régulateur au-dessus de la pièce d'installation du poêle (ce qui devrait favoriser la récupération d'énergie dans la pièce tout en permettant au poêle de fonctionner à un régime optimal).

Pour remplir ces objectifs, deux prototypes sont évalués, schématisés dans la Figure 67.

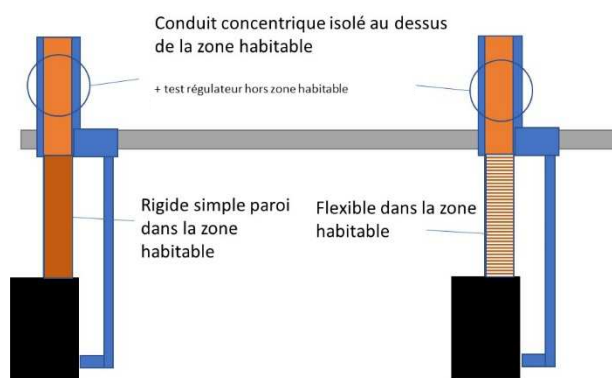


Figure 67 : Schéma des prototypes.

Les conditions mises en œuvre pour les expériences réalisées sur ces prototypes sont récapitulées dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Détail des expériences réalisées sur les prototypes.

Expérience	Appareil	Montage	Gammes de conduits (raccordement + CdFumée)	Hauteur	Régulateur
15	2018 (Emeraude 4)	Raccordement simple paroi + Conduit concentrique	Fumisterie Emaillée + Conduit concentrique triple paroi	8	Oui (positionné à l'étage)
16		Raccordement flexible + Conduit concentrique	Flexible double + conduit concentrique triple paroi		

La Figure 68 présente des photographies des deux montages « prototypes » et de la partie extérieure commune (dans l'ordre de lecture gauche à droite : « Raccordement » émaillé + évacuation conduit concentrique triple paroi, « Raccordement » flexible + évacuation conduit concentrique triple paroi, extérieur (régulateur et conduit concentrique triple paroi)).



Figure 68 : Photos des montages réalisés (source CERIC).

5.1.2. Le protocole d'essais et les mesures effectuées

Pour chaque expérience réalisée, deux cycles types (minimum) sont réalisés d'après le plan de la tâche 5 (sauf pour les expériences 17 et 18). Des mesures en continu ou ponctuelles sont réalisées pendant les allumages, les charges nominales et les charges partielles. Ces mesures sont de nouveau réalisées au niveau du plafond et à l'évacuation.

5.2. Bilan / Principaux résultats obtenus

Pour cette tâche, les résultats sont présentés de manière exhaustive puis analysés par comparaison aux expériences précédemment réalisés dans la tâche 3.

5.2.1. Résultats généraux de combustion (émissions gazeuses et rendement)

5.2.1.1. Résultats en termes de températures et tirages

Pour chaque expérience, les résultats en termes de niveaux de températures et de tirages pour les allumages, allures nominales et allures réduites sont présentés dans le Tableau 35.

Plusieurs différences notables sont observées.

Concernant le tirage :

- **Le changement de position du régulateur** (à l'étage alors qu'il était précédemment au-dessus de la buse du poêle) nécessite de modifier son réglage d'ouverture (à des seuils inférieurs). Le réglage initial ne permettait pas au régulateur de s'ouvrir suffisamment, des essais ont donc été nécessaires pour l'ajuster. Ceci peut s'expliquer en partie par les pertes de charges supplémentaires sur l'air comburant apportées par l'élément prototype permettant de séparer

les flux de fumée et d'air. Ce défaut pourrait être réduit en adaptant la conception de cet élément de séparation de flux ou en adaptant le régulateur à son nouveau positionnement.

Concernant les niveaux de températures :

- Alors qu'elle n'était que de 58°C en nominal pour l'expérience 8 (conduit concentrique toute hauteur), la différence de température entre la buse et le plafond a atteint plus de 196°C pour l'expérience 15 (raccordement émaillé + concentrique) et plus de 134 °C pour l'expérience 16 (raccordement flexible + concentrique). Ces gradients de température plus importants correspondent aux objectifs attendus pour ces prototypes.
- Le gradient de température le plus important était cependant espéré pour le raccordement flexible, puisque c'est ce type de conduit qui semblait perdre le plus d'énergie lors de la tâche 4 (comparé au conduit simple paroi inox). Il semblerait que le conduit émaillé (non évalué dans la tâche 3) soit finalement tout aussi intéressant d'un point de vue de sa restitution de chaleur. Ce résultat montre aussi qu'il serait probablement encore possible d'optimiser la restitution d'énergie du conduit de raccordement (en modifiant l'un des deux prototypes testés par exemple).

Tableau 35 : Résultats de températures et tirages avec les deux prototypes.
(All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

Expérience	Phase	Temp air comburant [°C]	Temp buse [°C]	Temp des fumées au plafond [°C]	Delta Temp plafond – Temp buse [°C]	Temp des fumées à l'évacuation [°C]	Temp extérieure [°C]	Tirage [Pa]
15 Raccordement simple paroi + Conduit concentrique	All	52,3	458,2	294,8	-163,4	148,2	18,4	-18,1
	Nom	70,1	459,1	262,6	-196,5	115,4	20,3	-17,7
	Red	64,8	423,1	236,1	-187	103,9	21,7	-17,0
16 Raccordement flexible + Conduit concentrique	All	65,7	518,0	394,3	-123,7	181,6	22,1	-19,9
	Nom	75,6	448,4	314,1	-134,3	137,7	22,5	-19,3
	Red	74,7	410,2	281,2	-129	128,3	22,2	-18,0

5.2.1.2. Résultats de rendement par expérience

Pour chaque expérience, les résultats de rendements pour les allumages, allures nominales et allures réduites sont présentés dans le Tableau 36.

Tableau 36 : Rendement calculé avec les deux prototypes.
(All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

Expérience	Phase	Moyenne de Rendement au niveau de l'appareil [%]	Moyenne de Rendement au niveau du plafond [%]	Min. de Rendement au niveau du plafond [%]	Max. de Rendement au niveau du plafond [%]
15 Raccordement simple paroi + Conduit concentrique	All	61,6	74,9	74,9	74,9
	Nom	63,8	79,8	78,5	80,7
	Red	63,9	80,5	80,3	80,7
16 Raccordement flexible + Conduit concentrique	All	61,9	71,3	70,4	72,2
	Nom	62,1	73,8	72,1	74,6
	Red	60,8	73,5	71,7	74,8

Les valeurs maximales de rendement au niveau du plafond en allures nominales ont été en moyenne de 80,7 % pour l'appareil de 2018 (pour 80 % annoncés par le fabricant en conditions normalisées : régime établi, allure nominale, conditions optimales).

La Figure 69 présente un diagramme d'évolution des rendements pour ces deux nouvelles expériences.

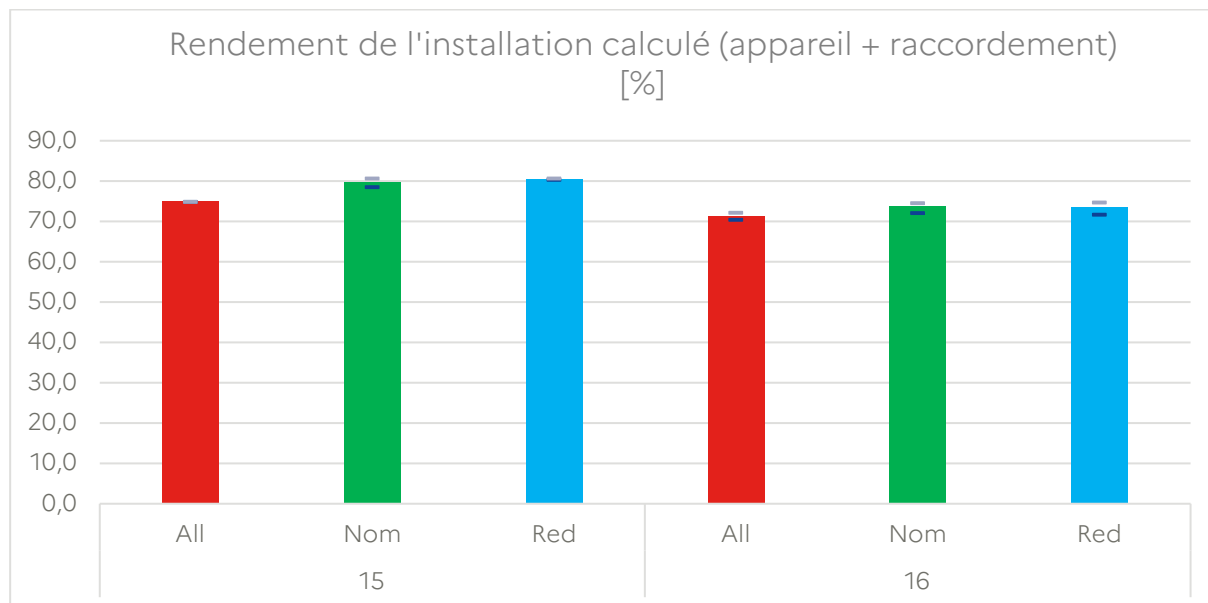


Figure 69 : Rendement calculé au niveau du plafond.
(All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

La Figure 70 montre graphiquement les valeurs des écarts entre les rendements calculés au niveau du plafond et au niveau de la buse du poêle. Ils reflètent donc le gain de rendement apporté par le conduit de raccordement ou la partie de conduit située dans la pièce chauffée. En allure nominale, ils sont de 16 points pour l'expérience 15 (raccordement simple paroi émaillée + conduit concentrique triple paroi avec régulateur à l'étage) et de près de 12 points pour l'expérience 16 (raccordement flexible + conduit concentrique triple paroi avec régulateur à l'étage).

Ces nouvelles expériences placent les prototypes testés parmi les solutions de raccordement permettant un fort gain de rendement (restitution d'énergie dans la zone habitable). Compte tenu de leurs rendements de combustion (à la buse) déjà optimisés, ces prototypes ont rempli les objectifs de performance énergétique.

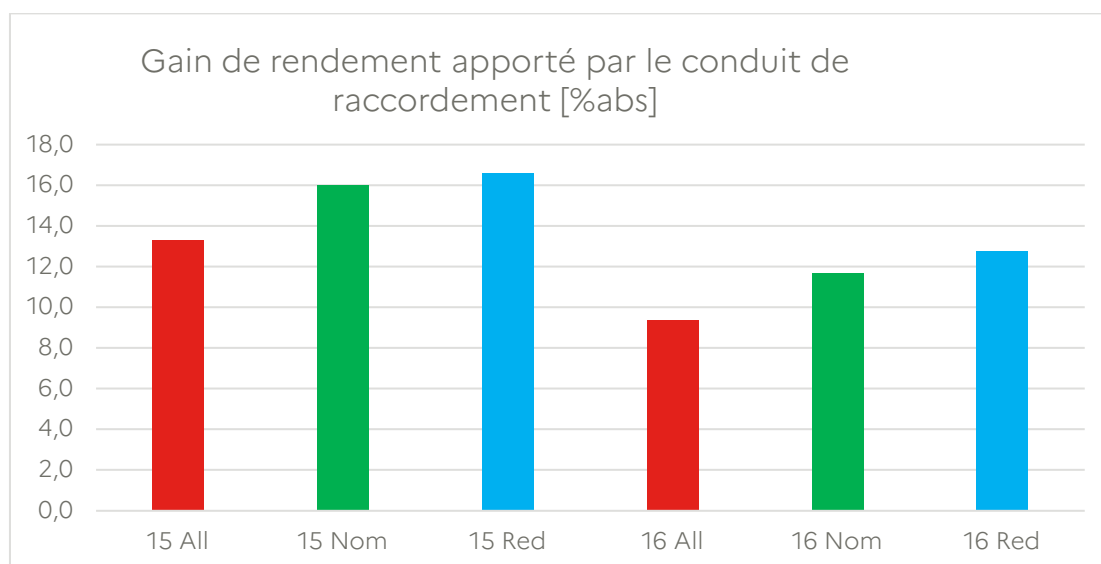


Figure 70 : Gains de rendement apportés par le conduit de raccordement.
(All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)

5.2.1.3. Résultats généraux d'OC/EC en allure nominale

Pour chaque expérience, les résultats des teneurs en OC/EC sont présentés dans le Tableau 37.

Tableau 37 : Emissions d'OC/EC avec les deux prototypes..

Expérience	Position	OC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	EC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	TC [mg/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	Ratio OC/EC
15 Raccordement simple paroi + Conduit concentrique	Raccordement	0,1	0,5	0,6	0,6
	Evacuation	0,1	0,2	0,3	0,4
16 Raccordement flexible + Conduit concentrique	Raccordement	0,1	0,3	0,4	0,5
	Evacuation	0,1	0,1	0,2	0,7

Les résultats sont assez stables et montrent que les émissions d'OC sont constantes, quel que soit le point de prélèvement. En revanche, les émissions de EC sont toujours au minimum deux fois plus faibles au point haut (évacuation) qu'au point bas (raccordement), montrant que des phénomènes de dépôts ou de thermophorèse se sont déroulés. Ce résultat est donc tout à fait concordant avec nos conclusions précédentes.

Pour chaque expérience, les résultats de COV sont présentés dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Emissions de COV avec les deux prototypes..

Expérience	Position	CH ₄ [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	COVT [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	CH ₄ /COVT
15 Raccordement simple paroi + Conduit concentrique	Raccordement	17,0	68,4	0,2
	Evacuation	29,4	78,5	0,4
16 Raccordement flexible + Conduit concentrique	Raccordement	18,2	96,5	0,2
	Evacuation	16,9	53,9	0,3

Les émissions de COV sont faibles et assez stables, avec un rapport CH₄/COVT moyen de 33 % (valeur classiquement observée lors d'une combustion bien contrôlée). En revanche, la raison pour laquelle les écarts entre le point de prélèvement bas et le point haut n'est pas claire, et aucune tendance ne ressort de ces mesures. Cela concorde avec les résultats obtenus dans la partie 3.3.2.

5.2.2. Les résultats généraux d'émissions de particules

5.2.2.1. Les TSP

Pour chaque expérience, les résultats d'émissions de particules totales (TSP) sont présentés dans le Tableau 39. Pour mieux visualiser ces résultats, la Figure 71 les présente sous forme d'histogrammes.

Les valeurs minimales d'émissions de TSP au niveau du plafond en allure nominale et en conditions d'essais (protocole de type BeReal, en tirage naturel...) ont été en **moyenne** de 20,7 mg/Nm³ pour l'appareil de 2018 pour l'expérience 15 (pour 25 mg/Nm³ annoncés par le fabricant en conditions normalisées : régime établi, allure nominale, conditions optimales).

Pour les expériences 15 et 16, nous pouvons observer une augmentation de la quantité de TSP entre la partie raccordement (plafond) et l'évacuation (au niveau du terminal). Cette augmentation peut avoir plusieurs origines :

- Le régulateur étant placé entre les deux points de mesures pour ces expériences, les conditions de prélèvement y sont donc différentes (taux d'O₂). Le point au niveau de l'évacuation possède

donc une correction plus importante pour rapporter le résultat à 13% d'O₂ (incertitude sur le résultat plus élevée).

- Ces différences de conditions (augmentation du taux d'O₂, abaissement de la température à une centaine de degrés) provoquent certainement des évolutions sur ces particules (formation de particules secondaires).

Tableau 39: Emissions de TSP avec les deux prototypes.
(All: Allumage; Nom: Nominal; Red: Réduit)

Expérience	Phase	Moyenne de TSP au plafond [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Nombre de prélèvements	Moyenne de TSP à l'évacuation [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Nombre de prélèvements	Gradient de TSP (évacuation/plafond) [mg/Nm ³ à 13 % O ₂]	Gradient de TSP (évacuation/plafond) [évolution en %]
15 Raccordement simple paroi + Conduit concentrique	All	73,7	1	94,6	1	20,9	28%
	Nom	20,7	2	24,3	2	3,6	17%
	Red	31,9	2	35,7	1	3,8	12%
16 Raccordement flexible + Conduit concentrique	All	44,0	2	75,6	2	31,6	72%
	Nom	22,8	3	32,9	3	10,1	44%
	Red	44,0	2	55,5	2	11,5	26%

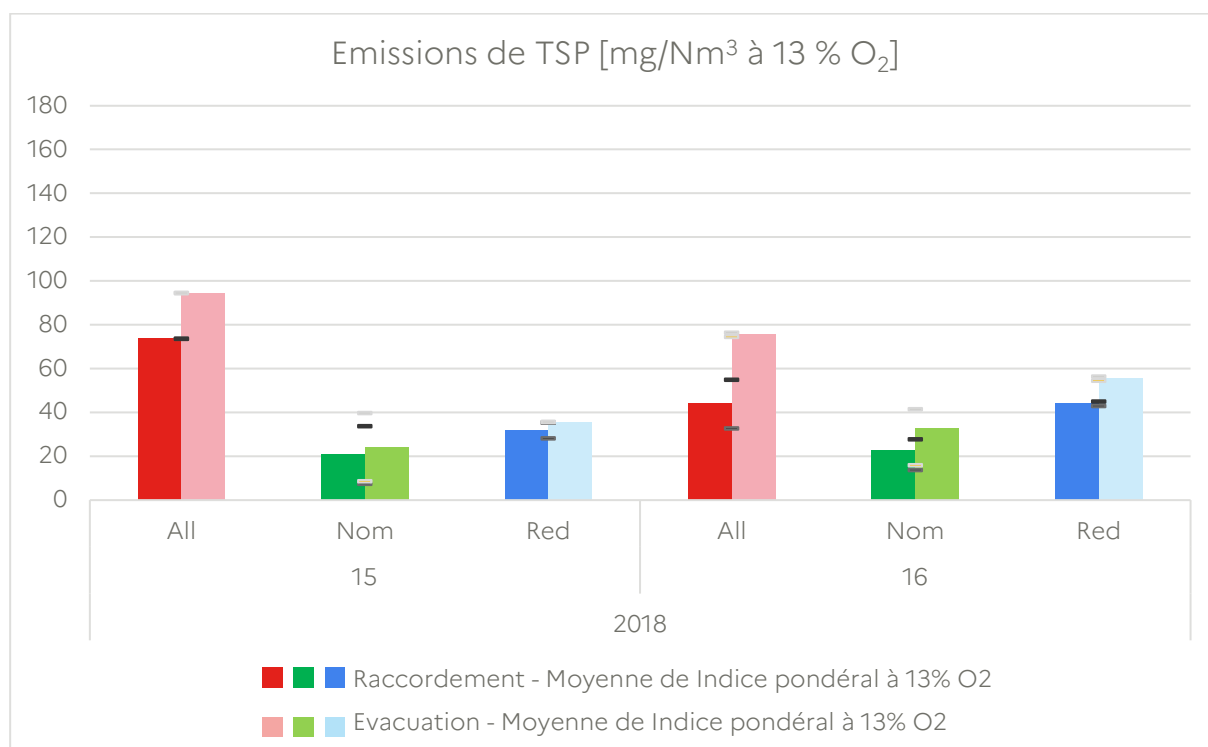


Figure 71: Emissions de TSP avec les deux prototypes.
(All: Allumage; Nom: Nominal; Red: Réduit)

5.2.2.2. Répartition granulométrique ELPI (nominal)

Grâce aux mesures réalisées par l'intermédiaire de l'appareil ELPI, pour chaque expérience, les résultats de répartition granulométrique des particules dans les fumées sont présentés dans le Tableau 40. La position « Raccordement » correspond à la mesure effectuée dans la zone habitable (avant le plafond).

La position « Evacuation » correspond à la mesure réalisée dans le dernier élément de conduit (avant le terminal d'évacuation de fumée).

Tableau 40 : Résultats ELPI avec les deux prototypes.

Expérience	Position	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp	Dp
		0,04 µm [%]	0,07 µm [%]	0,12 µm [%]	0,20 µm [%]	0,31 µm [%]	0,48 µm [%]	0,76 µm [%]	1,22 µm [%]	1,95 µm [%]	3,08 µm [%]	5,14 µm [%]	8,10 µm [%]
15 Raccordement simple paroi + Conduit concentrique	Raccordement	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Evacuation	0,3	32,1	36,5	18,4	7,0	3,4	1,8	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
16 Raccordement flexible + Conduit concentrique	Raccordement	1,7	22,6	38,2	21,1	9,7	4,6	1,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
	Evacuation	0,8	7,6	32,7	27,4	17,7	10,2	3,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0

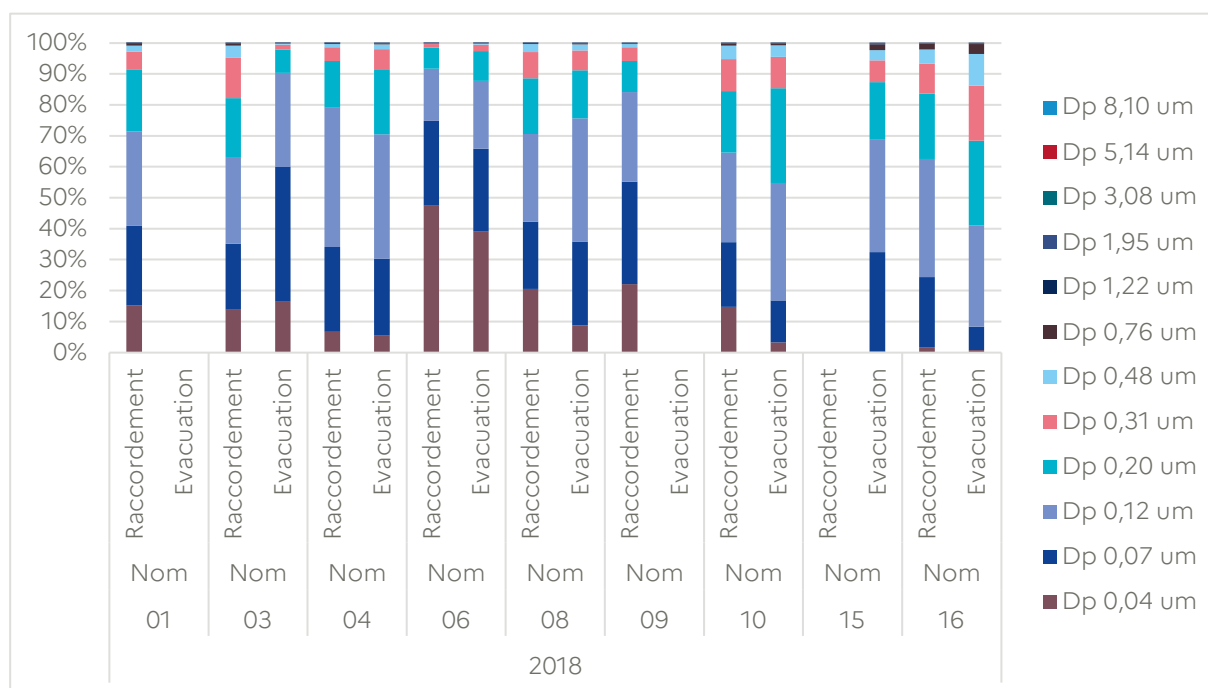


Figure 72 : Répartition granulométrique ELPI.
(Nom : Nominal)

Pour des raisons techniques de pertes d'acquisition de données pour certaines expériences, certaines données n'ont pas été exploitables (exp 15). La Figure 72 présente les résultats comparés aux expériences précédentes sous forme d'histogramme pour faciliter leur lecture.

On observe, pour ces nouvelles expériences 15 et 16, que la proportion de particules les plus fines (Dp 0,04) est moins importante que pour les expériences précédentes. En plus de la diminution de quantités de TSP mesurée auparavant, les prototypes permettent aussi de réduire le nombre de particules les plus fines. Cela est tout à fait en cohérence avec les résultats obtenus précédemment et avec l'objectif des prototypes développés, montrant l'importance du gradient de température.

5.2.3. Synthèse

Afin de visualiser les différences de performances entre les prototypes et les solutions de fumisteries précédemment évaluées, les principaux résultats obtenus en puissance nominale avec les conduits de

hauteur 8 m sont synthétisés dans les tableaux suivants. Les expériences réalisées avec des hauteurs différentes sont volontairement exclues de cette synthèse. Le Tableau 41 présente ces résultats.

Tableau 41: Synthèse des rendements en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018

Expérience	Montage (Raccordement + CdFumée)	Moyenne de Rendement au niveau de l'appareil [%]	Moyenne de Rendement au niveau du plafond [%]	Min. de Rendement au niveau du plafond [%]	Max. de Rendement au niveau du plafond [%]	Moyenne de tirage [Pa]
03	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Sans régulateur	47,0	62,0	56,9	67,0	-33,8
04	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Avec régulateur	60,1	58,7	56,9	61,1	-21,5
08	Conduit concentrique triple paroi 8m Sans régulateur	60,1	60,8	56,0	64,9	-17,2
09	Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur	62,8	59,8	55,0	63,8	-10,6
15	Raccordement simple paroi + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	63,8	79,8	78,5	80,7	-17,7
16	Raccordement flexible + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	62,1	73,8	72,1	74,6	-19,3

Le prototype le plus performant sur les rendements nominaux au niveau du poêle (représentatif de la qualité de combustion) est le « Raccordement simple paroi + conduit concentrique triple paroi avec régulateur à l'étage ». Il permet un gain de 16,8 points par rapport à la solution traditionnelle la moins performante.

Le prototype le plus performant sur les rendements nominaux au niveau du plafond (représentatif du rendement global de l'installation) est aussi le « Raccordement simple paroi + conduit concentrique triple paroi avec régulateur à l'étage ». Il permet un gain de 19,6 points par rapport à la solution traditionnelle la moins performante.

Nous supposons, à la vue des résultats de la partie 4.3.1.2.6, que le conduit flexible induirait plus de gradient de température que le conduit rigide du fait de sa surface. Or, contrairement aux essais sur banc qui ont tous été réalisés avec des conduits inox non revêtus, dans cette série d'essai en conditions réalistes, le conduit de raccordement simple paroi était émaillé noir. Les températures ambiantes étant sensiblement identiques pendant les deux séries d'essais, cette différence de nature pourrait expliquer la surperformance du conduit émaillé mesurée (échange thermique avec la pièce plus important que prévu). Ces résultats montrent, quoi qu'il en soit, que des optimisations de ces échanges thermiques sont encore possibles en travaillant sur la géométrie et le revêtement du conduit de raccordement.

De manière à visualiser l'impact des prototypes sur les émissions de TSP, le Tableau 42 présente les facteurs d'émissions TSP obtenus pour tous les essais réalisés avec l'appareil de 2018.

Le prototype le plus performant sur la réduction des émissions de TSP au niveau du plafond est le « Raccordement simple paroi + conduit concentrique triple paroi avec régulateur à l'étage ». Il permet une réduction de 79% par rapport à la solution traditionnelle la moins performante.

Les conclusions concernant les performances d'émissions à l'évacuation sont plus compliquées à déterminer. En effet, pour certaines expériences (3 ;4 ;8 ;9), la composition gazeuse et la vitesse de fumée a peu évolué entre le bas et le haut du conduit. En revanche, pour les expériences 15 et 16, le régulateur a été positionné entre les deux points de prélèvement, modifiant significativement les conditions dans le conduit. Cette modification génère nécessairement des impacts, difficiles à dissocier, à la fois sur la qualité de la mesure (écart à l'isocinétisme et à la correction d'O₂) et sur l'évolution des particules (mécanismes de formation et dépôts, ré-envols). Il est cependant intéressant de noter, qu'hormis les

expériences 9 et 16 pour lesquelles la valeur absolue des évolutions entre le point bas et haut ont été supérieures ou égales à 10 mg/Nm³, les évolutions pour les autres expériences étaient plus limitées (entre 1 et 4 mg).

Tableau 42: Synthèse des températures de fumée et émissions de TSP en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018.

Expérience	Montage (Raccordement + CdFumée)	Position	Moyenne de Température de fumée [°C]	Moyenne de TSP [mg/Nm ³ à 13 % d'O ₂]
03	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Sans régulateur	Raccordement	235,4	27,8
		Evacuation	185,3	27,3
04	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Avec régulateur	Raccordement	138,1	99,3
		Evacuation	129,2	95,9
08	Conduit concentrique triple paroi 8m Sans régulateur	Raccordement	339,9	45,5
		Evacuation	240,8	49,5
09	Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur	Raccordement	190,8	35,4
		Evacuation	154,3	18,9
15	Raccordement simple paroi + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	Raccordement	262,6	20,7
		Evacuation	115,4	24,3
16	Raccordement flexible + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	Raccordement	314,1	22,8
		Evacuation	137,7	32,9

Tableau 43 : Synthèse des températures de fumée et émissions de TSP en mg/MJ en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018.

Expérience	Montage (Raccordement + CdFumée)	Position	Moyenne de Température de fumée [°C]	Moyenne de TSP [mg/MJ]
03	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Sans régulateur	Raccordement	235,4	31,8
		Evacuation	185,3	30,0
04	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Avec régulateur	Raccordement	138,1	115,1
		Evacuation	129,2	111,6
08	Conduit concentrique triple paroi 8m Sans régulateur	Raccordement	339,9	49,8
		Evacuation	240,8	53,9
09	Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur	Raccordement	190,8	39,2
		Evacuation	154,3	21,1
15	Raccordement simple paroi + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	Raccordement	262,6	18,7
		Evacuation	115,4	21,7
16	Raccordement flexible + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	Raccordement	314,1	21,7
		Evacuation	137,7	29,8

Le Tableau 43 présente les facteurs d'émissions de TSP sous une autre unité, en mg/MJ, permettant d'observer l'effet des conduits prototypes sur la quantité de particules émises rapport à l'énergie produite. Ainsi, la combinaison de ces deux informations permet de conclure sur les émissions de particules via les conduits prototypes par la phrase suivante :

La solution « Raccordement simple paroi + conduit concentrique triple paroi 8 m avec régulateur à l'étage » permet non seulement de réduire la concentration de particules dans les fumées, mais également de réduire les émissions de TSP de plus de 70 % par unité d'énergie produite.

Le Tableau 44 permet de comparer les émissions d'imbrûlés gazeux entre les prototypes et les solutions préalablement testées.

Tableau 44: Synthèse des taux de COVT et CO en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018

Expérience	Montage (Raccordement + CdFumée)	Position	COVT [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]	CO [ppm corrigé à 13% d'O ₂]
03	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Sans régulateur	Raccordement	848,4	3373
		Evacuation	246,4	/
04	Raccordement simple paroi + Isolé 8m Avec régulateur	Raccordement	374,0	1944
		Evacuation	281,9	/
08	Conduit concentrique triple paroi 8m Sans régulateur	Raccordement	746,5	3025
		Evacuation	239,6	/
09	Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur	Raccordement	320,3	1664
		Evacuation	438,5	/
15	Raccordement simple paroi + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	Raccordement	68,4	710
		Evacuation	78,5	/
16	Raccordement flexible + Conduit concentrique triple paroi 8m Avec régulateur à l'étage	Raccordement	96,5	755
		Evacuation	53,9	/

Les prototypes permettent d'obtenir les émissions d'imbrûlés gazeux les plus faibles, avec une réduction des émissions de COVT d'un facteur compris entre 5 et 10. Ils permettent aussi d'obtenir des réductions de CO avec un facteur compris entre 2 et 5. **Ce résultat est significatif, et confirme l'importance de la solution de fumisterie sur le comportement d'un appareil et de ses performances.**

Éléments à retenir :

- Les essais réalisés sur les prototypes permettent de bénéficier de l'amélioration de la qualité de combustion apportée par le conduit concentrique et de favoriser le potentiel de récupération d'énergie dans la pièce et donc le rendement global de l'installation.
- Les mêmes conclusions peuvent être faites a priori sur le nouveau positionnement (à l'étage vs au-dessus de la buse du poêle) du régulateur de tirage. Des travaux d'optimisation doivent être poursuivis afin de l'adapter à ce nouveau positionnement.
- Avec une colonne de conduits proche de huit mètres en tirage naturel, l'appareil récent a montré des performances conformes à celles annoncées par le fabricant malgré un fonctionnement en conditions réalistes.
- Les émissions de particules sont nettement réduites avec les prototypes, et la granulométrie des particules est moins fine.

5.3. Conclusions / Perspectives

La solution prototype de fumisterie étudiée dans ce projet, composée d'un raccord simple paroi jusqu'au plafond, puis d'un conduit concentrique et d'un régulateur de tirage permet, si elle est comparée aux solutions de fumisterie traditionnelles :

- D'optimiser la combustion, réduisant les émissions de COVT par un facteur compris entre cinq et dix et les émissions de CO par un facteur compris entre deux et cinq ;
- D'augmenter le rendement de l'appareil de plus de 15 % ;
- De réduire les émissions de TSP dans les fumées de plus de 70 % ;
- De réduire les émissions de TSP par unité d'énergie produite de plus de 70 % ;
- De modifier la répartition des particules à l'évacuation vers une granulométrie moins fine.

Ainsi, cette solution serait très intéressante à développer et permettrait de réduire de manière significative les émissions de particules des appareils de chauffage domestique au bois qui en seraient équipés. Une phase de conception industrielle est encore nécessaire, comprenant des optimisations aérauliques, esthétiques et fonctionnelles, notamment au niveau de l'élément de séparation des flux d'air et de fumée. Des travaux sur l'optimisation des échanges thermiques au niveau du conduit de raccordement simple paroi sont aussi possibles. Cependant, aucun verrou réglementaire apparent ne semble exister au développement de ce type de solution.

En plus de ces améliorations sur les quantités d'émissions de particules, il apparait que la modification de la granulométrie est bien effective, tendant vers leur augmentation de leur taille, et permet d'envisager que le conduit puisse jouer le rôle de collecteur des particules et de « pré-conditionneur » des particules avant leur évacuation. Ces nouvelles connaissances pourraient aussi avoir des débouchés pour la filtration industrielle, pour laquelle le profil granulométrique des particules à traiter tient son importance pour le choix et l'efficacité des systèmes mis en œuvre.

6. Conclusions générales

L'objectif de ce projet était triple :

- Etudier l'impact de la solution de fumisterie sur le comportement des appareils, et donc sur leurs performances énergétiques et environnementales ;
- Identifier les mécanismes de créations et d'évolutions des particules dans les conduits de fumée ;
- Tester des conduits prototypes qui permettraient de réduire les émissions de particules et/ou de favoriser leur grossissement et leur dépôt dans le conduit, tout en maintenant des performances énergétiques élevées.

Concernant le premier point, nous avons observé que les solutions de conduits concentriques combinées avec un régulateur de tirage permettent d'améliorer la maîtrise de la combustion et donc le rendement à la buse, mais restituent, du fait de leur isolation, moins d'énergie dans la pièce d'installation (moins de gain de rendement par le conduit de raccordement), contrairement à ce qui est observé avec des conduits de raccordement simple-paroi.

Il est à noter que les méthodes d'essais normalisées définissant les performances des poêles ne prennent pas en compte ces différentes typologies de conduits, puisqu'elles ont justement pour objectif de standardiser les pratiques (fumisterie fixée, tirage stabilisé et constant, protocoles de mesure et de rechargement en combustible prédéterminés). Il est donc important, par le choix et le dimensionnement adapté du conduit installé chez les utilisateurs, de se rapprocher de ces conditions « standardisées » et il est même envisageable d'améliorer les performances de l'installation en optimisant la conception du conduit (conduit concentrique, conduit de raccordement permettant la récupération d'énergie).

La nature évolutive de la taille des particules dans le conduit a bien été mise en évidence. Le paramètre clé permettant de favoriser leur croissance est le gradient provoqué par l'abaissement de la température de fumée par le conduit. Ce phénomène présente aussi l'avantage d'optimiser les mécanismes de thermophorèse, et donc de limiter les émissions vers l'air extérieur.

Tableau 45: Synthèse de résultats sur quelques expériences sélectionnées

Expérience	Appareil	Montage (Raccordement + CdFumée)	Rendement moyen de l'installation [%]	Consommation de bois pour 6400 kWh restitués (hypothèse 1400 kWh/stère)	TSP à l'évacuation [mg/Nm ³]	COVT à l'évacuation [mgEqC/Nm ³ corrigé à 13% d'O ₂]
14	Insert 2006	Raccordement simple paroi + Boisseau tubé flexible 4 m	54,6	8,4	81,7	978,1
11		Raccordement simple paroi + conduit isolé 8m Sans régulateur	57,4	8,0	82,9	533,1
03	Poêle 2018	Raccordement simple paroi + conduit isolé 8m Sans régulateur	62,0	7,4	27,3	246,4
15		Raccordement simple paroi + (conduit concentrique isolé triple paroi) 8m Avec régulateur à l'étage	79,8	5,7	24,3	78,5

Les prototypes testés en fin de projet ont permis de réduire de 45 à 80 % les émissions de TSP, tout en augmentant la granulométrie des particules formées. Les rendements ont aussi été très largement optimisés (15 points en moyenne) et la combustion étant bien maîtrisée, les émissions de COVT ont été divisées par un facteur compris entre cinq et dix. Ces résultats sont clairement encourageants et montrent à quel point le conduit impacte la qualité de combustion de l'appareil en favorisant l'alimentation et le préchauffage de l'air comburant en quantité maîtrisée (tirage).

A titre de synthèse, quelques résultats sont donnés pour les puissances nominales sur l'appareil de 2006 et sur l'appareil de 2018 (Tableau 45). Ces résultats confirment non seulement l'importance de la génération d'appareil mais mettent également en avant celle de la solution de fumisterie mise en œuvre.

Éléments à retenir :

- Associer un appareil performant et des réglages appropriés avec un combustible de qualité **et une solution d'évacuation des produits de combustion adaptée** permet d'atteindre, en conditions réalistes de fonctionnement, les performances annoncées par les fabricants et obtenues en laboratoire avec des protocoles normalisés. Au-delà de la seule nature des conduits, les résultats mettent aussi en évidence l'importance de son bon dimensionnement, pour obtenir les conditions de tirage nécessaires à un fonctionnement optimal de l'appareil de chauffage au bois.
- Concernant le conduit de fumée et l'alimentation en air, plusieurs paramètres permettent d'optimiser la solution de chauffage :
 - Un air canalisé et préchauffé à l'aide d'un conduit concentrique permet de ne pas refroidir le volume habitable et d'optimiser la qualité de combustion.
 - Un tirage adapté et régulé permet de se rapprocher des conditions de fonctionnement obtenues en laboratoire.
 - La partie de conduit visible dans la zone habitable (conduit de raccordement) permet, avec un conduit simple paroi associé à un conduit concentrique triple paroi isolé comme conduit d'évacuation des fumées, une récupération d'énergie supplémentaire pouvant dépasser quinze points de rendement.
- En favorisant une combustion optimisée, le type de conduit et son dimensionnement abaissent les émissions de polluants (particules, COVT) à la source. Ils participent aussi à leur réduction à l'évacuation en agissant sur la typologie de particules (nature et granulométrie) et en favorisant les mécanismes de dépôts.
- Le gradient de température dans le conduit est le paramètre le plus impactant sur les mécanismes d'évolution des particules (croissance et/ou thermophorèse).
- Les enseignements tirés de cette étude pourraient avoir des applications au-delà du chauffage domestique au bois. Par exemple, ils pourraient avoir un intérêt dans le cas des systèmes de filtration industriels, en « pré-conditionnant » les particules à filtrer pour leur faire atteindre des tailles de coupure nécessaires à leur captation par des cyclones, ou autres procédés. En effet, chaque technologie de filtration agit sur une classe spécifique de taille de particules. Recentrer la taille des particules sur ces classes permettrait d'optimiser leur efficacité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ADEME, PEREN²BOIS: Evaluation technico-économique des performances énergétiques et environnementales des meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de poussière fines et de composés organiques pour les appareils de combustion domestique utilisant la biomasse., 2012.
- [2] ADEME, POUJOLAT, LERMAB, Seguin Duteriez, D2I Groupe Invicta, QUALICOMB: réduction à la source des émissions issue du chauffage domestique au bois par usage de combustible de qualité, 2016.
- [3] ADEME, Programme Européen EN_PME_TEST relatif à la validation d'une méthode commune au niveau européen de détermination des émissions de particules des appareils de chauffage domestique à combustibles solides, Synthèse annuelle n°1., 2014.
- [4] B. Brandelet, Caractérisation physico-chimique des particules issues du chauffage domestique au bois, Université de Lorraine, 2016.
- [5] TFZ, BeReal: Advanced Testing Methods for Better Real Life Performance of Biomass Room Heating Appliances, 2016
- [6] CERIC, RE 1482: Régulateur de tirage Efficience, 2013.
- [7] AFNOR, NF EN 16510 : Equipement de chauffage domestique à combustion solide - Partie 1 : exigences générales et méthodes d'essai, 2022.
- [8] B. Brandelet, C. Rose, C. Rogaume, Y. Rogaume, Investigation of the organic carbon ratio analysis on particles from biomass combustion and its evolution in three generations of firewood stoves, *Biomass and Bioenergy*. 99 (2017) 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.002>.
- [9] S. Ozgen, S. Cernuschi, M. Giugliano, Factors governing particle number emissions in a waste-to-energy plant, *Waste Management*. 39 (2015) 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.033>.

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques de l'insert 2006 (données fabricant).....	11
Tableau 2 : Caractéristiques du poêle 2018 (données fabricant).....	12
Tableau 3 : Résultats d'étanchéité du poêle 2018.....	12
Tableau 4 : Résultats de températures et tirages pour l'appareil de 2006. (All : Allumage ; Nom :Nominal ; Red :Réduit)	23
Tableau 5 : Résultats de températures et tirages avec l'appareil de 2018. (All : Allumage ; Nom : Nominal ; Red : Réduit)	24
Tableau 6 : Rendement calculé avec l'appareil de 2006. (All :Allumage ; Nom :Nominal ; Red :Réduit)....	25
Tableau 7 : Rendement calculé avec l'appareil de 2018. (All :Allumage ; Nom :Nominal ; Red :Réduit)	26
Tableau 8 : Avantages et inconvénients des solutions de raccordements des appareils.....	28
Tableau 9 : OC/EC en allure nominale avec l'appareil de 2006.....	29
Tableau 10 : OC/EC en allure nominale avec l'appareil de 2018.....	29
Tableau 11 : COV et NOx en allure nominale avec l'appareil de 2006.....	30
Tableau 12 : COV et NOx en allure nominale avec l'appareil de 2018.....	30
Tableau 13 : TSP appareil 2006.....	31
Tableau 14 : TSP appareil 2018.....	32
Tableau 15 : Résultats ELPI.....	36
Tableau 16 : Impact de la solution de fumisterie sur les performances de l'appareil de 2018 (bas = mesure au niveau du plafond ; haut = évacuation)	38
Tableau 17 : Impact de la solution de fumisterie sur les performances de l'appareil de 2006. (bas = mesure au niveau du plafond ; haut = évacuation).....	39
Tableau 18: Impact de la solution de fumisterie sur les émissions de particules de l'appareil de 2018. (bas = mesure au niveau du plafond ; haut = évacuation).....	39
Tableau 19 : Impact de la solution de fumisterie sur les émissions de particules de l'appareil de 2006. (bas=mesure au niveau du plafond ; haut=évacuation).....	40
Tableau 20 : Impact de la hauteur de conduit sur les performances des deux appareils. (bas = mesure au niveau du plafond ; haut = évacuation).....	42
Tableau 21 : Impact de la hauteur de conduit sur les émissions de particules des deux appareils. (bas=mesure au niveau du plafond ; haut=évacuation).....	43
Tableau 22 : Impact du régulateur de tirage sur les performances de l'appareil de 2018.....	45
Tableau 23 : Impact du régulateur de tirage sur les performances de l'appareil de 2006.....	46
Tableau 24 : Impact du régulateur de tirage sur les émissions de particules de l'appareil de 2018.....	47
Tableau 25 : Impact du régulateur de tirage sur les émissions de particules de l'appareil de 2006.....	47
Tableau 26 : Evolution des concentrations en masse des TSP, de la nature chimique des particules et des concentrations en COVT entre le point bas et le point haut de mesure sur l'essai 8 (Concentrique, 8 mètres, sans régulation, appareil de 2018).....	49
Tableau 27 : Bilan gazeux théorique pour dimensionnement du brûleur.....	61
Tableau 28 : Caractérisation de l'effluent gazeux évoluant dans le conduit Simple paroi.....	65
Tableau 29 : Caractérisation de l'effluent gazeux évoluant dans le conduit Flexible.....	68
Tableau 30 : Caractérisation de l'effluent gazeux évoluant dans le conduit Concentrique.....	72
Tableau 31 : Caractérisation de l'effluent gazeux selon l'activation de la soufflerie sur le conduit Simple paroi.....	75
Tableau 32 : Résultats en nombre total des émissions de particules selon le réglage du MINIcast et de l'activation de la soufflerie dans le cas du conduit Simple paroi au point haut.....	76

Tableau 33 : Caractérisation de l'effluent gazeux selon la fréquence d'aspiration ou de soufflerie de la turbine dans la lame d'air du conduit Concentrique.	78
Tableau 34 : Détail des expériences réalisées sur les prototypes.....	86
Tableau 35 : Résultats de températures et tirages avec les deux prototypes.	88
Tableau 36 : Rendement calculé avec les deux prototypes.....	88
Tableau 37 : Emissions d'OC/EC avec les deux prototypes.....	90
Tableau 38 : Emissions de COV avec les deux prototypes.....	90
Tableau 39 : Emissions de TSP avec les deux prototypes.	91
Tableau 40 : Résultats ELPI avec les deux prototypes.	92
Tableau 41 : Synthèse des rendements en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018.....	93
Tableau 42: Synthèse des températures de fumée et émissions de TSP en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018.	94
Tableau 43 : Synthèse des températures de fumée et émissions de TSP en mg/MJ en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018.	94
Tableau 44: Synthèse des taux de COVT et CO en puissance nominale et 8m sur l'appareil de 2018.....	95
Tableau 45: Synthèse de résultats sur quelques expériences sélectionnées	97

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Tâches du projet BOICLEAN.....	8
Figure 2 - Détail des expériences réalisées.....	11
Figure 3 : Dimensions de l'insert 2006 (données fabricant).....	12
Figure 4 : Dimensions du poêle 2018 (données fabricant).....	12
Figure 5 : Photos des montages réalisés (source CERIC).....	13
Figure 6 - Conduits de raccordement (volume habitable) - source POUJOLAT	15
Figure 7 - Conduits de fumé (sous-toiture et extérieur) - source POUJOLAT	15
Figure 8 - Conduit concentrique triple paroi isolé - source POUJOLAT	15
Figure 9 : Régulateur sur conduit simple paroi et sur conduit concentrique triple paroi (source POUJOLAT).	16
Figure 10 : Exemple du tirage obtenu avec un poêle à bûches de 5 kW sans (bleu) et avec (orange) régulateur de tirage.....	17
Figure 11 : Cycle de combustion "type".	17
Figure 12 : Points de mesure (raccordement et évacuation – source CERIC).....	18
Figure 13 : Schéma de la norme NF EN 16510-1 et comparaison avec les rendements du poêle et de l'installation	19
Figure 14 : Mesures de TSP.	20
Figure 15 : Fonctionnement du ELPI.	21
Figure 16 : Schéma de principe d'utilisation du Graphite 52M.....	21
Figure 17 : Analyseur OC/EC Sunset Laboratory.	21
Figure 18 : Tirage mesuré avec l'appareil de 2018 (exemples).	24
Figure 19 : Rendement de l'installation calculé au niveau du plafond.	27
Figure 20 : Gains de rendement apportés par le conduit de raccordement.....	27
Figure 21 : Emissions de TSP pour les appareils de 2006.	33
Figure 22 Emissions de TSP pour les appareils de 2018.....	33
Figure 23 : Répartition granulométrique ELPI.....	37
Figure 24 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observer l'impact du type de conduit sur l'appareil de 2018.	41
Figure 25 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observer l'impact du type de conduit sur l'appareil de 2006.	41
Figure 26 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point bas pour les deux essais sélectionnés pour l'étude de l'impact de la hauteur de conduit (isolé, appareil de 2018).....	44
Figure 27 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point bas pour les deux essais sélectionnés pour l'étude de l'impact de la hauteur de conduit (isolé, appareil de 2006).	44
Figure 28 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observés l'impact du régulateur de tirage avec l'appareil de 2018. ...	48
Figure 29 : Distribution granulométrique en nombre des particules aux deux points de prélèvements sur les essais sélectionnés pour observés l'impact du régulateur de tirage sur l'appareil de 2018..	48
Figure 30 : Distribution granulométrique en nombre des particules au point de prélèvement bas des essais sélectionnés pour observés l'impact du régulateur de tirage sur l'appareil de 2006.....	49
Figure 31 : Evolution de la répartition granulométrique entre le point bas et le point haut de prélèvement lors de l'essai 8 (Concentrique, 8 mètres, sans régulation, appareil de 2018).....	50
Figure 32 : Corrélation entre les émissions de CO et de COVT au point bas à puissance nominale pour l'intégralité des essais réalisés.	51
Figure 33 : Corrélation entre les émissions de CO et de COVT au point bas à puissance réduite pour l'intégralité des essais réalisés.	52
Figure 34 : Corrélation entre le rapport OC/EC au point bas et la concentration en COVT au point bas sur les essais sans régulateurs sur l'appareil de 2018.....	52
Figure 35 : Evolution du delta des COVT en fonction du delta de TSP à puissance nominale.....	52
Figure 36 : Corrélation entre le delta de COVT divisé par le tirage et le gradient de température par mètre de conduit.	53
Figure 37 : Evolution du delta de COVT en fonction du delta du rapport CH ₄ /COVT multiplié par le gradient de température par mètre.	54
Figure 38 : Evolution des deltas de COVT divisés par le gradient de température par mètre de conduit en fonction de la somme des deltas des quatre fractions granulométriques les plus fines sur les essais sans régulateur.....	54
Figure 39 : Dépôts sur les parois du conduit en fonction du gradient de température multiplié par la teneur en CO des fumées pour tous les essais.....	55

Figure 40 : Dépôts sur les parois du conduit en fonction du gradient de température multiplié par la teneur en CO des fumées pour tous les essais sans régulateur.	56
Figure 41 - Conduit simple peau, conduit flexible et conduit concentrique - source Poujoulat	59
Figure 42 : Schéma de la plateforme expérimentale pour le conduit simple paroi et le conduit flexible.	60
Figure 43 : Schéma de la plateforme expérimentale pour le conduit double peau sans isolant.	60
Figure 44 : Photographies des différents montages sur la plateforme : simple paroi (a), flexible (b) et concentrique (c).	61
Figure 45 : Photographie de l'analyseur PG350 de chez HORIBA.....	62
Figure 46 : Schéma de principe de la génération de suie (a) et photographie du générateur MINIcast (b).	63
Figure 47 : Conduit Simple paroi, PC0 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	66
Figure 48 : Conduit Simple paroi, PC10 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	66
Figure 49 : Conduit Simple paroi, PC20 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	67
Figure 50 : Conduit Simple paroi, PC30 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	67
Figure 51 : Conduit Flexible, PC0 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	69
Figure 52 : Conduit Flexible, PC10 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	70
Figure 53 : Conduit Flexible, PC20 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	70
Figure 54 : Conduit Flexible, PC30 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	71
Figure 55 : Conduit Concentrique 10Hz, PC0 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	72
Figure 56 : Conduit Concentrique 10Hz, PC10 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	73
Figure 57 : Conduit Concentrique 10Hz, PC20 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	73
Figure 58 : Conduit Concentrique 10Hz, PC30 : Distribution en nombre et en pourcentage des particules au point bas et au point haut.	74
Figure 59 : Mesure de la répartition granulométrique au point haut du conduit Simple paroi avec la soufflerie OFF et ON.	76
Figure 60 : Mesure de la répartition granulométrique au point haut du conduit Concentrique selon les réglages de la turbine.	78
Figure 61 : Nombre total de particules au point haut du conduit concentrique en fonction des réglages de turbine avec un réglage MINIcast de PC10.	79
Figure 62 : Evolution de l'IE2 en fonction du nombre total de particules au point bas divisé par le gradient de température pour le conduit Simple paroi.	81
Figure 63 : Evolution de l'IE1+IE3 en fonction du nombre total de particules au point bas divisé par le gradient de température pour le conduit Flexible.	81
Figure 64 : Evolution de l'IE2 en fonction du nombre total de particules au point bas divisé par le gradient de température pour le conduit Concentrique.	82
Figure 65 : Schéma général des mécanismes d'évolution des particules dans un conduit de fumées.	84
Figure 66 - Fonctions recherchées pour les essais de prototypes	85
Figure 67 : Schéma des prototypes.....	86
Figure 68 : Photos des montages réalisés (source CERIC).	87
Figure 69 : Rendement calculé au niveau du plafond.	89
Figure 70 : Gains de rendement apportés par le conduit de raccordement.	89
Figure 71 : Emissions de TSP avec les deux prototypes.	91
Figure 72 : Répartition granulométrique ELPI.	92

INDEX DES EQUATIONS

Équation 1 : Calcul du rendement de l'appareil selon la norme NF EN 16510-1 [6].	18
Équation 2 : Calcul du volume de prélèvement pour les TSP.	20
Équation 3 : Calcul de la concentration en matière particulaire (PM).	20
Équation 4 : Calcul de la concentration en particules solides.	20
Équation 5 : Calcul du gradient de température par mètre de conduit.	53
Équation 6 : Bilan massique.	55
Équation 7 : Détermination des quantités de dépôts.	55
Équation 8 : Calcul du débit de dépôts en mg/s.	55
Équation 9 : Définition de l'Indice d'Evolution.	80

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
COV	Composés Organiques Volatils
COVT	Composés Organiques Volatils Totaux
EC	Carbone Élémentaire
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor (Impacteur basse pression électrique)
OC	Carbone Organique
TC	Carbone Total
TSP	Total Suspended Particles (total des particules en suspension)

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

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.



Fumisterie et performances d'installations de chauffage domestique au bois

Le chauffage domestique au bois est la première énergie renouvelable utilisée en France, mais ce secteur est fortement émissif de particules fines dont l'impact sanitaire est avéré.

Il est avéré que les caractéristiques des particules évoluent dans les conduits d'évacuation des fumées en fonction de différents paramètres (technologie de l'appareil, combustible, réglages...). Pourtant, parmi les paramètres influant sur la qualité de combustion et donc sur les émissions de polluants, l'impact de la solution de fumisterie a été peu étudié. C'est l'objet de ce projet.

Des campagnes d'essais ont été menées sur deux appareils à bûches de générations différentes (insert de 2006 et poêle de 2018) et trois solutions de fumisterie du marché français.

Il a été mis en évidence que la solution de fumisterie peut augmenter le rendement de l'installation de 15 points et permettre de réduire significativement les émissions d'imbrûlés gazeux.

Des prototypes de conduits ont ensuite été conçus et évalués, notamment sur leur capacité à piéger les particules. Une réduction des émissions particulaires de 45 % à 80 % a pu être obtenue grâce à ces prototypes en favorisant l'agglomération des particules avant leur évacuation.

L'association d'un appareil performant bien réglé, d'un combustible de qualité et d'une solution d'évacuation des produits de combustion (fumisterie) adaptée, permet d'atteindre, en conditions réalistes de fonctionnement, les performances annoncées via des protocoles normalisés.

Au-delà de la seule nature des conduits d'évacuation qui montre une influence sur les émissions de polluants de l'installation, l'importance de leur bon dimensionnement est mise en évidence, pour obtenir les conditions de tirage nécessaires au fonctionnement optimal d'un appareil de chauffage domestique au bois.

