

## ARTICLES

# Caractérisation des émissions issues de la combustion du bois dans deux appareils indépendants

## Characterization of compounds emitted by domestic wood heating from two types of firewood

Laurence ROBERT\*

### Résumé

Dans le but de connaître l'impact du chauffage domestique au bois sur la pollution atmosphérique, une étude, co-financée par l'ADEME, a été menée au CSTB de Nantes sur la caractérisation physico-chimique des fumées issues de la combustion de bûches de chêne dans des appareils indépendants, non raccordés à une installation de chauffage central. Afin d'être représentatif du parc de chauffage national, et de l'utilisation des foyers par les particuliers, deux appareils ont été étudiés : un foyer fermé classique muni de deux admissions d'air et un foyer encastrable type *insert*, labellisé « *Flamme Verte 2004* ». Trois classes d'humidité ont été retenues ainsi que deux régimes de fonctionnement, nominal et réduit. Une analyse de l'influence de ces paramètres est présentée. Cet article précise entre autre, les facteurs d'émissions des principaux polluants, en g.kg<sup>-1</sup> de bois sec brûlé : le monoxyde de carbone, entre 47 et 207, les hydrocarbures imbrûlés totaux, entre 0,7 et 12,2 et les poussières, entre 0,2 et 14,3. La présence de certains HAP a été mise en évidence autant sur la phase solide que sur la phase gazeuse des fumées. Les poussières émises ont été caractérisées d'un point de vue physico-chimique : composition élémentaire, mise en évidence de HAP et HAM, répartition granulométrique. Enfin, une corrélation entre les différents composés polluants est présentée ; elle permet de tenter de dégager un seul composé identifié comme indicateur de pollution potentiel : il s'agit du monoxyde de carbone. Même si comparée à d'autres combustibles, tels que fuel ou gaz, l'utilisation du bois génère plus de composés imbrûlés : CO, HC, poussières, il reste néanmoins moins émetteur de SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub>. Cette constatation ne doit pas conduire à une remise en cause de l'intérêt énergétique et environnemental du bois, mais au contraire, elle doit permettre d'une part aux industriels de la filière bois énergie de développer d'autres types d'appareils mieux adaptés au conditionnement de ce type d'énergie et d'autre part, aux utilisateurs de prendre conscience de bonnes pratiques.

### Abstract

To know the impact of the domestic heating using firewood about atmospheric pollution, a study was carried out in the CSTB Nantes related to smoke characterization resulting from the combustion of oak logs in fireplaces. At the same time, in order to be representative as well as the heating national park and the common use of fireplace, two heating apparatuses were studied: a traditional fireplace provided with two air inlets and a fireplace "insert" with the label "Flamme Verte 2004". Three classes of moisture were retained and two different utilisations: nominal operating and reduced operating. An analysis of the influence of these parameters is presented. This article specifies the emitted quantities of the principal pollutants, expressed in g.kg<sup>-1</sup> of seasoned wood: carbon monoxide, between 47 and 207, unburned hydrocarbons, between 0,7 and 12,2 and dust between 0,2 and 14,3. The presence of benzene and HAP was highlighted as well on the dust as in the smoke. A chemical characterization of dust was carried out. Lastly, a correlation between the various polluting compounds is presented in order to determine only one compound identified like a potential indicator of pollution: the carbon monoxide. In this initiative, the carbon monoxide doesn't consider as the only polluting substance, but from the only knowledge of this compound, it's a question to be able to consider the global level of pollution engendered. The use of the wood generates more unburned compounds such CO, HC, dusts than fuel or gas, but much less of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>. This observation doesn't have to lead to a questioning of the energetic and environmental interest of the wood, but on the contrary, this has to allow the manufacturers to develop the other types of devices better adapted to the wood combustion and also, to the users to become aware of good practices.

\* Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) - 11, rue Henri Picherit - BP 82341 - 44323 Nantes Cedex 03.  
Contact : robert@cstb.fr - Tél. : 02 40 37 20 83 - Fax : 02 40 37 20 60.  
Avec la participation de : ADEME, centre d'Angers - 2, square Lafayette - BP 406 - 49004 Angers.

## 1. Introduction

Les efforts importants réalisés ces dernières années dans les domaines des transports et de l'industrie (par exemple, l'amélioration des rendements énergétiques, la désulfuration des fiouls, la catalyse des gaz d'échappement ou la re-circulation de ces derniers, la suppression du plomb dans l'essence, le renouvellement du parc automobile...) ont entraîné une nette diminution de certaines émissions polluantes. De ce fait, le poids des installations de chauffage dans la pollution atmosphérique globale risque d'augmenter de façon significative, et ce, malgré les améliorations substantielles apportées à la qualité de la combustion par l'optimisation notamment du fonctionnement des brûleurs. Il est probable que, dans les agglomérations, la pollution des installations de chauffage prenne le pas sur celle des transports, aujourd'hui encore largement dominante [1, 2].

Devant la nécessité de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir les matières premières renouvelables et ce, dans le cadre du développement durable, il ne fait plus de doute que le bio combustible bois constitue une alternative de choix au remplacement des combustibles fossiles. La France est le premier pays consommateur de bois énergie en Europe, et ce, notamment, du fait du marché de chauffage domestique. Avec six millions de logements équipés d'un appareil de chauffage au bois et plus de 200 000 appareils commercialisés chaque année, le chauffage au bois représente un véritable enjeu : enjeu énergétique, environnemental et de santé publique.

La filière bois, notamment le bois énergie, a depuis longtemps intégré la notion de gestion durable et de respect de l'environnement dont tous les secteurs industriels cherchent à s'emparer aujourd'hui. Les perspectives de consommation des prochaines décennies montrent que dans un contexte où l'environnement va jouer un rôle de plus en plus important, le bois va s'affirmer comme un matériau incontournable parce qu'il est source de matière première et d'énergie, et l'un des seuls matériaux à caractère indéfiniment renouvelable.

Le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), en tant qu'acteur principal dans le bâtiment, ne peut pas ignorer l'essor de la filière bois énergie. Son rôle étant axé sur la maîtrise des produits et procédés émergents du bâtiment (aménagement, amélioration, protection...), il se doit de connaître les faits, les enjeux, et les tendances relatifs à tout secteur du bâtiment pour pouvoir promouvoir les nouvelles technologies et avancer des arguments relatifs à la qualité de vie, au confort, au respect de l'environnement, à la maîtrise de l'énergie ; arguments chers aux architectes, maîtres d'œuvres et surtout aux usagers.

La combustion du bois génère différents types de polluants en quantité non négligeable, notamment en terme d'émission de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures imbrûlés et de poussières. En France, pays

où la forêt couvre la majeure partie du territoire, où la valorisation de la filière bois énergie est en plein essor, et où la politique environnementale reste une préoccupation de première importance, nous constatons que très peu, voire quasiment pas d'études sont à même de dresser un bilan des émissions polluantes issues du chauffage domestique au bois. C'est dans ce contexte que les travaux proposés trouvent leur intérêt. C'est pourquoi le CSTB a engagé, en partenariat avec l'ADEME, une étude sur la caractérisation des émissions polluantes issues du chauffage domestique utilisant du bois bûche, et ce, exclusivement pour des appareils indépendants. Cette première étude ne représente qu'une partie des objectifs du CSTB qui sont d'étendre cette caractérisation à l'ensemble de la biomasse, dans l'optique de prévoir l'impact de sa combustion sur la pollution de l'air.

## 2. Démarche expérimentale

### 2.1. Conditions opératoires

La démarche expérimentale suivie s'est voulue très proche de l'utilisation que fait le particulier de son foyer à bois, afin de pouvoir obtenir une quantification réaliste des émissions polluantes de la filière combustion domestique du bois bûche. En ce sens, il a été installé dans le laboratoire deux appareils individuels à bois représentatifs du parc de chauffage actuel :

- un foyer fermé classique, d'un âge estimé à 15 ans, muni de deux admissions d'air ;
- un foyer fermé encastrable neuf (« insert ») labellisé « *Flamme Verte* » muni d'une seule admission d'air.

Ces appareils ont été raccordés à un conduit de fumées en acier inox double peau sur une hauteur de cinq mètres, et ce, afin de représenter la hauteur fréquemment rencontrée chez l'utilisateur. Ce conduit a été instrumenté de façon à pouvoir analyser en continu, via une centrale d'acquisition, les évolutions de différents paramètres et polluants (Figure 1), à savoir :

- la température des fumées  $T_f$  et la température de paroi  $T_p$  ;
- la vitesse des fumées par un anémomètre à hélice HONTZ ;
- les émissions de poussières (PM) par un analyseur à post diffusion laser OLDHAM EP 2000 ;
- les émissions d'hydrocarbures totaux (HC) par un COSMA GRAPHITE utilisant l'ionisation de flamme ;
- les émissions de monoxyde et dioxyde de carbone (respectivement CO et CO<sub>2</sub>) par des analyseurs COSMA BERYL fonctionnant par spectroscopie IR ;
- les émissions d'oxydes d'azote et de soufre (respectivement NO<sub>x</sub> et SO<sub>x</sub>) par cellules électrochimiques par le biais d'un analyseur ECOM KD.

Les étendues de mesures de chaque appareil sont précisées dans le tableau 1.

Les HAP ainsi que le benzène et toluène ont été prélevés dans l'effluent gazeux sur un filtre à charbon actif et sont ensuite analysés par chromatographie (HPLC).

En ce qui concerne les particules solides véhiculées par les fumées, autrement nommées poussières ou

cendres volantes, elles ont été prélevées par un filtre mécanique expérimental. Les analyses granulométriques ont été réalisées à l'aide d'un granulomètre laser COULTER en utilisant le modèle optique de Fraunhofer. Les diverses analyses de ces poussières ont été confiées au Laboratoire Municipal de Rouen.

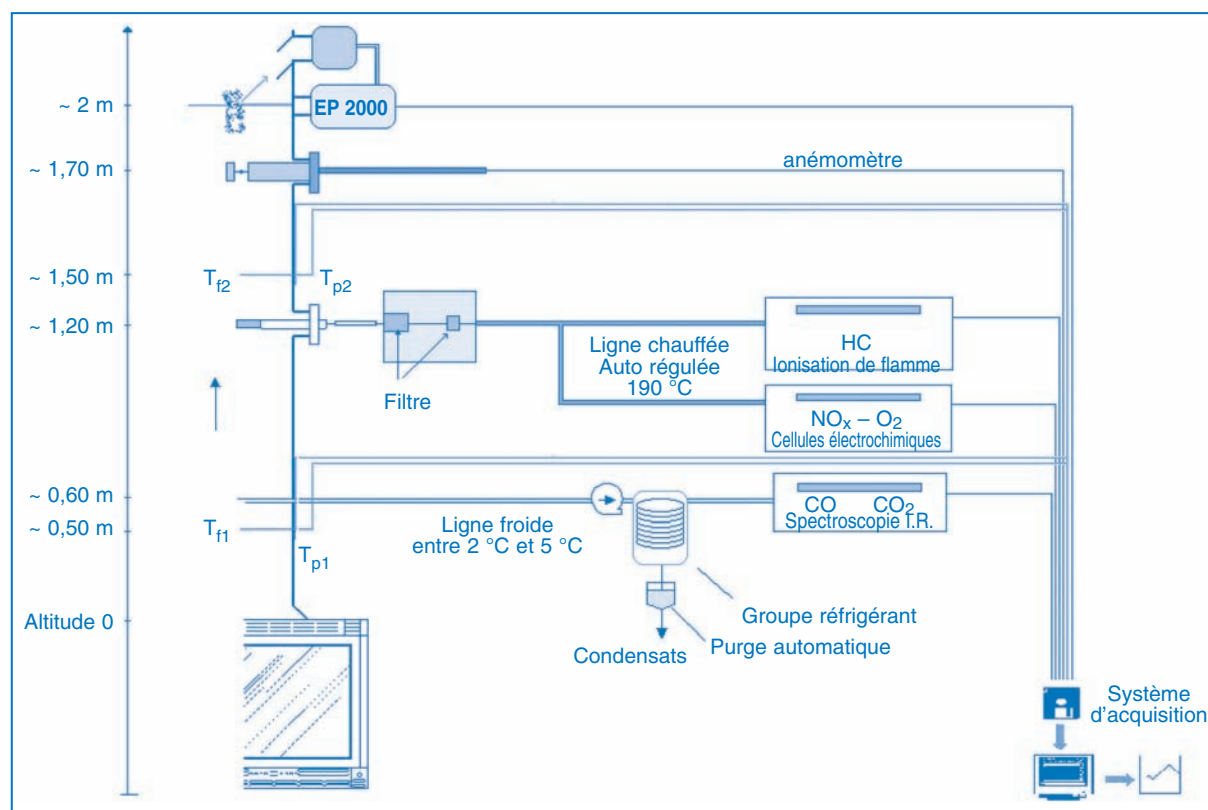


Figure1.  
Montage expérimental.  
Expérimental bench.

Tableau 1.  
Caractéristiques des appareils de mesure.  
Characteristics of equipment.

Paramètres mesurés	Principe de mesure	Plage de mesure	Précision de mesure
CO	Spectroscopie IR	0 – 20 %	1 % PE (1)
CO <sub>2</sub>	Spectroscopie IR	0 – 20 %	1 % PE
HC totaux	Ionisation de flamme	0 – 10 000 ppmv	1 % de la gamme
NO <sub>x</sub>	Électrochimie	0 – 2 000 ppmv	5 % PE
SO <sub>x</sub>	Électrochimie	0 – 4 000 ppmv	5 % PE
Poussières	Post diffusion laser	0 – 100 g.m <sup>-3</sup>	0,5 % de la gamme
Vitesse	Anémométrie à hélice	0,3 – 20 m.s <sup>-1</sup>	0,5 % PE
Température	Thermocouple type K	0 – 999 °C	2 % PE

(1) PE : pleine échelle.

Enfin, afin d'approfondir la connaissance des ces émissions polluantes, on a cherché à quantifier l'influence de certaines pratiques du consommateur, notamment le fonctionnement en allure réduite par rapport à l'allure nominale et l'emploi de bois de différentes humidités. Trois classes d'humidité ont été retenues, dont les deux dernières correspondent à la classification de la marque NF bois de chauffage :

- C<sub>1</sub> : le bois très sec dont l'humidité est inférieure à 12 % : bois de palette (résineux) à 8-9 % en moyenne ;
- C<sub>2</sub> : le bois sec dont l'humidité est comprise entre 15 et 20 % : bûches de chêne à 17-18 % en moyenne ;
- C<sub>3</sub> : le bois humide dont l'humidité dépasse 20 % : bûches de chêne à 25-26 % en moyenne.

**2.2. Méthodologie de calcul suivie**

L'ensemble des résultats est exprimé en terme de facteurs d'émission, et de ce fait exprimé en g de polluant émis ramené au kg de bois sec brûlé. En fait, les appareils fournissent une mesure de concentration exprimée en ppmv ; elle est d'une part corrigée pour tenir compte du volume de vapeur d'eau condensée (pour les échantillons prélevés à froid) puis d'autre part convertie en mg.Nm<sup>-3</sup> en tenant compte de la différence de température entre les conditions normales de température et de pression et l'échantillon au niveau de l'analyseur (éq. 1). À partir

de cette concentration on peut alors estimer la quantité moyenne de composé émise  $\bar{Q}_i$  pendant la durée  $\Delta t_i$  par le biais d'une mesure de vitesse,  $v$ , et de température de fumées (éq. 2). La vitesse sera corrigée par un coefficient  $\alpha$  pour tenir compte de l'écoulement des fumées : 0,82 si l'écoulement est turbulent ou 0,5 si l'écoulement est laminaire. Se est la section du conduit.

$$C_{mg.m^{-3}} = C_{ppmv} \times \frac{M}{22,4} \times \frac{T_{CNTP}}{T_{\text{échantillon}}} \tag{1}$$

$$\bar{Q}_i = \alpha \cdot C_{mg} \times v \times Se \cdot \frac{T_{CNTP}}{T_{\text{fumées}}} \tag{2}$$

On obtient alors la quantité totale  $Q_{\text{totale}}$  émise de chaque composé après intégration sur le temps d'échantillonnage  $\Delta t_i$  des quantités moyennes  $\bar{Q}_i$  mesurées par l'appareil adéquat (éq. 3).

$$Q_{\text{totale}} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{Q}_i \times \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \tag{3}$$

Cette démarche est synthétisée dans l'organigramme suivant (Figure 2) :

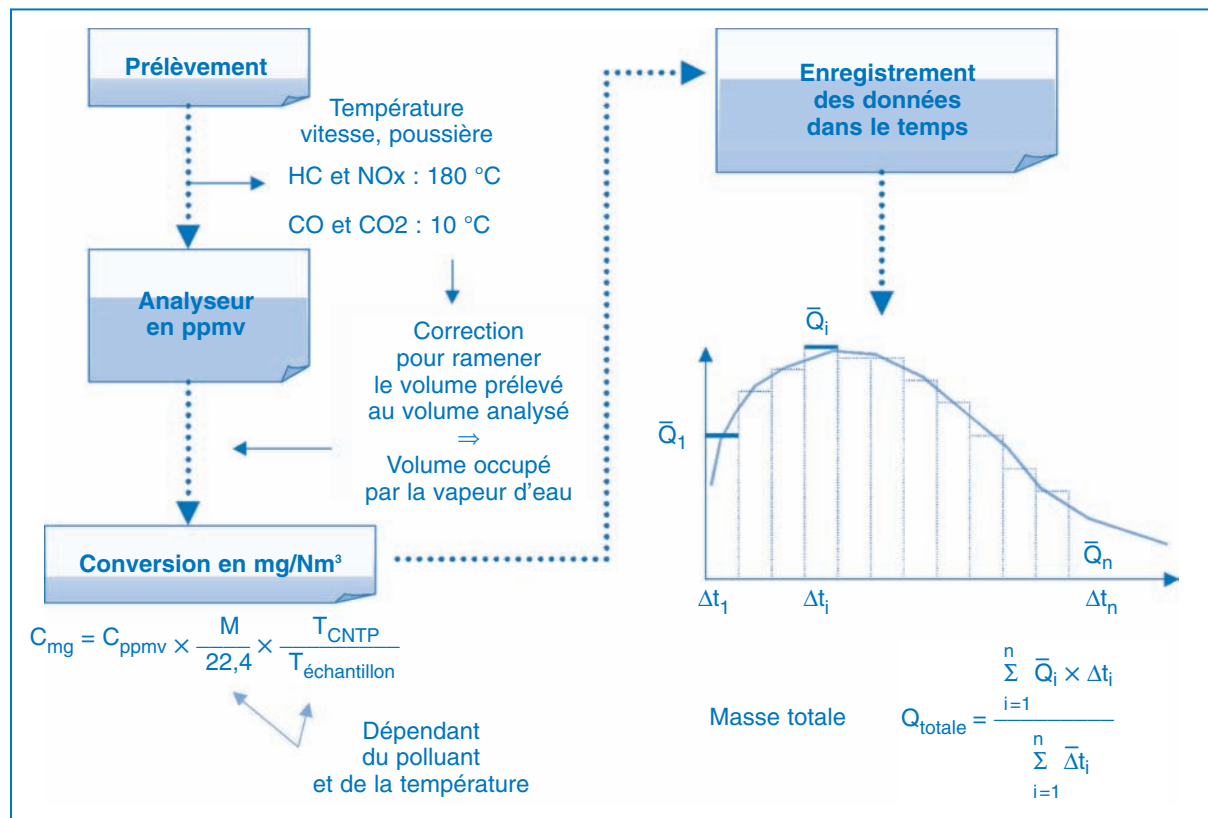


Figure 2. Méthodologie de calcul. Method for calculation.

### 3. Résultats

#### 3.1. Les émissions de poussières

Les poussières représentent la fraction de particules solides véhiculées par les fumées jusqu'à l'atmosphère. Leur « petite » taille, facilitant leur transport et leur inhalation, font d'elles un réel enjeu environnemental et de santé publique. En outre, leur présence en tant qu'aérosol dans l'atmosphère contribue à la réduction de la visibilité ainsi qu'à la salissure des façades ; elles peuvent également contribuer à des phénomènes tels que la corrosion et induire une gêne pour la photosynthèse.

Les émissions de poussières au cours de la combustion varient de 0,2 à 14,3 g.kg<sup>-1</sup> (Tableau 2) ; elles dépendent fortement de l'allure de combustion, du type d'appareil utilisé ainsi que du taux d'humidité. Quelques auteurs comme De Angelis *et al.* [3], Dash [4], Butcher *et al.* [5], ainsi qu'une étude de l'Environmental protection agency (EPA) [6] ayant réalisé des études sur les PM<sub>10</sub> (particules ayant un diamètre inférieur à 10 µm) ont abouti à des facteurs

Tableau 2.

Facteurs d'émission des poussières en g.kg<sup>-1</sup> de bois sec.  
Dust expressed in g.kg<sup>-1</sup> of seasoned wood.

Poussières g.kg <sup>-1</sup> de bois sec		C <sub>1</sub> Bois très sec : HR < 12 %	C <sub>2</sub> Bois sec : 15 < HR < 20 %	C <sub>3</sub> Bois humide : HR > 20 %
Foyer fermé	Allure nominale	---	1,6	---
	Allure réduite	8,2	11,2	14,3
Insert labellisé	Allure nominale	0,2	0,6	2,6
	Allure réduite	---	1,7	---



Figure 3.

Type de particules émises lors de la combustion du bois,  
dans un foyer classique.

Particles emitted during firewood combustion.

similaires qui s'étendent de 1 à 24 g.kg<sup>-1</sup> de bois brûlé. Cependant, leurs études s'étendent à diverses technologies : foyers ouverts, poêles, inserts, poêles à granulés, diverses conditions opératoires et divers moyens de mesures. Une étude plus récente de Hedberg [7] portant sur les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>0,9</sub>, révèle que les concentrations en PM<sub>2,5</sub> varient entre 0,1 et 2,6 g.kg<sup>-1</sup> de bois avec une moyenne de 1,3 g.kg<sup>-1</sup> et que les PM<sub>0,9</sub> varient entre 0,03 et 6 g.kg<sup>-1</sup> de bois avec une même moyenne de 1,3 g.kg<sup>-1</sup>.

En s'intéressant à la combustion instantanée d'une charge de bois (Figure 4), il a été constaté que les émissions de poussières en allure nominale ne sont importantes que durant la phase de démarrage du feu où elles peuvent atteindre près de 10 g.m<sup>-3</sup>. Elles diminuent ensuite rapidement jusqu'à des valeurs beaucoup plus faibles, quasi insignifiantes. On notera que très souvent, en allure nominale, ces émissions de poussières ne durent pas plus d'une vingtaine de minutes avec des concentrations nettement plus élevées durant les dix premières minutes. En fonctionnement réduit, on note une augmentation progressive de la concentration en poussière. Les émissions avoisinent très souvent 10 g.m<sup>-3</sup> pendant plus d'une heure (voir plusieurs heures) et ne redescendent à des valeurs insignifiantes lorsqu'il ne reste plus que des résidus charbonneux.

En ce qui concerne la composition de ces poussières, elle dépend de nombreux facteurs, une particule pouvant contenir plusieurs dizaines d'espèces chimiques différentes (sulfate, ammonium, carbone, composés organiques...) [8]. Afin d'approfondir la connaissance des poussières issues de la combustion du bois, une distribution granulométrique en volume a été réalisée. Les poussières recueillies ont une densité de 0,317 et un diamètre moyen de 13 µm (écart type : 2,8 µm) sur une étendue granulométrique de 0,2 µm à 60 µm (Figure 5). Leur répartition en classe PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub> est respectivement de 30, 10, et 4 %.

Ces résultats, concernant la taille des poussières, rendent capital, d'un point de vue environnemental et de santé public, l'approfondissement des connaissances de ce polluant solide susceptible de pénétrer si profondément les voies respiratoires de l'homme. En fait, l'analyse des poussières recueillies indique des teneurs de 36,5 % en matières minérales (on trouve généralement, selon les essences, du calcium et de la silice, puis en plus petite quantité du fer, de l'aluminium, du potassium, du phosphore, du manganèse, du magnésium [8]) et à 63,5 % en matières volatiles. Ces poussières se composent principalement de 40,9 % de carbone, de 2,7 % d'hydrogène, de 3 % d'azote et de 0,1 % de soufre. Le fort niveau de carbone présent dans les poussières est le reflet d'une combustion non complète. En outre, les présences d'hydrocarbures aromatiques monocycliques tels que le benzène et le toluène ainsi que la présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques légers dans les poussières ont été mises en évidence (Tableau 3).

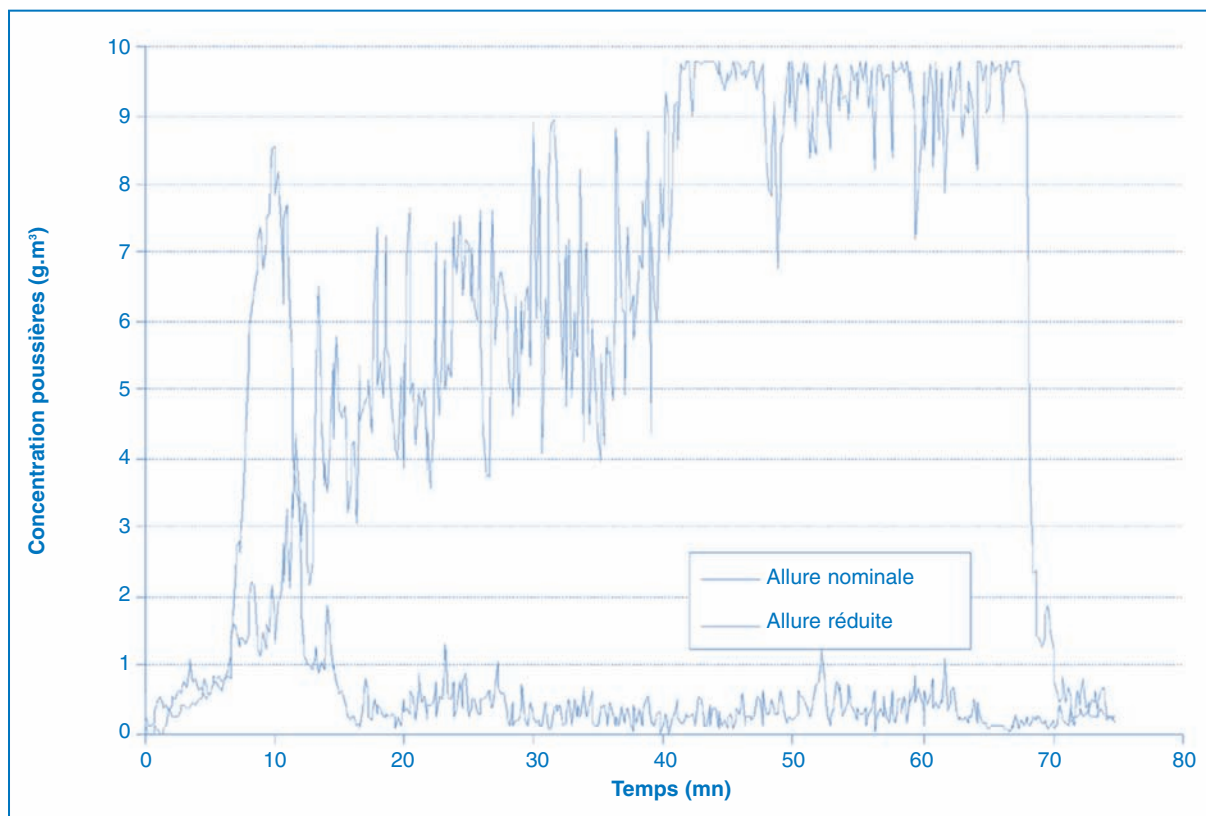


Figure 4.

Exemple d'émissions de poussières lors de la combustion d'une charge de 10 kg de bois dans un foyer classique – comparaison entre un fonctionnement nominal et réduit.

Example of dust emissions – comparison between a nominal and a reduced operation.

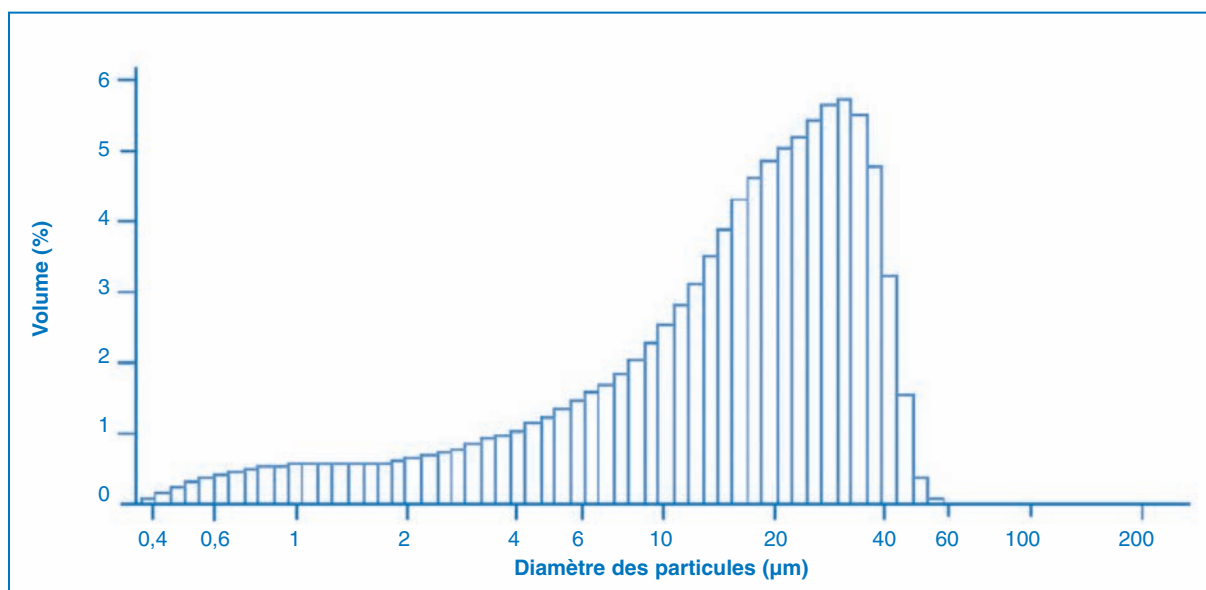


Figure 5.

Répartition granulométrique des poussières en volume.

Volume granulometric distribution of dust.

Tableau 3.  
Principaux hydrocarbures aromatiques  
contenus dans les particules en  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  de poussières.  
Aromatic hydrocarbons  
contained in dust expressed in  $\mu\text{g.kg}^{-1}$  of dust.

Principaux HAP en $\mu\text{g.kg}^{-1}$	
Phénanthrène	8 660
Pyrène	7 660
Acénaphthylène	1 300
Naphtalène	1 200
Biphényl	900
Fluorène	820
Principaux HAM en $\mu\text{g.kg}^{-1}$	
Benzène	840
Toluène	< 100

Tableau 4.  
Principaux acides carboxyliques  
contenus dans les poussières en  $\text{mg.kg}^{-1}$  de poussières.  
Organic acids contained in dust expressed in  $\text{mg.kg}^{-1}$  of dust.

Structure	Nom courant	Concentration en $\text{mg.kg}^{-1}$
$\text{CH}_3\text{COOH}$	Acide acétique	3 570
$\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$	Acide lactique	2 830
$\text{HCOOH}$	Acide formique	1 290
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$	Acide propionique	205
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	Acide butyrique	7,5
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	Acide valérique	< 5

Tableau 5.  
Facteurs d'émission du monoxyde de carbone  
en  $\text{g.kg}^{-1}$  de bois sec.  
Emission of carbon monoxide  
expressed in  $\text{g.kg}^{-1}$  of seasoned wood.

Monoxyde de carbone $\text{g.kg}^{-1}$ de bois sec		$\text{C}_1$	$\text{C}_2$	$\text{C}_3$
		Bois très sec : HR < 12 %	Bois sec : 15 < HR < 20 %	Bois humide : HR > 20 %
Foyer fermé	Allure nominale	---	66	70
	Allure réduite	47	106	156
Insert labellisé	Allure nominale	42	82	---
	Allure réduite	---	207	---

Certains composés comme le benzène et certains HAP sont extrêmement toxiques (cancérogènes reconnus) même à faible concentration. Ces résultats démontrent que les particules solides émises par la combustion du bois sont doublées d'un autre type de polluants à ne pas négliger : les hydrocarbures aromatiques. Une étude menée par Butcher *et al.* [9] confirme la présence notamment de benzène dans les fumées et les poussières à raison de 0,7 à 0,95 g de benzène émis par kilogramme de bois brûlé. Hueglin *et al.* [10] a également démontré que les particules issues de la combustion du bois renfermaient une forte concentration de HAP. En effet, le

caractère extrêmement poreux des poussières, mis en évidence par Osan [11] favorise l'adsorption de ces hydrocarbures ; ensuite ces poussières les véhiculent au plus profond du système respiratoire *via* l'atmosphère. Les problèmes de santé n'en seront que plus aigus pour l'homme et au niveau environnemental, la présence de ces composés favorise les réactions photochimiques aboutissant à des composés polluants complexes donc difficiles à appréhender et à traiter.

Outre ces composés, les matières volatiles renferment des acides carboxyliques, tel que l'acide acétique qui reflète, entre autre, le côté corrosif des poussières (Tableau 4).

### 3.2. Les composés gazeux imbrûlés

Issus d'une mauvaise combustion ou d'une combustion incomplète les polluants carbonés tels que le monoxyde de carbone (CO) ou certains hydrocarbures (HC), représentent les principaux polluants gazeux générés par la combustion du bois.

La formation de CO au cours de la combustion du bois intervient comme élément perturbateur des réactions chimiques de combustion, tant sur l'aspect libération d'énergie que sur l'utilisation de l'oxygène. De plus, ce polluant est extrêmement toxique. Très rapidement absorbé par les poumons, le CO se fixe sur l'hémoglobine dont l'affinité pour le monoxyde de carbone est 200 fois supérieure à celle pour l'oxygène. L'intoxication au monoxyde de carbone peut entraîner une mort rapide. Les émissions de CO, au cours de la combustion du bois, sont très importantes lors de la phase de démarrage, alors que la combustion est très hétérogène (Figure 6). Elles atteignent près de 10 000 ppmv (1 %). Mais dès que la combustion s'homogénéise (visible par la présence de flammes conséquentes) une baisse sensible des émissions de CO apparaît de façon nette. À ce stade, les émissions de CO ne dépassent guère 0,3 à 0,5 %. Par contre, dès que la température chute et que, de ce fait, apparaît la phase de combustion des résidus charbonneux, les émissions de CO augmentent de nouveau et ce, jusqu'à atteindre des valeurs de 0,6 à 0,9 % lors de fonctionnements en allure nominale et des valeurs de 1 à 1,5 % pour des fonctionnements en allure réduite.

De façon similaire aux émissions de CO, les hydrocarbures sont émis très nettement dès le début de la combustion, lors de la phase de démarrage, avec une baisse sensible lorsque la combustion s'homogénéise. Les émissions d'hydrocarbures remontent si la température n'offre plus un niveau suffisant à l'oxydation de ces composés (généralement entre 400 et 600 °C). Mais souvent, comme les hydrocarbures se dégagent sous forme de gaz combustibles et s'oxydent en début de combustion, il n'apparaît plus ou quasiment plus d'émissions de HC en fin de combustion, lors de la combustion des résidus charbonneux, alors qu'il se dégage encore du CO.

Les facteurs d'émission du monoxyde de carbone, ramenés à la masse de bois sec brûlée, sont compris entre 42 et 207  $\text{g.kg}^{-1}$ , selon le type d'appareil, l'humidité du combustible et l'allure de combustion (Tableau 5).

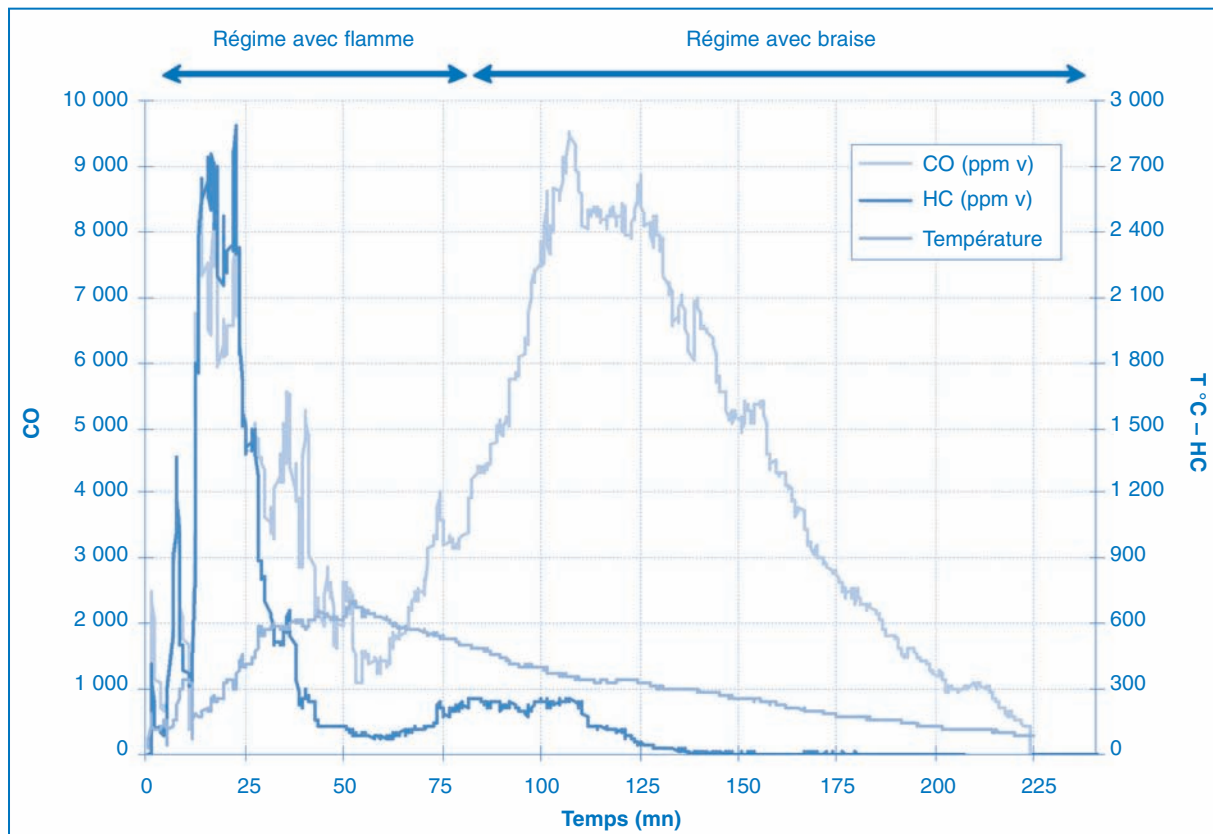


Figure 6.

Exemple des émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures à l'issue du foyer labellisé en allure nominale.

Example of carbon monoxide and hydrocarbons emissions in fireplace with label – nominal operating.

Tableau 6.

Facteurs d'émission des hydrocarbures totaux en  $\text{g.kg}^{-1}$  de bois sec brûlé.

Emission of hydrocarbon expressed in  $\text{g.kg}^{-1}$  of seasoned wood.

Hydrocarbures imbrûlés $\text{g.kg}^{-1}$ de bois sec		$\text{C}_1$ Bois très sec : HR < 12 %	$\text{C}_2$ Bois sec : 15 < HR < 20 %	$\text{C}_3$ Bois humide : HR > 20 %
Foyer fermé	Allure nominale	---	---	2,7
	Allure réduite	1,2	2	4,6
Insert labellisé	Allure nominale	0,7	2	6,3
	Allure réduite	---	12,2	---

Pour ce qui est des hydrocarbures, les facteurs d'émission varient entre 0,7 et  $12,2 \text{ g.kg}^{-1}$  (Tableau 6). Une caractérisation plus approfondie de ces hydrocarbures imbrûlés a été réalisée en recherchant la présence de 15 hydrocarbures aromatiques polycycliques les plus fréquemment rencontrés dans les fumées domestiques [12] (Tableau 7).

Certains de ces composés, comme le benzo (a) anthracène ( $3\,570 \text{ ng.m}^{-3}$ ) et le benzo (a) pyrène ( $2\,909 \text{ ng.m}^{-3}$ ) sont des cancérigènes probables.

Tableau 7.

Principaux hydrocarbures aromatiques polycycliques émis dans les fumées issues de la combustion du bois en  $\text{ng.m}^{-3}$ .

Polycyclic aromatic hydrocarbons expressed in  $\text{ng.m}^{-3}$ .

Principaux HAP en $\text{ng.m}^{-3}$	
Acénaphthylène	175
Anthracène	168
Benzo (a) anthracène	3 570
Benzo (b) fluoranthène	2 160
Benzo (k) fluoranthène	2 976
Benzo (ghi) pérylène	3 038
Benzo (a) pyrène	2 909
Chrysène	2 991
Dibenzo-ah-anthracène	381
Fluoranthène	635
Fluorène	117
Indéno-Pyrène	1 183
Naphtalène	4 629
Phénanthrène	3 358
Pyrène	5 559



### 3.3. Autres polluants

Afin de compléter cette caractérisation des polluants émis lors de la combustion du bois, les oxydes d'azote et de soufre ont été recherchés.

Les oxydes d'azote peuvent provenir de l'azote contenu dans l'air comburant ou de l'azote contenu dans le combustible. Les oxydes d'azote provenant de l'air se forment à très haute température en tant qu'oxydes d'azote dits thermiques. Dans les chauffages au bois habituels, les températures de combustion étant inférieures à 1 300 °C, les NO<sub>x</sub> thermiques revêtent une importance minime. Par contre, le bois contient de l'azote qui dans l'arbre se présente sous la forme d'amines et de protéines nécessaires à sa croissance ; c'est l'oxydation de cet azote qui produira, en fonction de l'essence, la majeure partie des NO<sub>x</sub> produits. Les facteurs d'émissions des NO<sub>x</sub>, déduits des essais, sont de l'ordre de 0,35 g.kg<sup>-1</sup> pour du bois de classe C<sub>2</sub> en allure nominale. Cette valeur relativement faible n'a pas conduit à un approfondissement des mesures.

Quant aux oxydes de soufre, il n'est apparu que des traces, jugées insignifiantes.

Afin d'être le plus complet possible, on donnera les facteurs d'émission du dioxyde de carbone. Ils varient entre 800 et 1 700 g.kg<sup>-1</sup> (Tableau 8).

Tableau 8.  
Facteurs d'émission de dioxyde de carbone  
en g.kg<sup>-1</sup> de bois sec brûlé.  
Emission of carbon dioxide  
expressed in g.kg<sup>-1</sup> of seasoned wood.

Dioxyde de carbone g.kg <sup>-1</sup> de bois sec		C <sub>1</sub> Bois très sec : HR < 12 %	C <sub>2</sub> Bois sec : 15 < HR < 20 %	C <sub>3</sub> Bois humide : HR > 20 %
Foyer fermé	Allure nominale	---	1 041	886
	Allure réduite	1 122	834	---
Insert labellisé	Allure nominale	1 702	1 415	1 137
	Allure réduite	---	1 342	---

Le CO<sub>2</sub> est un des gaz responsables de l'effet de serre et est à ce titre considéré comme polluant. Cependant, au regard de la combustion du bois, et ce par rapport à la combustion des énergies fossiles, un équilibre est obtenu. En effet, il s'avère que la quantité de CO<sub>2</sub> dégagée lors de la combustion de bois est comparable à celle produite naturellement lors de sa décomposition ; cette quantité de CO<sub>2</sub> correspond à celle qui a été extraite de l'air pour la photosynthèse au cours de la croissance de l'arbre. Le bilan théorique sur le CO<sub>2</sub> produit est donc neutre.

## 4. Discussions

### 4.1. L'influence du type de foyer

Les résultats énoncés sont relatifs à deux types d'appareils de technologies très différentes, le but

n'étant pas de les comparer, mais d'être représentatif d'une certaine catégorie d'appareils utilisés par les particuliers pour le chauffage domestique au bois.

Le premier est un foyer fermé classique de technologie non récente (environ une quinzaine d'années). Cet appareil est muni de deux admissions d'air, un air primaire dit « *air de grille* » et un air secondaire admis au-dessus de la vitre. Pour du bois sec, en allure nominale cet appareil émet en moyenne près de 66 g de CO par kg de bois sec et 1,6 g de poussières ; en allure réduite, respectivement, 106 et 11,2. Le taux de CO<sub>2</sub> de 1 040 g.kg<sup>-1</sup> dénote une combustion plutôt médiocre puisque l'on s'éloigne de la valeur stoechiométrique de près de 70 % ; cette dernière devrait se rapprocher de 1 786 g.kg<sup>-1</sup>. Cette constatation a été confirmée par une estimation du rendement de cet appareil (54,8 % en moyenne et en allure nominale). Les quantités de cendre résiduelle après combustion peuvent atteindre plus de 5 % de la masse de bois brûlée.

Le second appareil est un foyer fermé encastrable « *insert* » répondant à la charte *Flamme Verte 2004*, dans laquelle il est stipulé que tout appareil doit assurer un rejet de CO inférieur à 1 % et avoir un rendement de 60 % minimum en allure nominale. Les différents essais réalisés ont confirmé qu'il répondait aux exigences de la charte *Flamme Verte 2004* puisque le rendement moyen est supérieur à 67 % et les émissions moyennes en CO de moins de 1 % (soit 10 000 ppmv). D'autre part, la concentration moyenne en CO<sub>2</sub> émis se rapproche de la valeur théorique de 1 415 g.kg<sup>-1</sup>, ce qui confirme une meilleure combustion. Pour du bois sec, en allure nominale, cet appareil émet en moyenne 80 g de CO par kg de bois sec et 0,6 g de poussières tandis qu'en allure réduite ces valeurs sont respectivement de 207 g et 1,7 g. Le taux de cendre avoisine 2 % de la masse de bois brûlée.

De façon générale, il ressort des résultats obtenus que les flux de polluants carbonés gazeux sont légèrement plus importants à l'issue du foyer labellisé « *Flamme Verte* » que dans le foyer classique. Les deux amenées d'air de ce dernier permettent une meilleure combustion et donc tendent vers une minimisation des concentrations de polluants engendrés par rapport à l'insert « *Flamme Verte* » qui n'a qu'une admission d'air.

### 4.2. L'influence de l'allure de combustion

Pour ce qui est de l'influence entre un fonctionnement en allure nominale et un fonctionnement en allure réduite, les émissions sont multipliées par un facteur 2 à 3, mais dans certains cas, il peut atteindre 6 ou 7. En ce qui concerne le monoxyde de carbone, le passage de l'allure nominale à l'allure réduite génère des émissions près de deux fois plus importantes. En effet, les émissions de CO vont de 66 à 106 g.kg<sup>-1</sup> pour la classe d'humidité C<sub>2</sub> « *bois sec* » (rapport de 1,7) et de 70 à 156 g.kg<sup>-1</sup> pour la classe C<sub>3</sub> « *bois humide* » (rapport de 2,2), et ce pour le foyer classique. La réduction de l'arrivée d'air favorise une

combustion incomplète avec production très importante de CO. Pour l'insert « *Flamme Verte* » et pour du bois sec, les émissions de CO sont multipliées par 2,5 (82 à 207), les émissions d'hydrocarbures par 6 (2 à 12,2) et celles de poussières par 3 (0,6 à 1,7) si l'on compare l'allure nominale par rapport à l'allure réduite.

#### 4.3. L'influence de l'humidité

En ce qui concerne l'humidité du bois, il ressort que quel que soit le type d'appareil, les émissions de polluants sont multipliées par un facteur allant de 2 à 4 entre du bois sec et du bois humide. Par exemple, dans le cas de l'insert labellisé « *Flamme Verte* » en allure nominale, les émissions d'hydrocarbures sont multipliées par 3,2 et celles de poussières par 4,3 lorsque l'on brûle du bois humide de classe C<sub>3</sub> par rapport à du bois sec de classe C<sub>2</sub>. Pour le foyer classique, on obtient près de deux fois plus de HC produit lorsque l'on brûle du bois humide de classe C<sub>3</sub> (4,6 g.kg<sup>-1</sup>) par rapport à du bois sec de classe C<sub>2</sub> (2 g.kg<sup>-1</sup>), et plus de trois fois par rapport à l'utilisation de bois très sec de classe C<sub>1</sub> (1,2 g.kg<sup>-1</sup>).

En outre, bien que non quantifié, brûler du bois humide dans des conditions de défaut d'air, entraîne la formation de goudrons, bistre et calcin. Ces dépôts noirâtres et visqueux ont été constatés visuellement dans les conduits et notamment sur les vitres des appareils. Ces dépôts accentuent le caractère nocif et pollueur de l'emploi de bois non sec.

#### 4.4. Influence du combustible sur les émissions

Le tableau 9 reprend les résultats de cette étude comparés aux résultats bibliographiques concernant les émissions des principaux combustibles utilisés pour l'usage domestique. Dans le but de confronter nos résultats à l'ensemble de la littérature [3,13,14], ces derniers ont été convertis en g.GJ<sup>-1</sup> suivant la formule suivante :

$$C_{g.GJ^{-3}} = C_{g.kg^{-1}} \times \frac{\eta_{\text{appareil}}}{\text{PCI}} \times 10^6 \quad (4)$$

Le rendement de l'appareil ( $\eta_{\text{appareil}}$ ) a été introduit pour caractériser chaque combustion (type d'appareil et allure de fonctionnement) [15], la valeur du PCI du chêne sec étant de 18 144 kJ.kg<sup>-1</sup>.

Contrairement aux résultats disponibles dans la littérature, il nous a été difficile de ne donner qu'une seule grandeur caractéristique des émissions polluantes issues de la combustion du bois dans les foyers fermés, ces émissions dépendant fortement de paramètres variant d'une utilisation à l'autre. C'est pourquoi il a semblé préférable de laisser une plage de variation représentative des émissions de chaque composé.

Par rapport aux autres combustibles, la combustion du bois dans des foyers fermés n'engendre pas d'émissions significatives de SO<sub>x</sub> et de NO<sub>x</sub>, ces derniers restant une préoccupation de la combustion du fioul et du bois uniquement dans les foyers ouverts. En revanche, la combustion du bois bûche peut engendrer plus de polluants imbrûlés (monoxyde de carbone, hydrocarbures et poussières) que les autres combustibles, ceci provenant essentiellement du fait qu'à ce jour, le conditionnement et les gestions du combustible et de l'air comburant sont difficilement automatisables. Il reste donc difficile de contrôler et donc d'homogénéiser la combustion du bois bûche dans les appareils indépendants. On note cependant que certaines émissions tendent à se rapprocher des valeurs faibles émises par le fioul et le gaz. On observe, pour les hydrocarbures totaux, une émission de 25 g.GJ<sup>-1</sup> dans la combustion du bois contre 5 g.GJ<sup>-1</sup> pour la combustion du gaz et du fuel. On observe également, pour les émissions de poussières, une émission de 7 g.GJ<sup>-1</sup> pour la combustion du bois contre 5 g.GJ<sup>-1</sup> pour la combustion du gaz et du fioul. Ces dernières valeurs ont été obtenues dans de bonnes conditions de combustion : bois très sec et allure nominale.

#### 4.5. Relation inter polluant

Enfin, le dernier point marquant de cette étude est l'existence de relation entre les polluants. En comparant les émissions instantanées de certains composés, notamment le CO et les HC (Figure 7), on constate une coïncidence entre les pics d'émissions de ces composés, ce qui laisse présager l'existence d'une relation étroite entre les émissions de ces deux polluants. On note cependant que le rapport entre les émissions de CO et celles de HC n'est pas conservé au fur et à mesure de la combustion. Si en début de combustion, les pics d'émission de ces deux composés

Tableau 9.

Facteurs d'émissions de polluants pour différents combustibles, exprimés en g.GJ<sup>-1</sup>.

Emission of pollutants for various fuels, expressed in g.GJ<sup>-1</sup>.

	Combustibles	CO	HC totaux	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Résultats bibliographiques [3, 13,14]	Gaz	10	5	5	30	Ng <sup>(1)</sup>
	Fioul	20	5	5	70	90
	Charbon	1 500	350	350	50	Nd <sup>(2)</sup>
	Bois foyers ouverts	1 300	1 100	150	100	Ng
	Bois foyers fermés	9 500	120	220	30	Ng
Résultats de cette étude	Bois foyers fermés	1 500 à 9 200	25 à 550	7 à 600	10	Ng

(1) Ng : Négligeable.

(2) Nd : Non disponible.

sont quasi similaires (mais avec une échelle différente), dès que débute la combustion des résidus charbonneux (régime sans flamme), les émissions d'hydrocarbures diminuent sans qu'il en soit de même pour le

CO. En effet, les émissions de CO peuvent prendre une ampleur très importante durant la phase de combustion des résidus charbonneux en fin de combustion alors que les émissions de HC sont moindres.

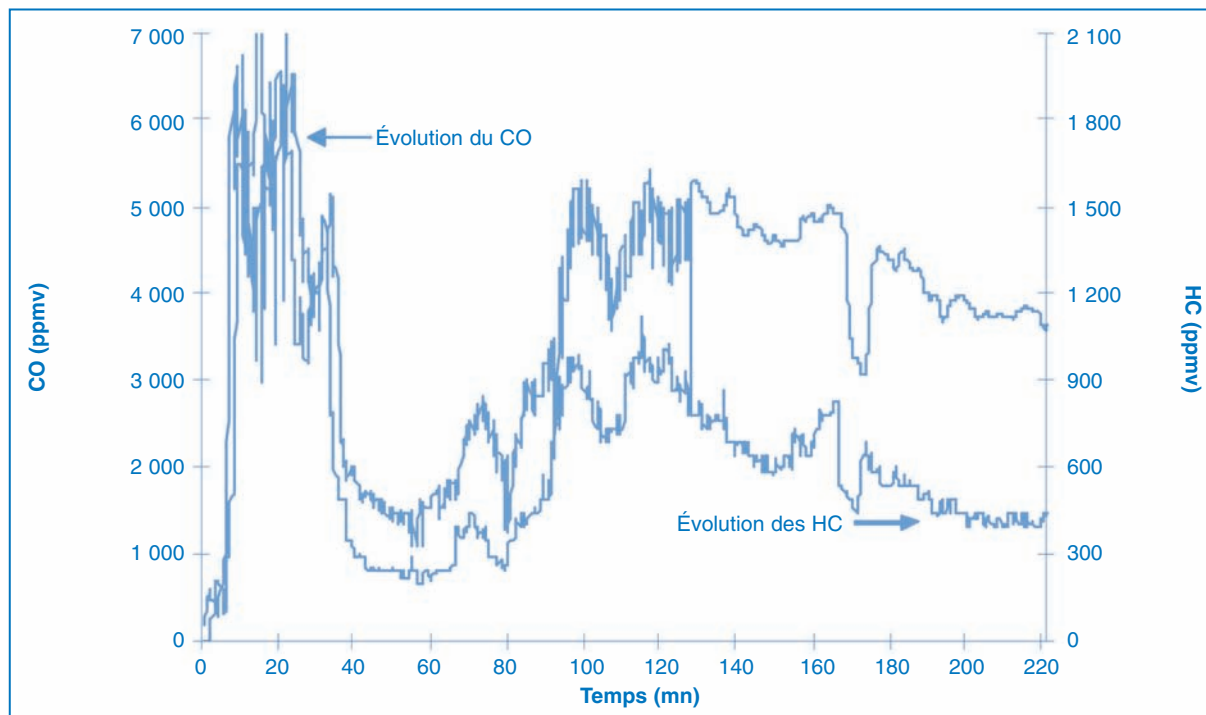


Figure 7.

Exemple des évolutions des concentrations de CO et HC au cours de la combustion d'une même charge de bois (foyer classique et allure nominale).

Evolutions of the CO and HC concentrations during the combustion of the same wood load (classic fireplace and nominal operating).

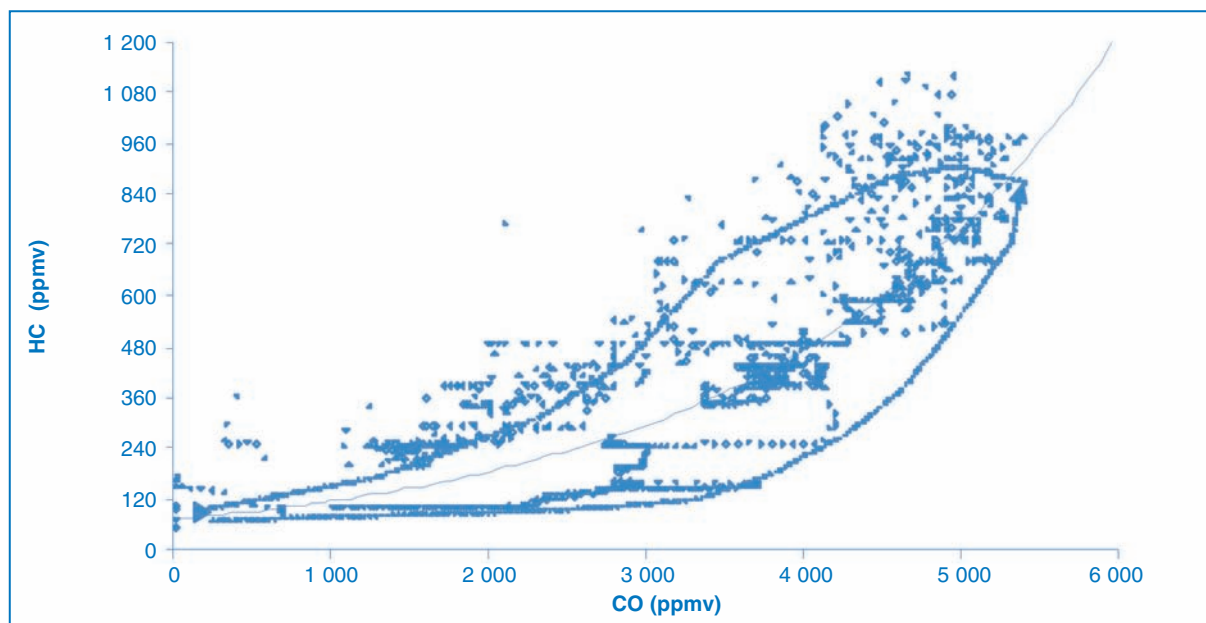


Figure 8.

Mise en évidence d'une corrélation entre les concentrations en ppmv de CO et HC au cours de la combustion d'une même charge du bois (foyer labellisé).

Correlation between the CO and HC concentrations during the combustion of the same load of wood (fireplace with label).

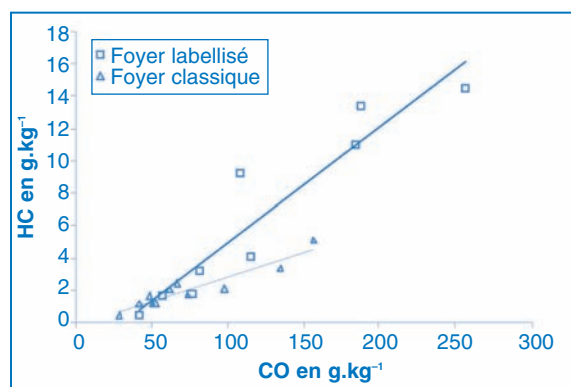


Figure 9.

Mise en évidence d'une relation linéaire entre les quantités de CO et HC dégagées.

Description of a linear relation between the quantities of CO and HC.

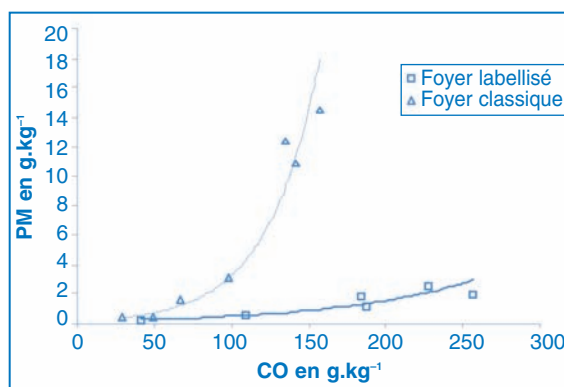


Figure 10.

Mise en évidence d'une relation exponentielle entre les quantités de CO et PM dégagées.

Description of an exponential relation between the quantities of CO and PM.

De ce fait, en approche instantanée, la relation entre les concentrations de ces deux polluants est de type exponentielle.

Cependant, on constate une certaine dispersion dans l'ensemble des points (Figure 8). Cette dispersion est due essentiellement aux différences d'émissions observées entre montée et baisse de température. Rappelons que l'ensemble de ces essais correspond à la combustion d'une charge de bois unique d'environ 10 kg. Durant 15 à 20 minutes on assiste à une montée extrêmement rapide de la température, puis cette dernière diminue progressivement durant la fin de la combustion. Ces différences d'émission conduisent de façon plus ou moins nette à l'apparition d'une hystérésis. Même si la mise en évidence d'une relation entre émissions instantanées de HC et de CO semble indiscutable, il semble assez difficile de faire ressortir une loi unique. En effet cela dépendra de la phase de montée en température, de la durée de la combustion vive par rapport à la phase de combustion des charbons, de l'humidité du bois, sans compter l'essence et le type de bois.

Aussi, afin d'avoir une idée plus globale, il semble intéressant de travailler avec les quantités totales émises de polluants ramenées au kg de bois sec brûlé et non sur les concentrations instantanées. Si l'on reprend dans ce sens l'ensemble des essais pour chaque foyer, il se dégage une relation linéaire entre les quantités de monoxyde de carbone et les quantités d'hydrocarbures totaux émises exprimées en  $\text{g.kg}^{-1}$  de bois sec (Figure 9). En ce qui concerne les poussières, cette corrélation est de type exponentielle (Figure 10).

L'étude des différentes relations entre les émissions de polluants permettrait de trouver un moyen de prévoir les rejets polluants à partir de mesures simples et éventuellement à partir de la connaissance d'un seul composé. Dans ce travail, il a été tenté de trouver une relation simple entre le CO et chacun des autres composés carbonés, poussières et hydrocarbures, afin de pouvoir considérer le CO comme un indicateur

de pollution. Il ne s'agit en aucun cas, de ne considérer que le monoxyde de carbone comme substance polluante, mais à partir de la seule connaissance de ce composé, de pouvoir estimer le niveau global de pollution engendré.

## 5. Conclusion

La présente étude caractérise les émissions polluantes engendrées par la combustion domestique du bois bûche, dans deux foyers fermés utilisés dans des conditions similaires à celles des particuliers. En effet, elle concerne deux foyers communément rencontrés dans l'habitat français : un foyer fermé classique muni de deux admissions d'air et un foyer encastrable type *insert*, labellisé « *Flamme verte 2004* », muni d'une seule admission d'air. Ces deux foyers ont été étudiés dans des conditions se rapprochant le plus possible de leur utilisation par le particulier. Trois catégories d'humidité ainsi que deux régimes de fonctionnement, nominal ou réduit, ont permis de couvrir la majeure partie des pratiques fréquemment rencontrées.

Les principaux polluants produits par la filière chauffage au bois sont le monoxyde de carbone, les hydrocarbures imbrûlés et les poussières. Selon les conditions de combustion, les émissions de monoxyde de carbone sont comprises entre 42 et 207  $\text{g.kg}^{-1}$  de bois sec brûlé (soit 1 500 à 9 200  $\text{g.GJ}^{-1}$ ), celles d'hydrocarbures imbrûlés entre 0,7 et 12,2  $\text{g.kg}^{-1}$  (soit 25 à 550  $\text{g.GJ}^{-1}$ ). Les poussières, quant à elles, varient entre 0,2 et 14,3  $\text{g.kg}^{-1}$  (soit 7 à 600  $\text{g.GJ}^{-1}$ ). La présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques a été mise en évidence autant dans la phase gazeuse des fumées que dans la phase solide (poussières). Il a été retrouvé, entre autre, du benzo (a) anthracène et du benzo (a) pyrène dans la phase gazeuse. Sur les particules solides, des HAP légers ainsi que du benzène et du toluène ont été mis en évidence. Le benzène n'a pas été recherché dans la phase gazeuse.

Ces émissions dépendent de nombreux facteurs, dont certains ont pu être appréciés. Brûler un combustible humide plutôt que bien sec va engendrer entre deux et quatre fois plus d'émissions de polluants, et réduire l'amenée d'air va généralement doubler les émissions polluantes et ce, quel que soit le composé. Aussi, le respect de bonnes pratiques telles que brûler du bois de chauffage sec ou veiller à un bon apport d'air comburant, tendent à minimiser significativement les émissions (25 g.GJ<sup>-1</sup> pour les HC et 7 g.GJ<sup>-1</sup> pour les poussières), notamment par rapport à celles engendrées par l'utilisation du fioul ou du gaz ( 5 g.GJ<sup>-1</sup> pour les HC et 5 g.GJ<sup>-1</sup> pour les poussières) qui restent plus faibles. Cette étude devrait permettre aux acteurs de la filière bois énergie

de développer ou de promouvoir d'autres technologies de chauffage domestique qui assurent une meilleure gestion du combustible et du comburant, tout en restituant la puissance de façon plus homogène.

La corrélation obtenue entre les différents polluants permet d'orienter une partie de ce travail vers la recherche d'un indicateur de pollution unique. Il pourrait s'agir du monoxyde de carbone. L'intérêt de cet indicateur unique serait de pouvoir estimer la pollution globale engendrée dans n'importe quelle condition de combustion du bois bûche par la simple mesure d'un seul composé, et donc de pouvoir s'affranchir de tout un ensemble de mesures beaucoup plus coûteuses.

### Mots clés

Combustion. Bois. Pollution. Poussières. Monoxyde de carbone. Hydrocarbure.

### Keywords

Combustion. Wood. Pollution. Dust. Carbon monoxide. Hydrocarbon.

## Références

1. Ministère de l'écologie et du développement durable. L'évolution de la qualité de l'air en France, 1<sup>er</sup> janvier 2004. [www.eco.gouv.fr](http://www.eco.gouv.fr)
2. Rapport du CITEPA. Émissions dans l'air en France – unités urbaines de plus de 100 000 habitants de la métropole et des DOM. [www.citepa.org](http://www.citepa.org)
3. De Angelis D, Hall R. EPA's research program for controlling residential wood combustion emissions. *Journal of the air pollution control association* 1980 ; 30 (8) : 862-7.
4. Dasch JM. Particulate and gaseous emissions from wood burning fireplaces. *Environmental science and technology* 1982 ; 16 (10).
5. Butcher S, Sorenson E. A study of wood stove particulate emissions. *Journal of the air pollution control association* 1979 ; 29 (7) : 724-8.
6. EPA. Residential wood stoves. Report on revision to 5th edition AP-42, section 1-10, 1996.
7. Hedberg E. Chemical and physical characterization of emission from birch wood combustion in a wood stove. *Atmospheric Environment* 2002 ; 36 : 4823-37.
8. ADEME – DVNAC. Étude de la valorisation des cendres de chaufferies bois, novembre 2001.
9. Butcher S, Ellenbecker M. Particulate emission factors for small wood and coal stoves. *Journal of the air pollution control association* 1982 ; 32 (4) : 380-4.
10. Hueglin CH, Gaegauf CH. Characterization of wood combustion particles : morphology, mobility and photoelectric activity. *Environmental science and technology* 1997 ; 31 (12) : 3439-47.
11. Osan J. Characterization of wood combustion particles using electron probe microanalysis. *Atmospheric environment* 2002 ; 36 : 2207-14.
12. EPA. Emission inventory – improvement program : "residential wood combustion", septembre 1997 ; vol. 3, ch. 2.
13. Allemand N. Estimation des émissions de polluants liés à la combustion du bois en France. Rapport CITEPA, mars 2003.
14. Collet S. Émissions liées à la combustion du bois par les foyers domestiques. Rapport INERIS, mai 2002.
15. AFNOR. Foyers ouverts et inserts à combustibles solides – exigences et méthodes d'essai, NF EN 13229, juin 2002.

