

# Évaluation de solutions de réduction des émissions polluantes d'appareils de chauffage au bois (Projet ReduPo Bois)

## Evaluation of solutions for reduction of the pollutant emissions of wood fired heating appliances (Project ReduPo Bois)

Céline Le Dreff-Lorimier<sup>1</sup>, Gwenaëlle Trouve<sup>2</sup>, Valérie Tschamber<sup>2</sup>

### Résumé

Dans le cadre du projet ReduPo Bois, cette étude vise à évaluer différentes solutions de réduction des polluants gazeux et particulaires émis par les appareils de chauffage au bois domestiques. Deux voies distinctes sont considérées. La première consiste en une réduction des polluants lors de la combustion, par optimisation de la combustion elle-même, tandis que la seconde voie consiste en la mise en œuvre de systèmes de réduction des polluants en aval de la chambre de combustion.

L'analyse des performances de ces différentes solutions est réalisée par des mesures des polluants gazeux (CO, THC) et particulaires (TSP en masse, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>, PM<sub>0.1</sub> en nombre) et, dans le cas des systèmes de post-traitement, par une évaluation de leur adaptabilité à l'ouvrage dans son ensemble (appareil et conduit).

Cette étude révèle qu'une réduction des émissions polluantes, en particulier de CO, TSP (en masse), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> et PM<sub>0.1</sub> (en nombre) est envisageable pour les appareils de chauffage au bois, tant *via* une optimisation de la combustion que *via* la mise en œuvre de systèmes de post-traitement. En outre, des teneurs en TSP (en masse) en moyenne particulièrement faibles sont générées par les appareils optimisés testés.

Ainsi, les résultats encourageants obtenus par optimisation de la combustion font apparaître cette solution comme une alternative prometteuse (tant d'un point de vue technique qu'économique ou réglementaire), et ce d'autant plus qu'elle conduit à une suppression des polluants à la source, au contraire des systèmes de post-traitement qui supposent, *a minima* pour les particules, une évacuation ultérieure de ces polluants et, dans tous les cas, un entretien régulier.

### Mots-clés

combustion, biomasse, particules, polluants gazeux, mesures, performance, procédés de traitement, optimisation

### Abstract

As part of 'ReduPo Bois' project, this study aims at evaluating various solutions for the reduction of gaseous and particulate pollutants emitted by domestic heating appliances fired by wood. Two distinct ways are considered. The first one consists in a reduction of pollutants during combustion, by optimisation of the combustion itself, whereas the second one consists in inserting a system for pollutant reduction downstream from the combustion chamber.

Performances of these solutions are studied via gaseous (CO, THC) and particulate pollutant measurements (TSP in mass, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>, PM<sub>0.1</sub> in number) and, in case of post-treatment systems, via an evaluation of their adaptability to the whole structure (appliance and chimney duct).

This study reveals that a reduction of pollutant emissions, in particular CO, TSP (in mass), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> et PM<sub>0.1</sub> (in number) is possible for heating appliances, both via an optimisation of combustion and via the insertion of post-treatment systems. Moreover, particularly low average TSP contents (in mass) are generated by optimised appliances.

Thus, these promising results obtained via combustion optimisation reveal this solution as an interesting alternative (on a technical, economical or regulatory point of view), and even more as it leads to a suppression of pollutants, contrary to post-treatment systems which imply, at least for particles, an later evacuation of them, and in any case, a regular maintenance.

### Keywords

combustion, biomass, particles, gaseous pollutants, measurements, performance, treatment process, optimisation

(1) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 11 rue Henri Picherit, BP 82341, 44323 NANTES Cedex 3, France

(2) Laboratoire de Gestion des Risques et Environnement/Université de Haute-Alsace (LGRE/UHA), 3 bis rue Alfred Werner, 68093 MULHOUSE Cedex, France

## Contexte

Les appareils de chauffage résidentiels par combustion de la biomasse (inserts, poêles à bois et à granulés, poêles de masse, etc.) présentent de multiples avantages liés principalement à la constante hausse du prix des énergies fossiles et à l'attrait grandissant pour les énergies renouvelables. Toutefois, ces systèmes constituent une source non négligeable d'émissions de particules fines et de polluants gazeux [1], qui peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine [2].

Actuellement, diverses innovations technologiques dans ce secteur affichent l'objectif de réduire ces émissions. Deux voies distinctes pour atteindre cet objectif sont généralement considérées :

- La première voie consiste en une réduction des polluants lors de la combustion, par optimisation de la combustion elle-même (méthodes dites «primaires») [3], [4] ;
- La seconde voie consiste en la mise en œuvre de systèmes de réduction des polluants en aval de la chambre de combustion (méthodes dites «secondaires») [5], [6].

Ainsi, la caractérisation des émissions en aval de ces systèmes (ou après ces optimisations) et l'évaluation des réductions d'émissions effectives représentent aujourd'hui des enjeux d'importances majeures, tant pour l'opinion publique que les communautés industrielle, scientifique et politique de ce secteur d'activités.

S'inscrivant dans le cadre du projet ReduPo Bois, la présente étude vise à évaluer les performances de deux appareils de chauffage résidentiels optimisés et de trois systèmes de post-traitement actuellement commercialisés.

Des détails complémentaires sur le contenu de ce projet dans sa globalité sont disponibles dans le rapport final du projet ReduPo Bois édité par l'ADEME [7].

## Matériel et méthodes

### Appareils de chauffage et systèmes de réduction des polluants

Cette étude porte sur les solutions suivantes de réduction des polluants des appareils de chauffage au bois du secteur résidentiel :

- Deux appareils optimisés (cf. figure 1). Il s'agit de prototypes développés spécifiquement dans le cadre de cette étude par les fabricants partenaires,

dans un souci d'optimisation de la combustion, afin de réduire les émissions polluantes générées. Les évolutions technologiques mises en œuvre portent essentiellement sur la répartition de l'air comburant dans la chambre de combustion. Ces appareils sont aujourd'hui commercialisés et brevetés :

- Insert XP68, avec système ADS<sup>o</sup> d'injection et de post-combustion et collecteur C2Box<sup>o</sup> (post-combustion), développé par LORFLAM, comparé à l'insert OPTIMA L du même fabricant ;
- Poêle ILOT avec combustion inversée, développé par D2I/INVICTA, comparé au poêle ARGOS du même fabricant.

#### a. Insert XP68 (LORFLAM)



#### b. Poêle ILOT (D2I/INVICTA)

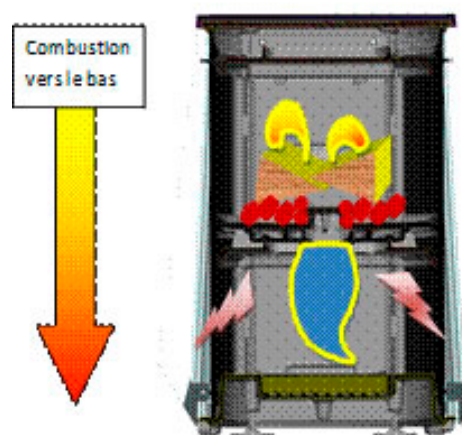


Figure 1. Appareils optimisés étudiés  
*Studied optimised appliances*  
 a. XP68 insert (LORFLAM) ; b. ILOT stove (D2I/INVICTA)

- Trois systèmes de post-traitement actuellement commercialisés pour les appareils de chauffage au bois (cf. figure 2). Ces systèmes, positionnés en aval de la chambre de combustion, visent à réduire les émissions polluantes générées selon différents mécanismes. Dans le cadre de cette étude, deux familles de systèmes de post-traitement sont testées. Il s'agit :

- D'un système fonctionnant par catalyse, dont l'objectif est de réduire les émissions de CO par oxydation et qui, compte tenu de sa configuration, peut également avoir un impact sur les particules *via* une rétention de celles-ci par mécanismes de filtration :

- Système  $\text{AE CO}$  commercialisé par FONDIS, dans sa version sans pré-filtre (le préfiltre n'étant mis en œuvre sur ce système que depuis 2012), testé sur un insert ULYS 700 ZE (FONDIS).

- De deux systèmes fonctionnant par effet électrostatique, dont l'objectif est de réduire les émissions de particules par ionisation de celles-ci *via* une/des électrode(s) puis déviation et collecte de ces particules au niveau d'une surface dédiée :

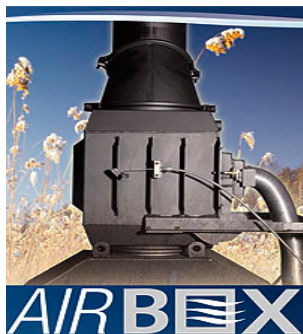
- Système Airbox commercialisé par SPARTHERM, testé sur un insert Varia 1Vh (SPARTHERM) ;

- Système Zumiköon commercialisé par RÜEGG, testé sur un insert OPTIMA L (LORFLAM).

#### a. Catalyseur $\text{AE CO}$ (FONDIS)



#### b. Système électrostatique Airbox (SPARTHERM)



#### c. Système électrostatique Zumiköon (RÜEGG)



Figure 2. Systèmes de post-traitement étudiés.

#### Studied post-treatment systems

a.  $\text{AE CO}$  catalyst (FONDIS); b. Airbox electrostatic system (SPARTHERM); c. Zumiköon electrostatic system (RÜEGG)

Compte tenu des industriels impliqués dans ce projet et/ou des spécificités de mise en œuvre de certains systèmes de post-traitement, seuls des appareils de chauffage au bois de type poêles (à bois) et inserts sont considérés dans cette étude.

#### Déroulement des essais et paramètres analysés

Les performances des appareils optimisés sont évaluées par comparaison des résultats d'émissions obtenus pour ces appareils par rapport aux résultats d'émissions obtenus pour un appareil classique du même fabricant.

L'efficacité de réduction des polluants des systèmes de post-traitement est quant à elle déterminée *via* des mesures successives des émissions polluantes générées avec et sans ce système (ou avec ce système à l'arrêt puis en fonctionnement, pour les systèmes par effet électrostatique). De plus, pour ces systèmes secondaires (pour lesquels ces éléments sont *a priori* plus critiques que pour les appareils optimisés), leur résistance à la chaleur et leur impact sur la corrosion du conduit sont estimés *via* la réalisation d'essais spécifiques.

L'ensemble des mesures présentées dans ce rapport sont effectuées pour des appareils de chauffage fonctionnant en allure nominale.

Conformément aux préconisations de la norme NF EN 13229 [8] et ses amendements [9], [10] et de la norme NF EN 13240 [11] et son amendement [12], les essais à la puissance nominale sont effectués à tirage régulé à - 12 Pa et précédés d'une période d'allumage et de mise en régime. Chaque essai en allure nominale

correspond à la combustion d'une charge de bois (et inclut donc les différentes phases d'inflammation, de combustion homogène et de combustion hétérogène).

Le combustible utilisé au cours de ces essais est constitué de bûches de bois (hêtre ou charme, en accord avec les normes précédemment citées) dont la teneur en humidité sur base humide mesurée par dessiccation en étuve varie de 4,8 à 14,2 % selon la série d'essais considérée. Il est important de préciser que, si les caractéristiques du bois peuvent varier d'une série d'essais à l'autre (du fait de l'emploi de lots de bois différents), celles-ci restent identiques lors des différents essais effectués sur un appareil/système donné (au cours desquels un lot de bois unique est employé). Par ailleurs, notons que le plus faible taux d'humidité relevé correspond à un bois stocké en intérieur (et non en extérieur sous abri).

Les polluants considérés dans le cadre de cette étude sont :

- Les particules totales en suspension (TSP), mesurées en masse ;
- Les particules fines par classe de taille de particules ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$  et  $PM_{0,1}$ ), mesurées en nombre ;
- Le monoxyde de carbone (CO) ;
- Les hydrocarbures totaux (THC).

Au cours de cette étude, la mesure des TSP est effectuée selon le protocole défini dans les règles de certification DIN CERTCO [13]. Il s'agit donc de mesures ponctuelles, au contraire des autres mesures effectuées qui sont continues.

L'ensemble de ces mesures de polluants sont reproduites au moins deux fois.

Les essais de résistance à la corrosion consistent à caractériser l'acidité des condensats (pH et concentration de certains acides spécifiques) avec et sans système de post-traitement (ou avec système à l'arrêt et en fonctionnement). Les acides considérés sont l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique, l'acide sulfurique et l'acide acétique.

Les condensats sont collectés dans des bouteilles de lavage placées dans un bain réfrigéré.

L'évaluation de la résistance à la chaleur des systèmes de post-traitement est réalisée par une mesure comparative de l'efficacité de ce système, avant et après un essai de sécurité consistant à «surcharger» l'appareil de chauffage pour obtenir un échauffement maximal de celui-ci (et une température maximale des fumées émises, pour un tirage de - 15 Pa).

Cet essai de sécurité est décrit dans la norme NF EN 13229 [8] et ses amendements [9], [10]. Dans le

cadre de cette étude, une simplification est apportée à ce protocole en ceci que le nombre de charges successives est fixé à quatre.

Enfin, la puissance et le rendement des appareils testés au cours de cette étude sont systématiquement déterminés pour chaque essai, en accord avec les calculs des normes NF EN 13229 et NF EN 13240 [8], [9], [10], [11], [12], de façon à pouvoir comparer les conditions de combustion d'un essai à l'autre.

### Montage expérimental

Une représentation schématique du montage expérimental employé au cours de cette étude est présentée sur la figure 3.

Comme le montre cette figure, l'appareil de chauffage, soit seul, soit équipé du système de réduction des polluants testé, est positionné sur une balance et raccordé à un conduit d'évacuation des produits de combustion instrumenté. Le conduit est équipé :

- d'un analyseur de CO et  $CO_2$  (par absorption infrarouge) et d'un analyseur d'hydrocarbures totaux de type FID (*Flame Ionisation Detector* – Détecteur à Ionisation de Flamme) permettant d'évaluer la concentration en polluants gazeux (@ CO,  $CO_2$ , THC) ;
- d'un système de prélèvement des particules à chaud suivi d'un porte-filtre chauffé contenant un filtre (en fibres de verre, sans liant, dont la rétention d'aérosols à 0,3  $\mu m$  DOP est de 99,98 %) permettant de collecter ces particules en vue d'une mesure gravimétrique à l'aide d'une balance de précision (@ TSP en masse) ;
- d'un ELPI ou ELPI+ (DEKATI), muni d'un étage de filtration, précédé de deux diluteurs de type éjecteur en série dont le premier est chauffé, permettant de suivre en continu la concentration en nombre de particules et leur répartition granulométrique (@  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$  et  $PM_{0,1}$  en nombre) ;
- d'un capteur de pression permettant de mesurer le tirage en continu ;
- d'un capteur de température placé en conduit permettant de mesurer la température des fumées ;

Un capteur de température est également placé dans l'ambiance.

### Méthodologie d'analyse des résultats

Pour l'ensemble des polluants considérés, l'efficacité moyenne de réduction des polluants est calculée à l'aide de la formule :

$$E = 100 \cdot \frac{C_{initiale} - C_{finale}}{C_{initiale}}$$

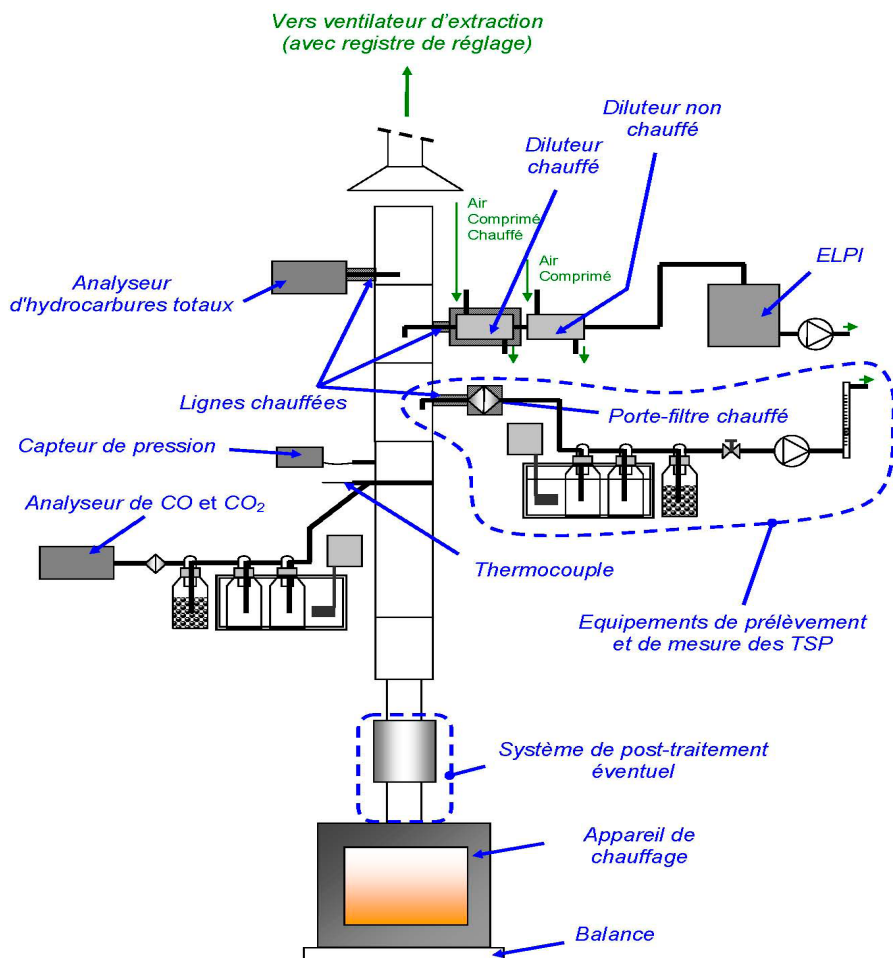


Figure 3. Montage expérimental  
*Experimental set-up*

Où :  $E$  est l'efficacité moyenne de réduction du polluant considéré (%);

$C_{initiale}$  est la concentration moyenne du polluant considéré, respectivement émise par l'appareil classique ou lors des essais sans système de réduction des polluants (ou avec système de réduction des polluants à l'arrêt) (SI);

$C_{finale}$  est la concentration moyenne du polluant considéré, respectivement émise par l'appareil optimisé ou lors des essais avec système de réduction des polluants (ou avec système de réduction des polluants en fonctionnement) (SI).

La valeur minimale de l'efficacité ( $E_{min}$ ) est calculée en considérant la valeur minimale de  $C_{initiale}$  et la valeur maximale de  $C_{finale}$ . Au contraire, la valeur maximale de l'efficacité ( $E_{max}$ ) est calculée en considérant la valeur maximale de  $C_{initiale}$  et la valeur minimale de  $C_{finale}$ .

## Résultats et discussions

Afin de faciliter la lecture des résultats, les termes 'On' et 'Off' sont employés dans les tableaux et figures de ce paragraphe pour désigner respectivement un système de post-traitement par effet électrostatique en fonctionnement et à l'arrêt.

Tableau I. Performances de l'insert XP68  
*XP68 inset performances*

|                   |                                | Insert OPTIMA L                              |                     |                     | Insert XP68                                  |                     |                     | E (%)               | E <sub>min</sub> (%) | E <sub>max</sub> (%) |    |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----|
|                   |                                | N <sub>essais</sub><br>(N <sub>jours</sub> ) | Moy.                | Ec.                 | N <sub>essais</sub><br>(N <sub>jours</sub> ) | Moy.                | Ec.                 |                     |                      |                      |    |
| η                 | (%)                            | 7 (4)                                        | 64                  | 4                   | 7 (4)                                        | 84                  | 3                   | -                   | -                    | -                    |    |
| P                 | (kW)                           | 7 (4)                                        | 16                  | 3                   | 7 (4)                                        | 14                  | 1                   | -                   | -                    | -                    |    |
| CO                | (%)                            | (à 13 % de O <sub>2</sub> )                  | 7 (4)               | 0,34                | 0,08                                         | 7 (4)               | 0,17                | 0,05                | 50                   | - 17                 | 70 |
| THC               | (mgC.Nm <sup>-3</sup> )        |                                              | 7 (4)               | 309                 | 141                                          | 7 (4)               | 130                 | 42                  | 58                   | - 40                 | 86 |
| TSP               | (mg.Nm <sup>-3</sup> )         |                                              | 6 (3)               | 74                  | 8                                            | 7 (4)               | 24                  | 6                   | 68                   | 47                   | 84 |
| PM <sub>10</sub>  | (particules.cm <sup>-3</sup> ) |                                              | 7 (4)               | 1,2.10 <sup>7</sup> | 0,2.10 <sup>7</sup>                          | 7 (4)               | 1,3.10 <sup>7</sup> | 1,4.10 <sup>7</sup> | - 8                  | - 383                | 86 |
| PM <sub>2,5</sub> | (particules.cm <sup>-3</sup> ) |                                              | 7 (4)               | 1,2.10 <sup>7</sup> | 0,2.10 <sup>7</sup>                          | 7 (4)               | 1,3.10 <sup>7</sup> | 1,4.10 <sup>7</sup> | - 8                  | - 383                | 86 |
| PM <sub>1</sub>   | (particules.cm <sup>-3</sup> ) |                                              | 7 (4)               | 1,2.10 <sup>7</sup> | 0,2.10 <sup>7</sup>                          | 7 (4)               | 1,3.10 <sup>7</sup> | 1,4.10 <sup>7</sup> | - 8                  | - 383                | 86 |
| PM <sub>0,1</sub> | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 7 (4)                                        | 4,7.10 <sup>6</sup> | 0,9.10 <sup>6</sup> | 7 (4)                                        | 1,1.10 <sup>7</sup> | 1,3.10 <sup>7</sup> | - 134               | - 956                | 86                   |    |

Tableau II. Performances du poêle ILOT  
*ILOT stove performances*

|                   |                                | Poêle ARGOS                                  |       |                     | Poêle ILOT                                   |        |                     | E (%)               | E <sub>min</sub> (%) | E <sub>max</sub> (%) |    |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|-------|---------------------|----------------------------------------------|--------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----|
|                   |                                | N <sub>essais</sub><br>(N <sub>jours</sub> ) | Moy.  | Ec.                 | N <sub>essais</sub><br>(N <sub>jours</sub> ) | Moy.   | Ec.                 |                     |                      |                      |    |
| η                 | (%)                            | 4 (1)                                        | 78    | 1                   | 10 (2)                                       | 81     | 1                   | -                   | -                    | -                    |    |
| P                 | (kW)                           | 4 (1)                                        | 11    | 0                   | 10 (2)                                       | 10     | 1                   | -                   | -                    | -                    |    |
| CO                | (%)                            | (à 13 % de O <sub>2</sub> )                  | 4 (1) | 0,10                | 0,06                                         | 10 (2) | 0,08                | 0,02                | 20                   | - 116                | 68 |
| THC               | (mgC.Nm <sup>-3</sup> )        |                                              | 4 (1) | 453                 | 199                                          | 4 (2)  | 367                 | 166                 | 19                   | - 88                 | 79 |
| TSP               | (mg.Nm <sup>-3</sup> )         |                                              | 2 (1) | 12                  | 5                                            | 5 (2)  | 13                  | 10                  | - 10                 | - 304                | 69 |
| PM <sub>10</sub>  | (particules.cm <sup>-3</sup> ) |                                              | 4 (1) | 1,3.10 <sup>7</sup> | 0,2.10 <sup>7</sup>                          | 9 (2)  | 2,0.10 <sup>7</sup> | 1,2.10 <sup>7</sup> | - 54                 | - 227                | 63 |
| PM <sub>2,5</sub> | (particules.cm <sup>-3</sup> ) |                                              | 4 (1) | 1,3.10 <sup>7</sup> | 0,2.10 <sup>7</sup>                          | 9 (2)  | 2,0.10 <sup>7</sup> | 1,2.10 <sup>7</sup> | - 54                 | - 227                | 63 |
| PM <sub>1</sub>   | (particules.cm <sup>-3</sup> ) |                                              | 4 (1) | 1,3.10 <sup>7</sup> | 0,2.10 <sup>7</sup>                          | 9 (2)  | 2,0.10 <sup>7</sup> | 1,2.10 <sup>7</sup> | - 54                 | - 227                | 63 |
| PM <sub>0,1</sub> | (particules.cm <sup>-3</sup> ) |                                              | 4 (1) | 6,2.10 <sup>6</sup> | 3,4.10 <sup>6</sup>                          | 9 (2)  | 1,1.10 <sup>7</sup> | 0,7.10 <sup>7</sup> | - 80                 | - 525                | 82 |

### Appareils optimisés

Les performances de l'insert XP68 (comparées à celles de l'insert OPTIMA L) sont reportées dans le tableau I, tandis que celles du poêle ILOT (comparées à celle du poêle ARGOS) sont reportées dans le tableau II.

Les caractéristiques du bois utilisé pour ces essais sont les suivantes :

- Insert XP68 (et insert OPTIMA L) : hêtre à 4,8 % d'humidité ;
- Poêle ILOT (et poêle ARGOS) : charme à 14,0 % d'humidité ;

De plus, une comparaison des courbes de répartition granulométrique des particules, en nombre, émises par chacun de ces deux couples d'appareil est présentée sur la figure 4 (Courbes (a) à (c)).

*Principales tendances*

Les évolutions apportées à l'insert XP68 permettent de réduire significativement les émissions de TSP (de 68 % en masse) et présentent une nette tendance à diminuer les émissions de CO (de 50 %) comparé à l'insert OPTIMA L. Le comportement de l'insert XP68 lors de la phase transitoire de début de charge (allumage/reprise du feu) s'avère très différent de celui de l'insert OPTIMA L, puisqu'il est à l'origine de la production de particules ultrafines en grand nombre sur une période variable (de l'ordre de 3 minutes), ce qui n'est pas le cas de l'insert OPTIMA L. Ainsi, si ces deux inserts présentent des teneurs en  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$ , et  $PM_{0.1}$  en nombre comparables en considérant la charge dans son ensemble (en tenant compte de la forte dispersion des résultats pour l'insert XP68), la quantité de particules générée par l'insert XP68 après cette phase transitoire se révèle significativement plus faible que celle générée par l'insert OPTIMA L sur cette même période de régime établi (avec une réduction de 76 % en nombre des  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  et  $PM_1$  pour le régime établi). Par ailleurs, les évolutions technologiques apportées conduisent à une nette amélioration du rendement énergétique de l'insert XP68 comparé à l'insert OPTIMA L.

Compte tenu en particulier des émissions en CO et TSP (en masse) déjà faibles générées par le poêle ARGOS (et de son rendement déjà élevé), les évolutions apportées au poêle ILOT ne permettent pas de réduire significativement les émissions moyennes de ces deux polluants (CO et TSP). Parallèlement, la modification du principe de combustion n'a pas d'impact significatif sur les émissions des autres polluants considérés ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$  et  $PM_{0.1}$  en nombre et THC). Cependant, la mise en place d'une combustion inversée (poêle ILOT), par comparaison avec une combustion montante (poêle ARGOS), permet d'obtenir d'une part un rendement énergétique plus important et d'autre part, en instantané, des concentrations en CO particulièrement faibles (proches de 0,01 % à 13 % de  $O_2$ ), et ce avec une grande régularité.

De plus, pour ces deux appareils optimisés, il apparaît que :

- La concentration moyenne en TSP (en masse) relevée est particulièrement faible (13 - 24  $mg.Nm^{-3}$  à 13 % de  $O_2$ ) comparée à la valeur limite spécifiée dans les règles de certification DIN CERTCO [13], à savoir 75  $mg.Nm^{-3}$  à 13 % de  $O_2$  ;
- La concentration moyenne en CO relevée est faible (0,08 - 0,17 % à 13 % de  $O_2$ ) par rapport aux valeurs spécifiées dans les règles de certification du Label Flamme Verte [14], à savoir 0,3 % à 13 % de  $O_2$ .

*Insert XP68*

Plus particulièrement, la campagne d'essais menée en allure nominale sur l'insert XP68 par comparaison avec l'insert OPTIMA L, tous deux commercialisés par LORFLAM, révèle que :

- les évolutions apportées à l'insert XP68 conduisent à une efficacité de réduction significative pour les TSP, avec une valeur moyenne de 68 % (et une gamme d'efficacité comprise entre 47 % et 84 % au cours de cette étude) ;
- cet insert présente une nette tendance à diminuer les émissions de CO (50 %) comparé à l'insert OPTIMA L, puisque, bien que les valeurs minimales et maximales obtenues sur ces deux appareils se recouvrent, les concentrations moyennes émises par l'insert XP68 sont plus faibles que celles émises par l'insert OPTIMA L, y compris en tenant compte des écarts types relevés ;
- cet insert présente une nette tendance à diminuer les émissions de THC et augmenter les émissions de  $PM_{0.1}$  en nombre, mais ces tendances ne sont pas significatives compte tenu de la variabilité des résultats : les concentrations moyennes correspondantes s'avèrent comparables sur les deux appareils, en tenant compte des écarts types relevés.

Toutefois, il est important de préciser que la variabilité des résultats de mesure de particules ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$  et  $PM_{0.1}$  en nombre) est particulièrement importante pour l'insert XP68 (avec des écarts types  $\geq 100$  % de la valeur moyenne). Cette forte variabilité s'explique en particulier par l'existence d'un important pic de particules ultrafines (d'amplitude et de durée variables selon les essais) en début de charge ;

- les évolutions apportées à l'insert XP68 sont à l'origine de la production de particules ultrafines en début de combustion (lors de la phase transitoire d'allumage/reprise du feu) ;
- la quantité de particules générée par l'insert XP68, après cette phase transitoire (correspondant aux 3 premières minutes de la charge), est significativement plus faible que celle générée par l'insert OPTIMA L sur cette même période (réduction de 76 % en nombre des  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  et  $PM_1$ , et tendance à la réduction des  $PM_{0.1}$  en nombre) ;
- la répartition granulométrique (en nombre) moyenne des particules de l'insert XP68 (sur toute la durée de la charge) est caractérisée par deux modes, de sorte que les particules prédominantes sont les particules de 0,01-0,02  $\mu m$  de diamètre (dans le mode nucléation), tandis que les particules de 0,1-0,2  $\mu m$  de diamètre présentent également un pic de concentration (dans le mode accumulation). Il y a donc modification de la répartition granulométrique par rapport à l'insert

OPTIMA L pour lequel seul le mode accumulation est observable (les particules prédominantes étant celles de 0,1-0,2  $\mu\text{m}$  de diamètre). Après la phase transitoire (correspondant aux 3 premières minutes de la charge), la répartition granulométrique des particules de l'insert XP68 s'avère par contre nettement plus proche de celle de l'insert OPTIMA L puisque les particules du mode nucléation ne présentent plus qu'un faible pic à peine marqué.

#### Poêle ILOT

Parallèlement, la campagne d'essais menée en allure nominale sur le poêle ILOT par comparaison avec le poêle ARGOS, tous deux commercialisés par D2I/INVICTA, révèle que :

- la modification du principe de combustion ne présente pas d'efficacité de réduction significative pour les différents polluants considérés (CO, THC, TSP en masse,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{0,1}$  en nombre) ;
- la modification du principe de combustion présente une tendance à diminuer les émissions de CO et augmenter les émissions de particules fines ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{0,1}$  en nombre), mais ces tendances ne sont pas significatives compte tenu de la variabilité des résultats : les concentrations moyennes correspondantes s'avèrent comparables pour les poêles ARGOS et ILOT, en tenant compte des écarts types relevés ;

- la répartition granulométrique (en nombre) des particules n'est pas impactée par la modification du principe de combustion, en tenant compte des écarts types relevés, avec des particules prédominantes de 0,07-0,12  $\mu\text{m}$  pour les deux appareils (poêles ARGOS et ILOT).

#### Systèmes de post-traitement

Les performances du catalyseur  $\text{AE CO}$ , du système électrostatique Airbox et du système électrostatique ZumikÖon sont reportées respectivement dans le Tableau III, le Tableau IV et le Tableau V.

Les caractéristiques du bois utilisé pour ces essais sont les suivantes :

- Catalyseur  $\text{AE CO}$  : hêtre à 14,2 % d'humidité ;
- Système électrostatique Airbox : hêtre à 14,2 % d'humidité ;
- Système électrostatique ZumikÖon : hêtre à 12,8 % d'humidité.

De plus, une comparaison des courbes de répartition granulométrique des particules, en nombre, émises par les différents appareils testés, avec et sans système de post-traitement (ou avec système respectivement 'Off' et 'On' pour les systèmes électrostatiques) est présentée sur la figure 4 (courbes (d) à (f)).

Tableau III. Performances du catalyseur  $\text{AE CO}$   
 *$\text{AE CO catalyst performances}$*

|                          |                                 | Sans $\text{Ø CO}$                                |            |            | Avec $\text{Ø CO}$                                |            |            | $E$<br>(%) | $E_{\min}$<br>(%) | $E_{\max}$<br>(%) | Après essai de sécurité<br>( $T_{\text{fumées-max}} = 372^\circ\text{C}$ )<br>Avec $\text{Ø CO}$ |            |            |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|------------|------------|---------------------------------------------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|
|                          |                                 | $N_{\text{essai}}$<br>( $N_{\text{journalier}}$ ) | Moy.       | Ec.        | $N_{\text{essai}}$<br>( $N_{\text{journalier}}$ ) | Moy.       | Ec.        |            |                   |                   | $N_{\text{essai}}$<br>( $N_{\text{journalier}}$ )                                                | Moy.       | Ec.        |
| $\eta$                   | (%)                             | 5 (3)                                             | 77         | 3          | 6 (3)                                             | 78         | 3          | -          | -                 | -                 | 2 (1)                                                                                            | 79         | 0          |
| $P$                      | (kW)                            | 5 (3)                                             | 19         | 3          | 6 (3)                                             | 19         | 4          | -          | -                 | -                 | 2 (1)                                                                                            | 19         | 3          |
| CO                       | (%)                             | 5 (3)                                             | 0,25       | 0,09       | 6 (3)                                             | 0,06       | 0,03       | 76         | 35                | 89                | 2 (1)                                                                                            | 0,04       | 0,01       |
| THC                      | ( $\text{mgC.Nm}^{-3}$ )        | 3 (2)                                             | 85         | 43         | 4 (2)                                             | 175        | 75         | - 106      | - 441             | 28                | 2 (1)                                                                                            | 118        | 16         |
| TSP                      | ( $\text{mg.Nm}^{-3}$ )         | 2 (1)                                             | 118        | 5          | 2 (1)                                             | 80         | 18         | 32         | 19                | 45                | -                                                                                                | -          | -          |
| $\text{PM}_{10}$         | (particules. $\text{cm}^{-3}$ ) | 3 (2)                                             | $2,2.10^6$ | $0,4.10^6$ | 4 (2)                                             | $3,0.10^6$ | $0,9.10^6$ | - 37       | - 138             | 21                | 2 (1)                                                                                            | $2,4.10^6$ | $0,1.10^6$ |
| $\text{PM}_{2,5}$        | (particules. $\text{cm}^{-3}$ ) | 3 (2)                                             | $2,2.10^6$ | $0,4.10^6$ | 4 (2)                                             | $3,0.10^6$ | $0,9.10^6$ | - 37       | - 138             | 21                | 2 (1)                                                                                            | $2,4.10^6$ | $0,1.10^6$ |
| $\text{PM}_1$            | (particules. $\text{cm}^{-3}$ ) | 3 (2)                                             | $2,2.10^6$ | $0,4.10^6$ | 4 (2)                                             | $3,0.10^6$ | $0,9.10^6$ | - 38       | - 138             | 21                | 2 (1)                                                                                            | $2,4.10^6$ | $0,1.10^6$ |
| $\text{PM}_{0,1}$        | (particules. $\text{cm}^{-3}$ ) | 3 (2)                                             | $3,7.10^5$ | $2,1.10^5$ | 4 (2)                                             | $4,6.10^5$ | $2,5.10^5$ | - 24       | - 247             | 50                | 2 (1)                                                                                            | $1,9.10^5$ | $0,1.10^5$ |
| pH                       | (-)                             | 1 (1)                                             | 3,0        | -          | 1 (1)                                             | 3,6        | -          | -          | -                 | -                 | -                                                                                                | -          | -          |
| HCl                      | ( $\text{mg.L}^{-1}$ )          | 1 (1)                                             | 7          | -          | 1 (1)                                             | 3          | -          | -          | -                 | -                 | -                                                                                                | -          | -          |
| $\text{HNO}_3$           | ( $\text{mg.L}^{-1}$ )          | 1 (1)                                             | 3          | -          | 1 (1)                                             | 5          | -          | -          | -                 | -                 | -                                                                                                | -          | -          |
| $\text{H}_2\text{SO}_4$  | ( $\text{mg.L}^{-1}$ )          | 1 (1)                                             | 69         | -          | 1 (1)                                             | 85         | -          | -          | -                 | -                 | -                                                                                                | -          | -          |
| $\text{CH}_3\text{COOH}$ | ( $\text{mg.L}^{-1}$ )          | 1 (1)                                             | 3055       | -          | 1 (1)                                             | 485        | -          | -          | -                 | -                 | -                                                                                                | -          | -          |

Tableau IV. Performances du système électrostatique Airbox  
*Airbox electrostatic system performances*

|                                |                                | Airbox Off                                    |                     |                     | Airbox On                                     |                     |                     | E<br>(%) | E <sub>min</sub><br>(%) | E <sub>max</sub><br>(%) | Après essai de sécurité<br>(T <sub>fumées-max</sub> = 488 °C)<br>Airbox On |      |     |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------|-----|
|                                |                                | N <sub>essék</sub><br>(N <sub>jourées</sub> ) | Moy.                | Ec.                 | N <sub>essék</sub><br>(N <sub>jourées</sub> ) | Moy.                | Ec.                 |          |                         |                         | N <sub>essék</sub><br>(N <sub>jourées</sub> )                              | Moy. | Ec. |
| η                              | (%)                            | 6 (3)                                         | 69                  | 6                   | 8 (5)                                         | 78                  | 4                   | -        | -                       | -                       | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| P                              | (kW)                           | 6 (3)                                         | 14                  | 3                   | 8 (5)                                         | 18                  | 3                   | -        | -                       | -                       | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| CO                             | (%)                            | 6 (3)                                         | 0,12                | 0,03                | 8 (5)                                         | 0,16                | 0,09                | - 33     | - 289                   | 75                      | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| THC                            | (mgC.Nm <sup>-3</sup> )        | 3 (1)                                         | 180                 | 47                  | 5 (3)                                         | 179                 | 65                  | 1        | - 119                   | 47                      | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| TSP                            | (mg.Nm <sup>-3</sup> )         | 2 (1)                                         | 73                  | 4                   | 2 (1)                                         | 51                  | 30                  | 30       | - 3                     | 61                      | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| PM <sub>10</sub>               | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 4 (2)                                         | 3,7.10 <sup>7</sup> | 2,1.10 <sup>7</sup> | 6 (4)                                         | 2,1.10 <sup>7</sup> | 1,1.10 <sup>7</sup> | 17       | - 72                    | 90                      | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| PM <sub>2,5</sub>              | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 4 (2)                                         | 3,7.10 <sup>7</sup> | 2,1.10 <sup>7</sup> | 6 (4)                                         | 2,1.10 <sup>7</sup> | 1,1.10 <sup>7</sup> | 17       | - 72                    | 90                      | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| PM <sub>1</sub>                | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 4 (2)                                         | 3,7.10 <sup>7</sup> | 2,1.10 <sup>7</sup> | 6 (4)                                         | 2,1.10 <sup>7</sup> | 1,1.10 <sup>7</sup> | 17       | - 72                    | 90                      | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| PM <sub>0,1</sub>              | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 4 (2)                                         | 3,4.10 <sup>7</sup> | 1,9.10 <sup>7</sup> | 6 (4)                                         | 1,9.10 <sup>7</sup> | 1,1.10 <sup>7</sup> | 17       | - 72                    | 90                      | 0 (0)                                                                      | -    | -   |
| pH                             | (-)                            | 1 (1)                                         | 2,9                 | -                   | 1 (1)                                         | 3,0                 | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                          | -    | -   |
| HCl                            | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 27                  | -                   | 1 (1)                                         | 5                   | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                          | -    | -   |
| HNO <sub>3</sub>               | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 15                  | -                   | 1 (1)                                         | 12                  | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                          | -    | -   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 101                 | -                   | 1 (1)                                         | 85                  | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                          | -    | -   |
| CH <sub>3</sub> COOH           | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 3073                | -                   | 1 (1)                                         | 2096                | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                          | -    | -   |

Tableau V. Performances du système électrostatique ZumikØon  
*ZumikØon electrostatic system performances*

|                                |                                | ZumikØon Off                                  |                     |                     | ZumikØon On                                   |                     |                     | E<br>(%) | E <sub>min</sub><br>(%) | E <sub>max</sub><br>(%) | Après essai de sécurité<br>(T <sub>fumées-max</sub> = 347 °C)<br>ZumikØon On |                     |                     |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
|                                |                                | N <sub>essék</sub><br>(N <sub>jourées</sub> ) | Moy.                | Ec.                 | N <sub>essék</sub><br>(N <sub>jourées</sub> ) | Moy.                | Ec.                 |          |                         |                         | N <sub>essék</sub><br>(N <sub>jourées</sub> )                                | Moy.                | Ec.                 |
| η                              | (%)                            | 10 (5)                                        | 80                  | 4                   | 10 (5)                                        | 78                  | 4                   | -        | -                       | -                       | 2 (1)                                                                        | 77                  | 1                   |
| P                              | (kW)                           | 10 (5)                                        | 17                  | 3                   | 10 (5)                                        | 16                  | 5                   | -        | -                       | -                       | 2 (1)                                                                        | 19                  | 3                   |
| CO                             | (%)                            | 10 (5)                                        | 0,24                | 0,05                | 10 (5)                                        | 0,29                | 0,14                | - 21     | - 321                   | 53                      | 2 (1)                                                                        | 0,28                | 0,01                |
| THC                            | (mgC.Nm <sup>-3</sup> )        | 6 (3)                                         | 173                 | 59                  | 6 (3)                                         | 265                 | 132                 | - 53     | - 304                   | 52                      | 2 (1)                                                                        | 232                 | 105                 |
| TSP                            | (mg.Nm <sup>-3</sup> )         | 3 (1)                                         | 47                  | 9                   | 3 (1)                                         | 42                  | 20                  | 11       | - 45                    | 63                      | -                                                                            | -                   | -                   |
| PM <sub>10</sub>               | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 6 (3)                                         | 7,9.10 <sup>6</sup> | 2,5.10 <sup>6</sup> | 6 (3)                                         | 2,0.10 <sup>6</sup> | 0,8.10 <sup>6</sup> | 75       | 39                      | 91                      | 2 (1)                                                                        | 2,4.10 <sup>6</sup> | 0,2.10 <sup>6</sup> |
| PM <sub>2,5</sub>              | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 6 (3)                                         | 7,9.10 <sup>6</sup> | 2,5.10 <sup>6</sup> | 6 (3)                                         | 2,0.10 <sup>6</sup> | 0,8.10 <sup>6</sup> | 75       | 39                      | 91                      | 2 (1)                                                                        | 2,4.10 <sup>6</sup> | 0,2.10 <sup>6</sup> |
| PM <sub>1</sub>                | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 6 (3)                                         | 7,9.10 <sup>6</sup> | 2,5.10 <sup>6</sup> | 6 (3)                                         | 2,0.10 <sup>6</sup> | 0,8.10 <sup>6</sup> | 75       | 39                      | 91                      | 2 (1)                                                                        | 2,4.10 <sup>6</sup> | 0,2.10 <sup>6</sup> |
| PM <sub>0,1</sub>              | (particules.cm <sup>-3</sup> ) | 6 (3)                                         | 3,2.10 <sup>6</sup> | 1,2.10 <sup>6</sup> | 6 (3)                                         | 7,9.10 <sup>5</sup> | 3,9.10 <sup>5</sup> | 75       | 33                      | 93                      | 2 (1)                                                                        | 7,4.10 <sup>5</sup> | 2,5.10 <sup>5</sup> |
| pH                             | (-)                            | 1 (1)                                         | 3,3                 | -                   | 1 (1)                                         | 3,0                 | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                            | -                   | -                   |
| HCl                            | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 2,1                 | -                   | 1 (1)                                         | 21,2                | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                            | -                   | -                   |
| HNO <sub>3</sub>               | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 47,8                | -                   | 1 (1)                                         | < 33,1              | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                            | -                   | -                   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 119                 | -                   | 1 (1)                                         | 151                 | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                            | -                   | -                   |
| CH <sub>3</sub> COOH           | (mg.L <sup>-1</sup> )          | 1 (1)                                         | 722                 | -                   | 1 (1)                                         | 1984                | -                   | -        | -                       | -                       | -                                                                            | -                   | -                   |

*Principales tendances*

Le système  $\text{AE CO}$  (sans préfiltre) permet de réduire significativement les émissions de CO (de 76 %) et de TSP (de 32 % en masse) de l'insert ULYS 700 ZE pour lequel il est actuellement dédié. Bien qu'il n'ait pas été développé dans l'objectif d'agir sur les particules (mais dans celui d'abaisser les émissions de CO, ce qui est effectivement le cas), les propriétés connexes de filtration de ce système le rendent pertinent pour réduire les particules volumineuses, mais pas les particules fines. Ce système présente en outre une bonne résistance à la chaleur et une innocuité vis-à-vis de la corrosion du conduit.

Le système Airbox est spécifiquement dédié aux appareils de chauffage de la marque SPARTHERM. Or, compte tenu de l'importante variabilité de la combustion de l'insert VARIA 1Vh sur lequel ce système a été testé, il n'a pas présenté d'efficacité de réduction des polluants significative dans le cadre de cette étude pour les différents polluants considérés (CO, TSP en masse,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{0.1}$  en nombre et THC). En outre, si ce système présente une innocuité vis-à-vis de la corrosion du conduit, il s'avère ne pas résister à des températures de fumées élevées (en l'occurrence, 488 °C).

Le système ZumikOon permet de réduire significativement les émissions de particules fines, et plus précisément de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{0.1}$  (de 75 % en nombre) de l'insert OPTIMA L sur lequel il a été testé. Ces résultats sont ainsi en accord avec les spécifications techniques de ce produit, le rendant pertinent pour la réduction des particules fines, mais pas des particules volumineuses. En accord également avec ces spécifications, il apparaît que ce système présente une sensibilité vis-à-vis de la température des fumées, qui peut amener à prendre des précautions particulières de mise en œuvre, plus contraignantes que celles spécifiées dans la notice. Dans le cadre de cette étude, il a ainsi été nécessaire de positionner le système ZumikOon suffisamment loin de la buse de l'appareil (en l'occurrence à 1 m) pour que la température des fumées reste inférieure à 400 °C (en l'occurrence, 347 °C). Par ailleurs, l'innocuité de ce système vis-à-vis de la corrosion du conduit n'étant pas démontrée, cela implique de porter une attention particulière à ce risque.

*Catalyseur  $\text{AE CO}$* 

Plus particulièrement, la campagne d'essais menée sur le catalyseur  $\text{Ø CO}$  (sans préfiltre), mis en œuvre sur un insert ULYS 700 ZE fonctionnant en allure nominale, révèle que :

- ce système présente une efficacité de réduction significative pour :

- Le CO, avec une efficacité moyenne de 76 % (et une gamme d'efficacité comprise entre 35 % et 89 % au cours de cette étude) ;
- les TSP, avec une valeur moyenne de 32 % en masse (et une gamme d'efficacité comprise entre 19 % et 45 % au cours de cette étude).

- ce système présente une tendance à augmenter les émissions des autres polluants considérés (THC,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{0.1}$  en nombre), mais cette tendance n'est pas significative compte tenu de la variabilité des résultats : les concentrations moyennes correspondantes s'avèrent comparables avec et sans  $\text{Ø CO}$ , en tenant compte des écarts types relevés ;

- la répartition granulométrique (en nombre) des particules n'est pas impactée par la mise en place de ce système de réduction des polluants, en tenant compte des écarts types relevés ;

- les performances du système  $\text{Ø CO}$  ne semblent pas être affectées par un épisode de forte chaleur de type feu de cheminée (simulé dans cette étude par un essai de sécurité) puisque les émissions polluantes relevées avec ce système, avant et après essai de sécurité, s'avèrent comparables, compte tenu des écarts types relevés ;

- ce système n'a pas d'impact négatif sur l'acidité globale (le pH) des condensats et il apparaît même que celle-ci tend à réduire lorsque ce système est mis en fonctionnement (tendance qui reste à confirmer en l'absence de mesure de reproductibilité sur ces résultats).

*Système électrostatique Airbox*

Parallèlement, la campagne d'essais menée sur le système électrostatique Airbox, mis en œuvre sur un insert VARIA 1Vh fonctionnant en allure nominale, révèle que :

- ce système ne présente pas d'efficacité de réduction significative pour les différents polluants considérés (CO, THC, TSP en masse,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{0.1}$  en nombre) ;
- ce système présente une tendance à augmenter les émissions de CO et diminuer les émissions de particules (TSP en masse,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$  et  $\text{PM}_{0.1}$  en nombre), mais ces tendances ne sont pas significatives compte tenu de la variabilité des résultats : les concentrations moyennes correspondantes s'avèrent comparables avec Airbox à l'arrêt et en fonctionnement, en tenant compte des

écarts types relevés ;

- la répartition granulométrique (en nombre) des particules n'est pas impactée par la mise en place de ce système de réduction des polluants, en tenant compte des écarts types relevés ;
- ce système ne résiste pas à un épisode de type feu de cheminée (et en particulier à une température maximale des fumées de 488 °C), puisqu'il n'a pas pu être remis en fonctionnement à l'issue de l'essai de sécurité réalisé dans le cadre de cette étude ;
- ce système n'a pas d'impact négatif sur l'acidité des condensats (pH de l'ordre de 3 avec ce système en fonctionnement et à l'arrêt), et il apparaît même que la concentration des différents acides considérés tend à réduire lorsque ce système est mis en fonctionnement (tendance qui reste à confirmer en l'absence de mesure de reproductibilité sur ces résultats).

#### *Système électrostatique ZumikOon*

Enfin, la campagne d'essais menée sur le système électrostatique ZumikOon, mis en œuvre sur un insert OPTIMA L fonctionnant en allure nominale, révèle que :

- ce système présente une efficacité de réduction significative pour :

- les  $PM_{10}$ , les  $PM_{2.5}$  et les  $PM_{1}$ , en nombre, avec une valeur moyenne de 75 % en nombre (et une gamme d'efficacité comprise entre 39 % et 91 % au cours de cette étude) ;
- les  $PM_{0.1}$ , en nombre, avec une valeur moyenne de 75 % en nombre (et une gamme d'efficacité comprise entre 33 % et 93 % au cours de cette étude).

- ce système présente une tendance à augmenter les émissions de CO et diminuer les émissions de TSP en masse, mais ces tendances ne sont pas significatives compte tenu de la variabilité des résultats : les concentrations moyennes correspondantes s'avèrent comparables avec ZumikOon à l'arrêt et en fonctionnement, en tenant compte des écarts types relevés ;

- un léger décalage de la répartition granulométrique (en nombre) vers les particules de plus grand diamètre et l'apparition d'un pic de particules de très faible diamètre peuvent être observés entre les essais avec ZumikOon à l'arrêt et avec ZumikOon en fonctionnement. Cette modification de la répartition granulométrique des particules pourrait être expliquée soit par la mise en fonctionnement du ventilateur de refroidissement de l'électrode du ZumikOon, soit par une variation dans les conditions de fonctionnement de l'appareil de chauffage testé ;

- les performances du système ZumikOon ne semblent pas être affectées par un épisode de forte chaleur de type feu de cheminée (simulé dans cette étude par un essai de sécurité) puisque les émissions polluantes relevées avec ce système, avant et après essai de sécurité, s'avèrent comparables, compte tenu des écarts types relevés. Il est toutefois important de rappeler que ces conclusions sont fortement dépendantes du positionnement du système ZumikOon par rapport à la buse de l'appareil de chauffage testé, et que des températures de fumées élevées (supérieures à 400 °C au niveau de l'électrode) peuvent dégrader le fonctionnement de ce système, comme l'ont montré les essais préliminaires effectués dans le cadre de cette étude. Pour mémoire, suite à ces essais préliminaires, une longueur de 5 fois le diamètre du conduit a été mise en place entre la buse de l'appareil de chauffage et le tuyau d'adaptation du système ZumikOon (au lieu de 2 fois le diamètre du conduit, comme spécifié dans la notice) ;

- Ce système conduit globalement à une augmentation de la concentration des différents acides considérés, excepté l'acide nitrique, et par voie de conséquence à une augmentation de l'acidité globale des condensats. En l'absence de mesure de reproductibilité sur ces résultats, cette tendance reste à confirmer, mais cela implique de porter une attention particulière aux risques de corrosion des conduits situés en aval du système ZumikOon.

#### **Autres enseignements**

Les courbes de répartition granulométrique des particules, en nombre, de l'ensemble des appareils et systèmes de post-traitement testés sont reportées sur la figure 4.

Pour l'ensemble des appareils de chauffage considérés dans cette étude (munis ou non de système de post-traitement), les particules émises sont majoritairement des particules de diamètre inférieur à 1  $\mu m$ . Les émissions moyennes de  $PM_{10}$ , en nombre, se sont révélées supérieures à  $2.10^6$  particules. $cm^{-3}$  à 13 % de  $O_2$  indépendamment des solutions testées et inférieures à  $4.10^7$  particules. $cm^{-3}$  à 13 % de  $O_2$  pour les appareils classiques les plus émissifs en l'absence de post-traitement. Ces résultats s'avèrent ainsi plutôt faibles comparés à la gamme de valeurs reportée dans la littérature, à savoir  $1,5.10^7$  -  $10,1.10^7$  particules. $cm^{-3}$  à 13 % de  $O_2$  selon Hueglin *et al.* (1997) [15],  $1,5.10^7$  -  $8,0.10^7$  particules. $cm^{-3}$  selon Hedberg *et al.* (2002) [16] et respectivement  $0,5.10^7$  -  $6,3.10^7$  particules. $cm^{-3}$  à 13 % de  $O_2$  sur fumées sèches pour des chaudières à bois et  $1,4.10^7$  -  $13,4.10^7$  particules. $cm^{-3}$  à 10 % de  $O_2$  (sur fumées brutes) pour des appareils à granulés selon Johansson (2002) [17].

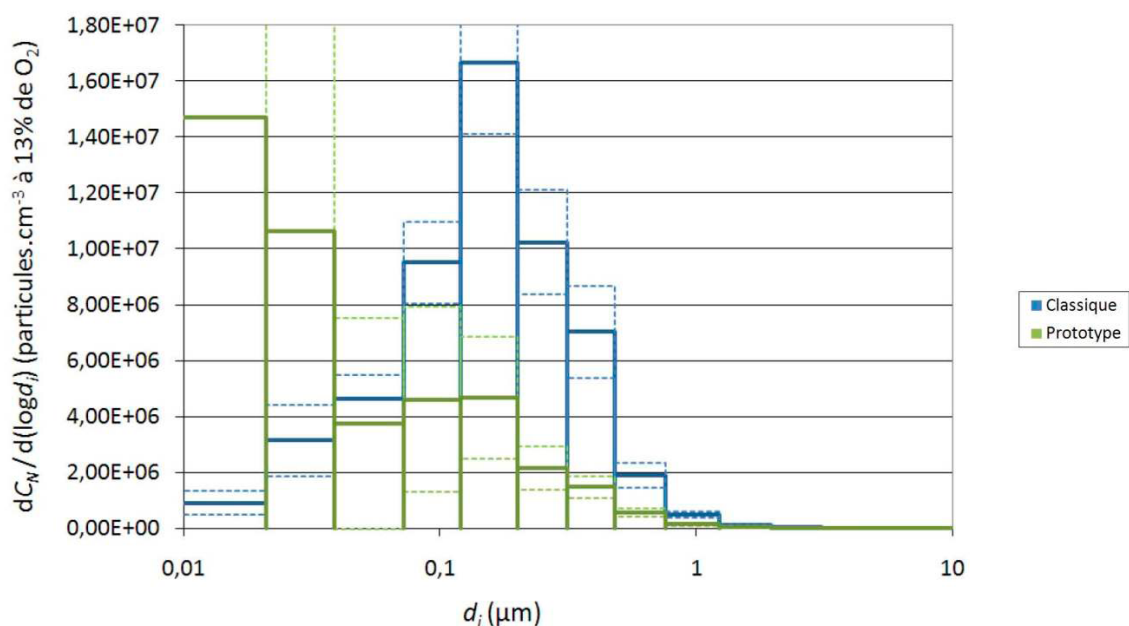


Fig. 4a. Pour l'insert XP68 (prototype) et l'insert OPTIMA L (classique), sur toute la durée de la charge (phase transitoire + régime stabilisé).

*For XP68 inset (prototype) and OPTIMA L inset (classical), during the whole load duration (Transient phase + Steady-state conditions).*

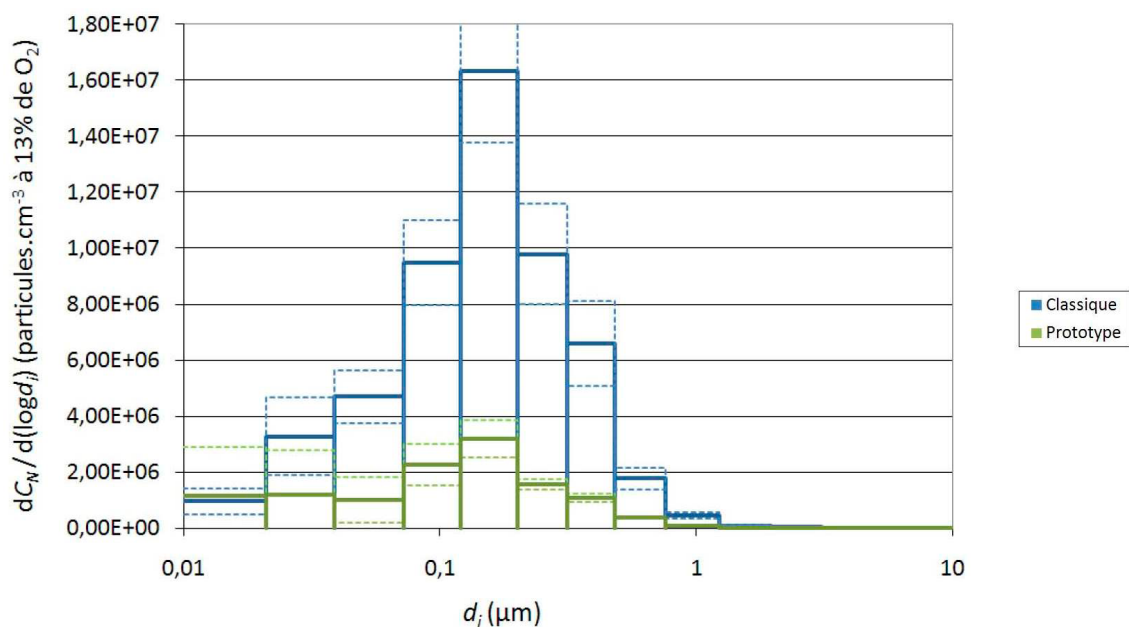


Fig. 4b. Pour l'insert XP68 (prototype) et l'insert OPTIMA L (classique), lors du régime stabilisé uniquement (après les 3 premières minutes de la charge).

*For XP68 inset (prototype) and OPTIMA L inset (classical), during steady-state conditions only (after the 3 first minutes of the load).*

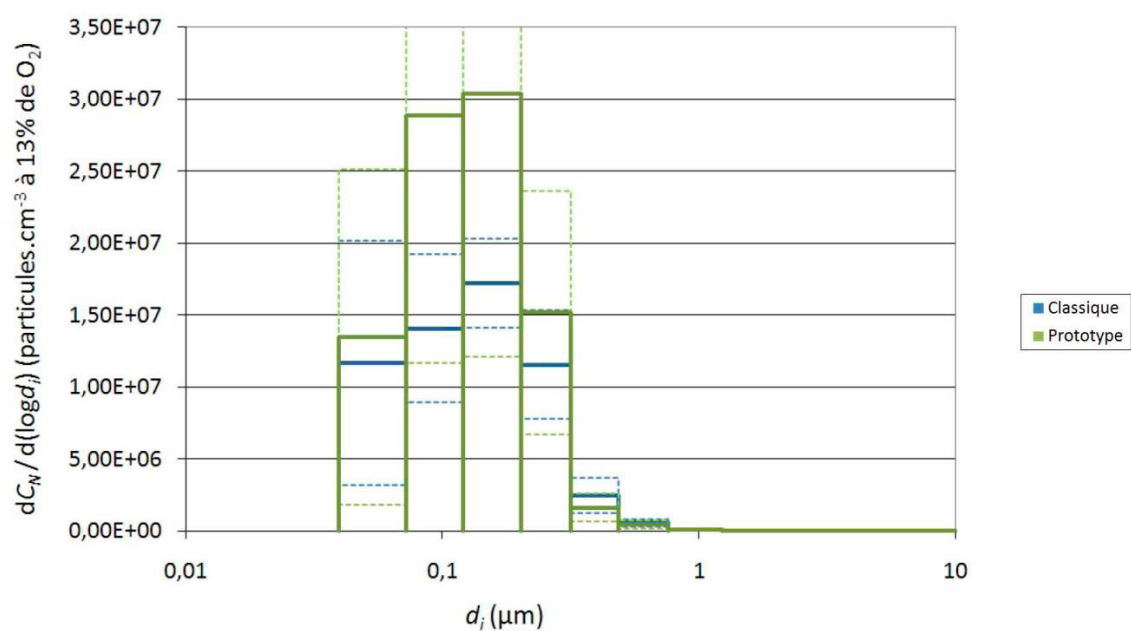


Fig. 4c. Pour le poêle ILOT (prototype) et le poêle ARGOS (classique).  
*For ILOT stove (prototype) and ARGOS stove (classical).*

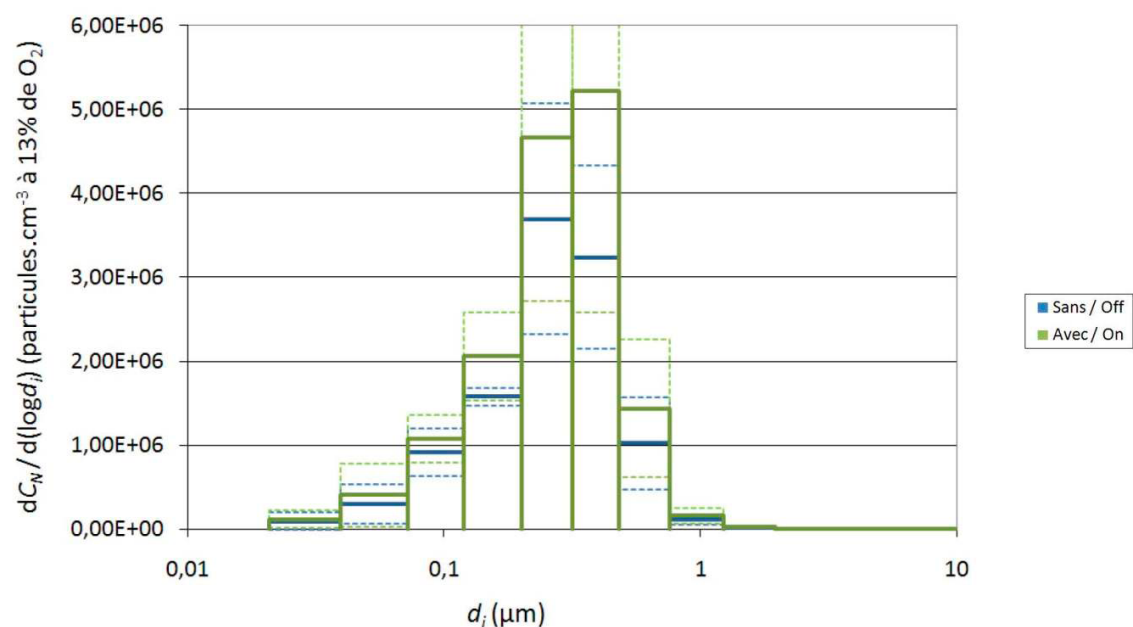


Fig. 4d. Pour l'insert ULYS 700 ZE, avec et sans catalyseur  $\text{Æ CO}$ .  
*For ULYS 700 ZE inset, with and without  $\text{Æ CO}$  catalyst.*

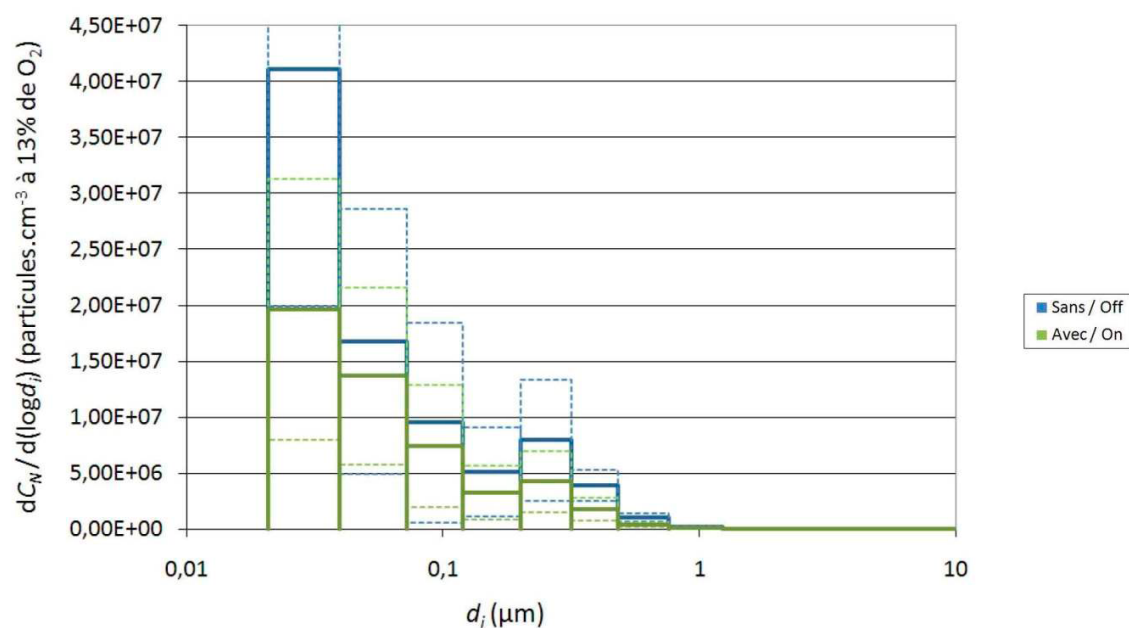


Fig. 4e. Pour l'insert VARIA 1Vh avec système électrostatique Airbox à l'arrêt et en fonctionnement.

*For VARIA 1Vh inset with Airbox electrostatic system idle or in operation.*

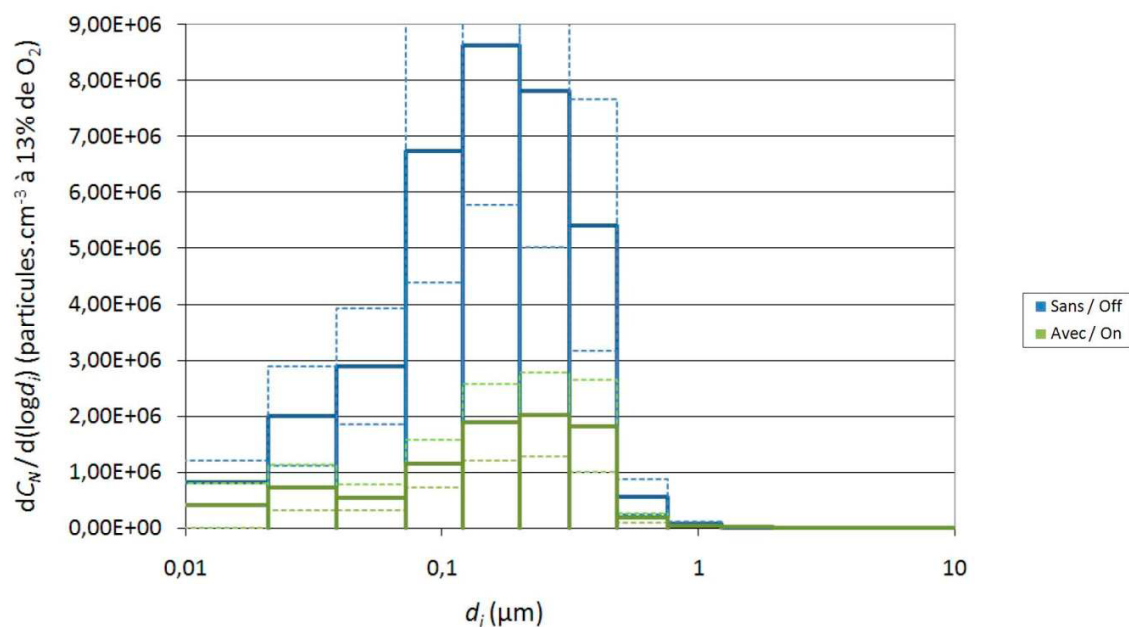


Fig. 4f. Pour l'insert OPTIMA L avec système électrostatique ZumikØon à l'arrêt et en fonctionnement.

*For OPTIMA L inset with ZumikØon electrostatic system idle or in operation.*

Figure 4. Courbes de répartition granulométrique des particules, en nombre.

*Particle size distribution curves, in number.*

Plus particulièrement, pour la majorité des appareils testés (insert ULYS 700 ZE, insert OPTIMA L, poêle ARGOS, poêle ILOT), la fraction particulaire prédominante en nombre est celle des  $PM_{10}$ , et la répartition granulométrique (en nombre également) indique que les particules prédominantes sont celles de 0,1-0,3  $\mu m$  de diamètre. Il s'agit là d'une répartition granulométrique relativement classique pour ce type d'appareil, comme en attestent les gammes de diamètre prédominant reportées par Hueglin *et al.* (1997 [15], Hedberg *et al.* (2002) [16] et Johansson (2002) [17], à savoir 0,05-0,30  $\mu m$ .

L'insert VARIA 1Vh est quant à lui source de particules plus fines, puisque la fraction particulaire prédominante est celle des  $PM_{0,1}$ . La répartition granulométrique (en nombre) des particules émises par cet appareil est caractérisée par deux modes distincts. Les particules prédominantes (en nombre, dans le mode nucléation) sont les particules de 0,03  $\mu m$  de diamètre, tandis que les particules de 0,25  $\mu m$  présentent également un pic de concentration (dans le mode accumulation).

Parallèlement, en considérant l'ensemble de la charge d'essai, l'insert XP68 présente également ce type de répartition granulométrique, avec des particules prédominantes de 0,015  $\mu m$  de diamètre dans le mode nucléation et des particules prédominantes de 0,15  $\mu m$  de diamètre dans le mode accumulation.

Les résultats obtenus sur l'insert XP68, et plus particulièrement les constatations effectuées sur l'évolution des émissions de particules ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$  et  $PM_{0,1}$  en nombre) au cours de la charge, mettent en évidence l'impact non négligeable que peut avoir la phase transitoire, c'est-à-dire la phase d'allumage/reprise du feu en début de charge, sur les résultats de mesure des particules. Il convient donc de définir précisément la durée de référence pour la mesure des polluants (et plus spécifiquement des particules, en nombre) dans le cadre de la caractérisation des émissions du bois/biomasse.

Pour mémoire, rappelons que si la mesure du CO selon les normes NF EN 13229 et NF EN 13240 et leurs amendements [8], [9], [10], [11], [12] est réalisée sur toute la durée de la charge, la mesure des TSP (et des THC) selon le protocole DIN CERTCO [13] est effectuée sur une durée de 30 minutes, 3 minutes après le début de la charge.

Ainsi, les résultats de cette étude montrent qu'une prise en compte de la totalité de la durée de la charge semble indispensable pour rendre compte pleinement des performances de l'appareil/du système en condition d'utilisation. Toutefois, ces résultats mettent également en évidence la varia-

bilité importante qui peut caractériser la période transitoire initiale (correspondant aux 3 premières minutes de la charge), en particulier sur les mesures de particules en nombre ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$ ,  $PM_{0,1}$ ), et donc la difficulté à obtenir des mesures reproductibles en intégrant cette période transitoire, pour certains appareils.

D'une façon générale, une dispersion non négligeable des résultats d'émissions de polluants gazeux et particulaires a été observée au cours de cette étude, avec des écarts types généralement plus faibles pour différents essais d'une même journée que pour des essais effectués sur différentes journées. Ce constat laisse ainsi penser que les conditions d'allumage de l'appareil (et éventuellement les conditions atmosphériques) peuvent avoir un impact non négligeable sur les émissions polluantes générées.

Dans ces conditions, il semble donc raisonnable de formuler les recommandations suivantes pour de futures études dans ce domaine, *a minima* pour les mesures de particules en nombre (pour lesquelles cette variabilité apparaît d'autant plus marquée) :

- réaliser au moins deux essais de reproductibilité par journée d'essais ;
- considérer les résultats d'au moins deux journées d'essais distinctes.

Les résultats de cette étude mettent également en évidence le fait que la variabilité de la combustion dépend aussi des caractéristiques de l'appareil de chauffage lui-même. En effet, il apparaît par exemple que la dispersion des résultats de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$  et  $PM_{0,1}$  en nombre est nettement plus importante pour l'insert VARIA 1Vh, le poêle ILOT et l'insert XP68 que pour les autres appareils considérés dans cette étude (insert ULYS 700 ZE, insert OPTIMA L, poêle ARGOS), avec un écart type d'au moins 60 % (de la valeur moyenne) sur les mesures de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  et  $PM_1$  en nombre, comparé à 20 à 30 % (de la valeur moyenne) pour les autres appareils.

Ces deux derniers constats soulèvent donc la question de la difficulté d'évaluer l'efficacité d'un système de post-traitement donné, indépendamment des caractéristiques de l'appareil de chauffage sur lequel il est installé.

Ainsi, si les résultats de l'évaluation d'un ensemble {appareil de chauffage + système de post-traitement} peuvent être supposés fiables en respectant les recommandations précédemment mentionnées, les résultats de l'évaluation d'un système de post-traitement seul ne sont, par définition, *a priori* pas transposables d'un appareil de chauffage à l'autre.

## Conclusions

Cette étude a permis de montrer qu'une réduction des émissions polluantes est possible par les deux voies considérées, c'est-à-dire tant par méthodes primaires que par méthodes secondaires.

Il ressort en particulier que :

- des teneurs moyennes très faibles en CO (inférieures à 0,10 % à 13 % de O<sub>2</sub>) ont pu être obtenues au cours de cette étude, à la fois par l'optimisation de la combustion à la source et par l'utilisation du post-traitement catalytique ;
- des teneurs en TSP (en masse) en moyenne particulièrement faibles ont été obtenues pour les appareils optimisés testés (13-24 mg.Nm<sup>-3</sup> à 13 % de O<sub>2</sub>), comparées aux valeurs moyennes relevées pour les appareils équipés de systèmes de post-traitement (42-80 mg.Nm<sup>-3</sup> à 13 % de O<sub>2</sub>) et aux appareils classiques testés en l'absence de systèmes de post-traitement (47-118 mg.Nm<sup>-3</sup> à 13 % de O<sub>2</sub>) ;
- pour l'ensemble des appareils de chauffage considérés dans cette étude, les particules émises sont majoritairement des particules fines et ultrafines (PM<sub>1</sub> et PM<sub>0,1</sub>) avec des valeurs de concentration en nombre très variables en fonction des appareils et des solutions testés ;
- parmi les systèmes électrostatiques de post-traitement testés, le système ZumikOon permet de réduire significativement les émissions de particules fines en nombre, mais présente, comme le système Airbox, une sensibilité notable à la chaleur ;
- quelle que soit la solution testée lors de cette étude, les émissions moyennes de PM<sub>1</sub> se sont révélées supérieures à 2.10<sup>6</sup> particules.cm<sup>-3</sup> à 13 % de O<sub>2</sub>.

Ainsi, l'optimisation de la combustion apparaît comme une alternative prometteuse, et ce d'autant plus qu'elle conduit à une suppression des polluants à la source *via* une solution directement intégrée à l'appareil, au contraire des systèmes de post-traitement qui supposent une mise en œuvre spécifique et une évacuation ultérieure des particules piégées *via* un entretien régulier.

Les auteurs tiennent à remercier l'ADEME pour son soutien financier, ainsi que les industriels impliqués dans ce projet : TEN (fabricant de conduits, 44), D2I/INVICTA (fabricant d'appareils de chauffage résidentiels, 08), FONDIS (fabricant d'appareils de chauffage résidentiels, 68), LORFLAM (fabricant d'appareils de chauffage résidentiels, 56).

## Références bibliographiques

- [1] CITEPA. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – Séries sectorielles et analyses étendues – CITEPA, Ref. CITEPA 829, avril 2010 : 216 p.
- [2] Pope III CA, Bates DV, Raizenne ME. Health effects of particulate air pollution : Time for reassessment – *Environ Health Perspect*, 1995 ; 103 (5) : 472-480.
- [3] Ålander T, Tissari J, Raunemaa. The influence of air to fuel ratio on organic and elemental carbon content in wood combustion aerosol – *J Aerosol Sci*. 1999 ; 30 (Suppl. 1) : S787-8.
- [4] Wiinikka H, Gebart R. Experimental investigations of the influence from different operating conditions on the particle emissions from a small-scale pellets combustor – *Biomass Bioenergy* 2004 ; 27 : 645-52.
- [5] Schmatloch V, Rauch S. Design and characterisation of an electrostatic precipitator for small heating appliances – *J Electrostat* 2005 ; 63 : 85-100.

- [6] Ozil F, Tschamber V, Haas F, Trouvé G. Efficiency of catalytic processes for the reduction of CO and VOC emissions from wood combustion in domestic fireplaces – *Fuel Process Technol.* 2009 ; 90 : 1053-61.
- [7] ADEME, Projet ReduPo Bois – Évaluation de solutions de réduction des émissions polluantes (gazeuses et particulaires) d'appareils de chauffage résidentiels alimentés à la biomasse, Rapport final, ADEME, mars 2012 : 30 p.
- [8] NF EN 13229, Foyers ouverts et inserts à combustibles solides – Exigences et méthodes d'essai. AFNOR/CEN, juin 2002 : 72 p.
- [9] NF EN 13229/A1, Foyers ouverts et inserts à combustibles solides – Exigences et méthodes d'essai – AFNOR/CEN, octobre 2003 : 22 p.
- [10] NF EN 13229/A2, Foyers ouverts et inserts à combustibles solides – Exigences et méthodes d'essai – AFNOR/CEN, juin 2005 : 23 p.
- [11] NF EN 13240, Poêles à combustibles solides – Exigences et méthodes d'essai – AFNOR/CEN, juin 2002 : 59 p.
- [12] NF EN 13240/A2, Poêles à combustibles solides – Exigences et méthodes d'essai – AFNOR/CEN, juin 2005 : 24 p.
- [13] DIN CERTCO. DIN Plus – Certification Scheme – Fireplace insert appliances and cassettes fired by solid fuels with low-pollution combustion – DIN CERTCO, 2008 : 14 p.
- [14] ADEME, Charte de Qualité Flamme Verte 2011 – Appareils de chauffage indépendants au bois – ADEME, janvier 2011 : 29 p.
- [15] Hueglin CH, Gaegauf CH, Künzel S, Burtscher H. Characterization of wood combustion particles : Morphology, mobility and photoelectric activity – *Environ Sci Technol.* 1997 ; 31 : 3439-47.
- [16] Hedberg E, Kristensson A, Ohlsson M *et al.* Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove – *Atmos Environ.* 2002 ; 36 : 4823-37.
- [17] Johansson LS. Characterisation of particle emissions from small-scale biomass combustion – Thesis for the degree of Licentiate of Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2002 : 53 p.