

LA COMBUSTION DU BOIS ET SES IMPACTS SUR LA QUALITÉ DE L'AIR

Jean-Pierre SAWERYSYN

Professeur honoraire de l'Université de Lille I,
vice-président du comité régional de l'APPA

RESUME

L'objectif de cet article est de faire une mise au point sur le bois et ses principales caractéristiques sur les plans énergétique et environnemental dans le cadre de son utilisation comme source d'énergie pour le chauffage. La comparaison du bois-énergie avec les combustibles d'origine fossile montre qu'il offre des avantages incontestables, mais que ces avantages peuvent être masqués par les problèmes de pollution atmosphérique qu'il engendre lorsque sa combustion est réalisée dans de mauvaises conditions.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le bois-énergie a longtemps été considéré comme la source unique de chaleur pour le chauffage et la cuisson des aliments de l'Homme. Avec l'avènement du charbon puis du pétrole, il a été par la suite principalement dédié à des usages d'agrément et d'appoint dans les sociétés industrialisées. Cependant, depuis au moins une décennie, le bois-énergie fait l'objet d'un regain d'intérêts pour plusieurs raisons. La première raison est d'ordre économique : le bois-énergie reste bon marché par rapport aux énergies d'origine fossile (charbon, gaz et fioul) et son prix n'est pas soumis aux fluctuations des monnaies ni à celles du prix du pétrole. Cet intérêt économique est renforcé par la hausse inéluctable et persistante du prix du pétrole dont l'utilisation sera de plus en plus réservée à ses usages spécifiques (carburants et pétrochimie). Il présente également un intérêt écologique car, en tant que biomasse, c'est une source d'énergie renouvelable, utilisable aussi bien pour la production de chaleur que de l'électricité, ou les deux à la fois, dans le cas de la cogénération. Il a par ailleurs un intérêt social. Comme ressource locale, il favorise le développement d'activités créatrices d'emplois en zone rurale. De plus, ses gisements sont diversifiés et relativement abondants en France. Les gisements évalués pour la période 2006-2020 s'élèvent à 71 Mm³/an de BIBE (Bois-Industrie Bois-Energie, bois excluant le bois d'œuvre et le menu bois) dont 46,1 exploitables dans les

conditions technico-économiques actuelles (ADEME, 2009a). Par ailleurs, il présente l'avantage de couvrir plusieurs secteurs d'utilisation : le secteur domestique où son utilisation évolue du chauffage d'agrément et d'appoint au chauffage de base, le secteur industriel (principalement les entreprises de la filière bois qui valorisent sous forme de chaleur et d'électricité les co-produits obtenus), le secteur collectif/tertiaire assurant le chauffage collectif (HLM, résidences), avec ou sans réseau de chaleur et enfin, de façon plus restreinte, le secteur agricole qui utilise le bois énergie pour le chauffage de serres maraîchères et horticoles. Cependant, l'intérêt croissant du bois-énergie dans ces différents secteurs ne doit pas masquer les problèmes de pollution atmosphérique et les risques sanitaires encourus à moyen et long termes par la population de proximité. Cet article se subdivise en trois parties, respectivement consacrées aux caractéristiques physico-chimiques du bois, aux principales caractéristiques de combustion du bois et enfin, à ses émissions atmosphériques de polluants gazeux et particulaires.

I- CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU BOIS

Le bois présente des caractéristiques physico-chimiques qu'il est utile de connaître pour optimiser ses performances sur le plan énergétique et réduire l'impact de sa combustion sur le plan environnemental. Dans ce paragraphe, nous examinons les caractéristiques suivantes : la composition chimique, l'humidité, les pouvoirs calorifiques et le taux de cendres.

1- Composition chimique

Le bois est constitué de matières organiques, principalement sous forme de cellulose (environ 50%), de lignine (20 à 30%) et de hémicellulose (15 à 25%) ainsi que d'éléments minéraux en très faible quantité (<1%) (Hazard et coll., 1996 ; Collet, 2000 ; Rogaume, 2009). Quatre éléments contribuent principalement à sa composition chimique : le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, et l'azote, dans des proportions beaucoup plus faibles. La proportion de chaque élément varie légèrement selon l'essence du bois. A titre d'exemple, le tableau 1 rappelle la composition élémentaire de quelques essences publiée par Rogaume (2009).

	C%	H%	O%	N%
Hêtre	49,7	6,1	43,8	0,1
Sapin	49,0	6,0	44,9	0,1
Chêne	49,5	5,4	44,7	0,3
Peuplier	49,9	6,1	43,6	0,3
Erable	49,5	6,0	44,3	0,1

Tableau 1 : Composition élémentaire sur bois sec de quelques essences, exprimée en % massiques (d'après Rogeau, 2009)

En première approximation, on admet que la composition élémentaire moyenne du bois sec est la suivante : 50 % de carbone, 44% d'oxygène et 6% d'hydrogène. Bien qu'elle contribue à l'émission d'oxydes d'azote lors de la combustion du bois, la présence de l'azote (sous forme de protéines et amines) est négligée sur le plan énergétique. Par ailleurs, le bois peut également contenir des composés soufrés ($\approx 0,02\%$) et du chlore en quantités extrêmement faibles (0,001 à 0,003%) (Collet, 2000). Des traces d'éléments métalliques tels que le cuivre, le manganèse et le zinc sont également signalées à des teneurs inférieures à 100 ppm (Collet, 2000). Dans les cendres obtenues après combustion, se retrouvent les éléments métalliques initialement présents dans le bois, essentiellement sous forme d'oxydes à caractère basique, et de sels.

En tant que biomasse constituée de trois éléments chimiques principaux, le bois peut être représenté par une formule brute fictive du type $C_xH_yO_z$. Les indices molaires x , y et z affectant chaque élément peuvent être calculés à partir des pourcentages massiques correspondants, à condition toutefois de connaître la masse molaire moyenne M_{bois} :

$$\begin{aligned} x &= (C \% \times M_{\text{bois}}) / (100 \times 12) \\ y &= (H \% \times M_{\text{bois}}) / (100 \times 1) \\ z &= (O \% \times M_{\text{bois}}) / (100 \times 16) \end{aligned} \quad (1)$$

De fait, l'évaluation de la masse molaire moyenne du bois suppose de connaître, aussi précisément que possible, sa composition chimique sous forme moléculaire, à savoir la nature et les proportions relatives de tous ses constituants chimiques. Comme pour la plupart des combustibles solides ou liquides d'origine naturelle, cette grandeur est difficilement accessible expérimentalement. C'est pourquoi les équations définissant les caractéristiques de combustion de ces combustibles, à partir de la réaction de combustion, sont finalement exprimées en fonction des pourcentages massiques des éléments chimiques qui les constituent.

2- Humidité

Comme tout combustible solide, le bois contient plus ou moins d'eau. Le taux d'humidité dépend de plusieurs facteurs, tels que les conditions et la durée de son stockage, la partie de l'arbre collectée, sa granulométrie, etc... L'eau contenue dans le bois peut être classée en trois catégories : i) l'eau libre, présente dans le bois vert, qui s'élimine sans retrait du bois ; ii) l'eau liée, piégée dans la structure du bois, qui provoque lors

de son évaporation un retrait et enfin, iii) l'eau de constitution qui entre dans la composition chimique du bois et qui ne peut être libérée que par combustion. Le taux d'humidité du bois, symbolisé ici par $E\%$, est défini sur brut par le rapport suivant :

$$E\% = \frac{\text{masse du bois humide} - \text{masse du bois anhydre}}{\text{masse de bois humide}} \times 100 \quad (2)$$

Le taux d'humidité sur brut peut varier de 15% à 60% environ : 60% au maximum pour le bois vert sur pied, de 10% à 20% pour le bois séché à l'air (pendant au moins 1 à 2 ans), 10% et moins pour le bois séché artificiellement sous flux d'air chaud (pendant 1 à 3 semaines). En général, quelle que soit l'essence du bois, la teneur en eau des bois « secs à l'air » se stabilisent vers des valeurs de 15 % à 20%, correspondant à l'humidité minimale ambiante. Le bois brûle d'autant mieux qu'il est sec. Le taux d'humidité du bois influence considérablement la qualité de la combustion du bois. Pour brûler, la matière organique doit libérer dans une première phase, toute l'eau libre ou liée présente dans sa structure. La vaporisation de l'eau est un processus fortement endothermique, c'est-à-dire un processus qui a besoin d'absorber une partie de la chaleur dégagée par la combustion pour s'effectuer. En maintenant la température à des niveaux relativement bas, la vaporisation de l'eau non seulement ralentit mais dégrade la qualité de la combustion, et favorise ainsi l'émission d'imbrûlés au cours de cette phase.

3- Taux de cendres

Les cendres résultent de l'oxydation des éléments minéraux contenus initialement dans le bois. Théoriquement, le bois ne contient que 0,3% à 0,8% de minéraux (Rogneau, 2009). Les cendres peuvent jouer un rôle néfaste au niveau de l'installation de combustion si elles conduisent à la formation de mâchefers, susceptibles d'obstruer les grilles, ou si elles posent des problèmes de corrosion. Aux parties minérales, caractérisant intrinsèquement le bois, peuvent éventuellement s'ajouter des éléments minéraux, souillant le bois lui-même (terre, cailloux, peintures par exemple).

4- Pouvoirs calorifiques

a- Définitions

Par définition, le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité de chaleur libérée par la combustion complète de ce combustible, le combustible et le comburant (en général l'air) étant pris à une température et une pression de référence, et les produits de la combustion ramenés à la même température. La valeur du pouvoir calorifique est en général rapportée aux conditions normales, à savoir à 273 K (soit 0°C) et sous la pression atmosphérique, c'est-à-dire 1 atm. (soit 101325 Pa = 1,013 bar). Pour un combustible solide, la chaleur dégagée par la réaction de combustion est exprimée en kilojoules par kg (kJ/kg) de combustible, ou éventuellement en kilowatt-heure par kg (kWh/kg), dans le cas où l'on souhaite comparer entre elles différentes sources d'énergie (bois, combustibles fossiles, électricité) pour un même

service rendu. Un kilowatt-heure vaut 3,6 mégajoules (MJ). On définit deux grands types de pouvoirs calorifiques :

- le pouvoir calorifique inférieur (PCI) lorsque toute l'eau est évacuée à l'état vapeur dans les fumées, comme c'est généralement le cas du bois utilisé comme source d'énergie,
- le pouvoir calorifique supérieur (PCS) lorsque l'eau est condensée pour récupérer sa chaleur latente de condensation (cas des chaudières domestiques à condensation alimentées au gaz naturel ou au fioul, par exemple).

Sur le plan pratique, seul le pouvoir calorifique inférieur présente un intérêt pour l'utilisateur du bois-énergie, les chaudières à condensation pour ce type de combustible étant peu diffusées. Par contre, la connaissance du PCI suppose celle du PCS, car c'est le pouvoir calorifique supérieur qui est déterminé expérimentalement pour tous les combustibles.

b- Détermination expérimentale et ordres de grandeur

Pour les combustibles solides (ou liquides), la détermination du PCS s'effectue à volume constant, en utilisant le dioxygène comme comburant, et une bombe calorimétrique dans laquelle l'eau libérée par la combustion, est condensée. Concernant le bois, cette détermination est réalisée sur bois « sec ». Dans ce cas, la quantité d'eau libérée ne provient que de l'oxydation de l'élément hydrogène participant à la composition du bois. La détermination expérimentale du PCS d'un échantillon de bois « sec » et le calcul du PCI correspondant sont décrits par la norme NF M 03-005 (ADEME, 2001).

De nombreuses valeurs de PCI, caractérisant le contenu énergétique de différentes essences de bois, sont publiées dans la littérature. Ces valeurs sont classées selon deux familles d'essence : les feuillus (chêne, hêtre, frêne, bouleau, etc...) et les résineux (pin maritime, sapin, épicéa, mélèze, etc...). L'examen de leurs valeurs (ADEME, 2001) montre que les feuillus présentent un PCI moyen sur sec de 5,1 kWh/kg (écart maximum de 8%) alors que les résineux ont un PCI moyen sur sec légèrement supérieur, égal à 5,3 kWh/kg, avec un écart maximum de 1%.

c- Influence de l'humidité sur le PCI

La quantité de chaleur réellement délivrée par la combustion du bois brut, appelé PCI sur brut (PCI_{brut}), dépend fortement de l'humidité contenue dans le bois utilisé. L'équation reliant ces deux grandeurs est donnée par l'expression suivante (Rogaume, 2009):

$$PCI_{brut} = PCI_{sec} \times \frac{100 - E\%}{100} - Q_{\text{évap.}} \times \frac{E\%}{100} \quad (3)$$

$Q_{\text{évap.}}$ représente la chaleur de vaporisation de l'eau à 0°C (2500 kJ/g d'eau soit 694,4 kWh/kg). Le premier terme de cette équation corrige le PCI, déterminé sur bois sec, de la masse d'eau contenue dans le bois brut, le second terme

prend en compte la chaleur utilisée pour vaporiser toute cette masse d'eau. La figure 1 montre l'évolution du PCI du bois brut en fonction du taux d'humidité des bois appartenant aux deux familles envisagées (feuillus et résineux). Selon le type d'essence et le taux d'humidité, il est donc possible à partir de ces deux courbes, de déterminer le PCI réel du bois utilisé. On constate que dans la plage des taux d'humidité sur brut couramment observés pour le bois énergie (10% à 60%), le PCI moyen du bois brut varie de 4610 à 1663 kWh/tonne, soit un facteur 2,8 environ.

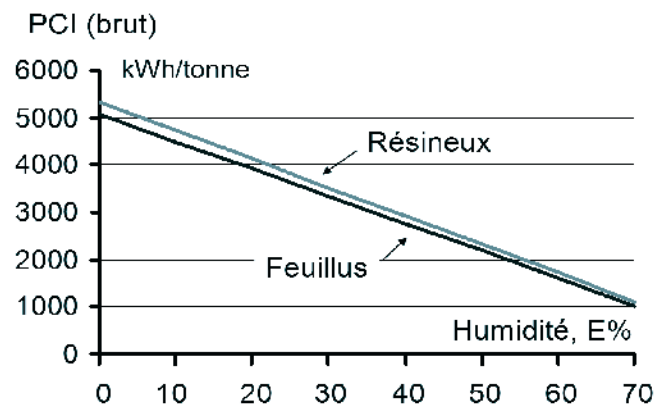


Figure 1 : Evolution du PCI sur brut en fonction du pourcentage d'humidité sur brut

d- Comparaison avec les combustibles fossiles

Le bois présente l'avantage d'être non seulement une source d'énergie renouvelable, mais également une source qui peut être facilement mobilisée. Par contre, par rapport aux énergies d'origine fossile telles que le charbon, le fioul ou le gaz naturel, il a l'inconvénient d'avoir un contenu énergétique relativement faible. D'après le tableau 2, on constate qu'un kilogramme de fioul contient environ 2 à 6 fois plus d'énergie qu'une bûche de bois brut.

Combustible	PCI (kWh/kg)
bois brut (bûches)	2 – 5
charbon (coke)	8
fioul	12
gaz naturel	17

Tableau 2 : Comparaison des PCI caractérisant différents combustibles

II- LA COMBUSTION DU BOIS

1- Equation de combustion complète

La combustion du bois est généralement réalisée en utilisant le dioxygène (O_2) de l'air comme comburant (l'oxydant). Pour l'air atmosphérique, on admet que le rapport des concentrations $[N_2]/[O_2]$ est égal à 3,76. L'équation de combustion complète d'un bois parfaitement sec ($E\% = 0$), réalisée sans défaut ni

excès d'air (combustion dite « neutre »), de formule brute fictive $C_xH_yO_z$ s'écrit :



où les seuls produits de la combustion sont le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O), le diazote (N_2) provenant de l'air utilisé. Par ailleurs, sachant que les masses atomiques des éléments C, H, O valent respectivement 12×10^{-3} kg, 1×10^{-3} kg et 16×10^{-3} kg, la masse molaire M_{bois} d'un bois parfaitement sec est donnée par l'équation suivante :

$$M_{\text{bois}} = (12x + y + 16z) \times 10^{-3} \text{ kg/mole} \quad (5)$$

2- Principales caractéristiques de combustion du bois

De manière générale, les caractéristiques de combustion d'un combustible sont définies à partir de son équation de combustion complète (4), réalisée sans défaut ni excès d'air. Ces caractéristiques sont : le pouvoir comburivore, le pouvoir fumigène et la teneur en CO_2 . La connaissance de ces caractéristiques est non seulement indispensable pour la conception et le mode de fonctionnement de la chambre de combustion, mais également pour son contrôle effectué à partir de l'analyse des fumées.

a- Pouvoir comburivore (ou volume d'air théorique)

C'est le volume d'air sec, V_a , nécessaire à la combustion neutre d'un kg de combustible solide, parfaitement sec, réalisée à $0^\circ C$ et 101325 Pa (conditions dites « normales »). V_a est exprimé en Nm^3/kg de bois anhydre. D'après l'équation de combustion (4), ce volume V_a s'écrit :

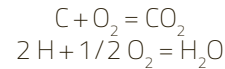
$$V_a = \frac{4,76 \times 22,4 \times (x + y/4 - z/2)}{12x + y + 16z} \quad (6)$$

Rappelons qu'un gaz occupe $22,4 \times 10^{-3} Nm^3$ (Normaux m^3) dans les conditions normales. Dans le cas où la valeur de la masse molaire moyenne M_{bois} n'est pas connue, comme c'est généralement le cas de tous les combustibles solides ou liquides d'origine naturelle, le calcul de V_a s'effectue à partir de la composition élémentaire, exprimée en % massiques, en utilisant l'équation suivante tirée de (6) et des relations (1) (Sawerysyn, 1991) :

$$V_a = 4,76 \times \left(\frac{22,4}{12} \frac{C\%}{100} + \frac{22,4}{4} \frac{H\%}{100} - \frac{22,4}{32} \frac{O\%}{100} \right) \quad (7)$$

Il convient de noter que l'oxygène impliqué dans la structure du bois (O%) participe à l'oxydation de la matière organique, ce qui a pour conséquence de réduire le volume de dioxygène de l'air théoriquement nécessaire pour brûler 1 kg de bois parfaitement sec.

En tenant compte des équations de combustion complète des éléments C et H suivantes :



L'équation (7) devient, plus simplement, en fonction des volumes occupés par les espèces gazeuses mises en jeu :

$$V_a = 4,76 \times (V_{CO_2} + V_{H_2O} - V_{O_2}) \quad (8)$$

Appliquée à un bois ayant la composition élémentaire moyenne généralement admise (C% = 50, O% = 44 et H% = 6), on obtient respectivement, pour les volumes gazeux, les valeurs suivantes :

$$V_{CO_2} = 0,933 Nm^3/kg; V_{H_2O} = 0,336 Nm^3/kg \text{ et } V_{O_2} = 0,308 Nm^3/kg$$

D'où il vient :

$$V_a = 4,574 Nm^3/kg \text{ de bois}$$

Ce calcul montre que 4,574 Nm^3 d'air sont théoriquement nécessaires pour brûler totalement 1 kg de bois parfaitement sec. En réalité, la combustion complète de 1 kg de bois brut exige un volume d'air beaucoup plus important, en raison de son humidité partielle, et de la forme plus ou moins divisée utilisée pour le brûler. En pratique, il est nécessaire d'opérer avec un excès d'air, et d'alimenter le foyer de la chaudière avec du bois sous forme divisée (plaquettes ou granulés) pour favoriser les échanges gaz-solide.

b- Pouvoir fumigène (ou volume des fumées neutres)

C'est le volume de fumées, défini dans les conditions normales, libéré par la combustion neutre d'un kg de combustible solide. On l'exprime :

- sur fumées sèches, lorsque l'eau libérée est condensée (chaudière à condensation par exemple) ou piégée (analyse des fumées) ;
- sur fumées humides, lorsque l'eau est présente dans les fumées à l'état vapeur.

- Pouvoir fumigène sur fumées sèches

Dans ce cas, les fumées ne sont constituées, en principe, que de CO_2 et de N_2 . Le diazote N_2 présent dans les fumées correspond au diazote présent dans le volume d'air introduit dans le foyer.

Ce volume est égal à $3,76 V_a / 4,76$, soit $0,79 V_a$.

On a donc :

$$V_f' = V_{CO_2} + 0,79 V_a \quad (9)$$

d'où il vient, pour un bois de composition moyenne :

$$V_f' = 4,546 Nm^3/kg \text{ de bois}$$

On peut noter que le volume des fumées sèches demeure voisin du volume d'air théorique nécessaire pour brûler

complètement 1 kg de bois sec.

- Pouvoir fumigène sur fumées humides

Par définition, on a : $V_f = V_f' + V_{H_2O} + V_{humidité}$ (10)

$$\text{avec } V_{humidité} = \frac{22,4}{18} \times \frac{E\%}{100} \quad (11)$$

En supposant que la teneur totale en eau, E%, du bois brut utilisé soit égale à 20%, il vient :

$$V_{humidité} = 0,248 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$$

D'où l'on obtient : $V_f = 5,130 \text{ Nm}^3 / \text{kg}$ de bois brut

c- Teneur en CO₂

Le pourcentage de dioxyde de carbone (α'_0) libéré dans les fumées est rapporté au volume des fumées sèches pour des raisons analytiques. On pose :

$$\alpha'_0 = \frac{V_{CO_2}}{V_{f'}} \times 100 \quad (11)$$

En remplaçant chaque terme de ce rapport par les valeurs calculées précédemment, on obtient : $\alpha'_0 \cong 20,5\%$. C'est la valeur maximale du taux de CO₂ que l'on observerait dans les fumées sèches libérées par la combustion complète du bois, sans défaut ni excès d'air, ayant la composition élémentaire moyenne retenue. En pratique, la combustion du bois est réalisée dans les chaudières avec un excès d'air, défini par e%. Le volume d'air V_A réellement utilisé s'écrit donc :

$$V_A = V_a \times \left(1 + \frac{e\%}{100}\right) \quad (12)$$

Par conséquent, le taux de CO₂ (α') correspondant à une combustion complète du bois avec excès d'air, doit être rapporté au volume total des fumées sèches $V_{f'}$, prenant en compte l'excès d'air ajouté, soit :

$$\alpha' = \frac{V_{CO_2}}{V_{f'}} \times 100 \quad (13)$$

avec

$$V_{f'} = V_f - (e\% V_a / 100) \quad (14)$$

En admettant que e% soit égal à 100, le volume libéré de fumées sèches $V_{f'}$ devient :

$$V_{f'} = 9,120 \text{ Nm}^3 / \text{kg de bois brut}$$

et pour

$$\alpha' \% \cong 10,2 \%$$

De même, dans ces conditions, le volume total des fumées humides, V_f , obtenu en utilisant un excès d'air e%, s'écrit :

$$V_f = V_{f'} + (e\% V_a / 100) \quad (15)$$

Soit,

$$V_f = 9,704 \text{ Nm}^3 / \text{kg de bois brut}$$

Rapportées aux fumées humides de volume total V_f , les valeurs relatives (% volumiques) des différents gaz contenus dans les fumées humides, libérées par la combustion complète d'un bois de composition moyenne à 20% d'humidité, et réalisée avec excès d'air égal à 100%, peuvent être estimées à :

$$CO_2 \cong 9,6\% ; H_2O \text{ (vapeur)} \cong 6,0\% ; O_2 \cong 9,9\% ; N_2 \cong 74,5\%$$

Plus l'excès d'air utilisé est important, plus sont dilués les produits de la combustion (CO₂, H₂O et autres), et plus la chaleur fournie par la combustion est évacuée par les fumées, compte tenu des capacités calorifiques de chaque gaz participant aux fumées.

3- Formes d'utilisation pour la combustion

Comme pour tous les combustibles solides ou liquides, l'état divisé du combustible favorise les échanges de chaleur et de matière, et par conséquent, améliore la qualité de la combustion (meilleur rendement, moins d'émissions d'imbrûlés). Selon le mode d'utilisation choisi pour sa combustion, le bois peut être brûlé sous forme de bûches, de plaquettes, de granulés (appelés également « pellets ») ou de rebuts. Cependant, la forme du bois la plus élaborée, et qui présente le plus d'atouts sur les plans énergétique et environnemental, est le gaz naturel de synthèse (GNS), qui combine les avantages du bois-énergie et ceux du gaz naturel. Cette transformation particulière du bois n'est pas abordée dans cet article.

a- Les bûches

C'est la forme du bois-énergie historiquement la plus utilisée au niveau domestique, et ceci, depuis la nuit des temps. Pour les appareils de chauffage actuels, l'utilisation des bûches conduit souvent à des performances énergétiques et environnementales inférieures à celles des appareils à plaquettes ou granulés, en raison de leurs taux d'humidité généralement plus élevés, et de leurs dimensions plus importantes. Par contre, elles ont l'avantage de mettre en œuvre moins de manipulations.

b- Les plaquettes forestières ou industrielles

Il s'agit de bois déchiqueté en morceaux d'environ 3 x 2 x 1 cm. Ces plaquettes ont l'avantage de pouvoir être employées dans des chaudières à chargement automatique, assurant ainsi une combustion régulière dans le foyer, à la différence des chaudières à chargement manuel. Leurs utilisations concernent essentiellement les secteurs collectifs et industriels. Deux types de plaquettes peuvent être distingués :

- Les plaquettes forestières (ou bocagères), issues de la sylviculture, qui sont obtenues en broyant du bois encore humide puis séchées en tas,
- Les plaquettes industrielles, provenant de l'industrie du bois. Elles sont produites par broyage d'un bois généralement sec, ce qui leur permet d'être utilisées juste après le broyage.

c- Les granulés

Les granulés sont de petits cylindres de quelques millimètres, fabriqués industriellement par compression de la sciure de bois obtenue comme sous-produit d'autres activités industrielles du bois. Il s'agit d'une forme extrêmement sèche (humidité de l'ordre de 5%), donc caractérisée par un pouvoir calorifique relativement élevé (4,5 kWh/kg environ). C'est une forme de combustible particulièrement bien adaptée aux petites installations domestiques, car elle permet un volume de stockage plus réduit que celui exigé par les plaquettes.

d- Autres formes

A condition qu'il soit sain, c'est-à-dire non traité chimiquement ni souillé, le bois de rebut tel que les écorces, la sciure, les vieilles palettes, les caisses et cagettes usagées, etc ... peut être utilisé comme bois-énergie. Cependant, son emploi ne devrait concerner que les chaufferies de grande taille.

4- Les différentes phases de la combustion du bois

En tant que combustible solide plus ou moins humide, le bois se caractérise par une combustion dont le développement comporte schématiquement trois phases en fonction de la montée en température du foyer. Durant la première phase (phase d'allumage), l'eau libre et liée présente dans le bois se vaporise. Cette vaporisation démarre dès que le bois est chauffé par son environnement (échanges radiatifs avec les parois chaudes du foyer et échanges convectifs de chaleur avec l'air primaire). Entre 200 et 600°C environ, des réactions de pyrolyse interviennent dans la masse du bois en absence de dioxygène. Ces réactions chimiques décomposent la matière organique et la transforment progressivement en résidu charbonneux tout en libérant des composés volatils (gazéification). Les gaz libérés au cours de cette étape sont de trois types : des gaz permanents tels que CO₂ et H₂O, des gaz combustibles tels que CO, H₂, des hydrocarbures, des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), et des gaz condensables conduisant au jus pyroligneux. Entre 300°C et 350°C environ, certains gaz combustibles s'enflamment (flammes de diffusion). C'est la seconde phase, dite phase de combustion homogène ou vive. 80% environ de la matière organique constituant le bois sont ainsi brûlés en phase gazeuse. Cette phase d'inflammation chevauche en partie la dernière phase au cours de laquelle les 20% restants de matière charbonneuse disparaissent par oxydation directe avec le dioxygène de l'air. Il s'agit d'un processus lent de combustion hétérogène, qui se manifeste par un rougeoiement (incandescence) du résidu charbonneux, et l'émission principale d'oxydes de carbone (CO et CO₂).

5- Rendements des installations de combustion

Le rendement thermique d'une installation de combustion, exprimé en pourcentage, est égal au rapport de la quantité de chaleur utile sur la quantité totale de chaleur libérable par le combustible (pouvoir calorifique). Selon le type d'installation,

la forme du bois et les conditions opératoires mises en oeuvre (allure de fonctionnement, types d'alimentation en air et en combustible, excès d'air, ...), le rendement final obtenu peut varier de 10 à 90 % environ (Tableau 3). Un rendement ne dépassant pas 25% est un mauvais rendement pour l'installation, car il signifie que 75% de l'énergie apportée par le bois sont perdus pour l'usage recherché.

Types d'installation	Rendement thermique
Cheminée à foyer ouvert	< 25 %
Insert / foyer fermé	30 à 70%
Poêle à bûches	40 à 70 %
Chaudières à bûches	55 à 75%
Chaudières à plaquettes ou granulés	75 à 90%

Tableau 3 : Quelques exemples de rendement thermique observés pour différents types d'installation (ADEME^a)

Il s'avère indispensable de réaliser des rendements de combustion aussi élevés que possible au niveau d'une installation donnée, car l'obtention d'un rendement élevé contribue non seulement à économiser les ressources, mais également à réduire les émissions d'imbrûlés (polluants gazeux et particules fines) susceptibles d'avoir des impacts néfastes sur la santé humaine.

III- LES EMISSIONS DE POLLUANTS DANS L'ATMOSPHERE

La qualité des émissions atmosphériques issues de la combustion du bois résulte de l'interaction entre l'équipement de combustion, le bois avec ses caractéristiques et l'air. Un équipement même performant n'est pas exempt du risque de combustion incomplète, qui est la principale cause génératrice de polluants gazeux et particulaires.

1- Conditions d'émission

a- Combustion complète

Si les conditions de mise en oeuvre du foyer (conception et réglages de la chambre de combustion, excès d'air, état divisé du combustible, faible humidité, etc..) sont favorables pour obtenir la combustion complète du bois, les fumées libérées ne contiennent en principe que du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau, le dioxygène excédentaire et le diazote de l'air introduits initialement. Cette combustion idéale est difficilement réalisable en pratique. De plus, il convient de rappeler qu'elle est inévitablement accompagnée de la formation d'oxydes d'azote (NO_x), résultant de l'oxydation des composés azotés (amines et protéines) contenus dans le bois, et de particules fines minérales liées à la présence initiale des éléments minéraux.

b- Combustion incomplète

Généralement, la combustion incomplète du bois intervient dans le foyer pour deux raisons principales : un mauvais réglage de l'installation et/ou l'utilisation d'un bois trop humide. Dans ces deux cas, la combustion incomplète du bois se traduit par l'émission importante de polluants gazeux et particulaires. Le monoxyde de carbone (CO) représente l'imbrûlé gazeux le plus abondant. D'autres polluants gazeux, tels que le méthane (CH₄), des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), etc... et le protoxyde d'azote (N₂O) sont également formés. A cette émission de polluants gazeux est associée celle de particules fines et ultrafines, comportant une fraction minérale et une fraction organique complexe (suie, HAP, composés organiques oxygénés, semi-volatils ou non). Parmi les composés contribuant à la fraction organique des particules, figurent des composés chimiques spécifiques de la dégradation thermique du bois : il s'agit du lévoglucosan et de ses isomères, issus de la décomposition de la cellulose et de l'hémicellulose, et de nombreux composés de la famille des méthoxyphénols résultant de la pyrolyse de la lignine (Nolte et al., 2001 ; Schauer et al. 2001 ; Simoneit, 2002 ; Simpson et al., 2005). Le lévoglucosan est proposé comme traceur de la combustion de la biomasse par plusieurs auteurs (Fraser et Lakshmanan, 2000, Leithead et al. 2006 ; Jordan et al., 2006 ; Zhang et al., 2008) en raison de son abondance et de sa résistance atmosphérique.

c- Emploi de bois altérés

L'emploi de bois chimiquement traités, souillés, ou altérés par des composés indésirables, peut conduire à l'émission supplémentaire de polluants particuliers tels que des poussières minérales (cendres volantes), des HAP, des dioxines et des métaux lourds.

2- Les gaz à effet de serre

Trois gaz à effet de serre sont libérés par la combustion du bois : le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote. Le dioxyde de carbone émis par la combustion du bois n'a pas d'impact sur le changement climatique, car il correspond intégralement au dioxyde de carbone absorbé au cours de la croissance de la plante, encore faut-il que le développement du parc forestier soit maintenu en équilibre avec son exploitation. Cependant, seule une analyse de cycle de vie (ACV) du bois énergie permet d'évaluer la contribution en gaz à effet de serre de toutes les opérations mises en jeu (bûcheronnage, débardage, transports, etc..) pour passer de la « pépinière à la cendre ». De telles ACV ont été initiées par l'ADEME en ce qui concerne le bois-énergie utilisé respectivement pour le chauffage domestique (ADEME, 2005a), le chauffage collectif (ADEME 2005b) et le chauffage industriel (ADEME, 2005b). Ces analyses ont été réalisées pour la production de 1 kWh utile de chaleur chez l'utilisateur. Comparé aux bilans des énergies classiques (fioul, gaz et électricité), le bilan des émissions de gaz à effet de serre de toutes les filières-bois examinées

offre un avantage incontestable (fig. 2a, b et c). Cet avantage est observé quelle que soit la forme du bois utilisée (bûches, plaquettes, granulés, sciures, etc.), et quel que soit le type d'installation mis en œuvre (poêle ou chaudière, fonctionnant automatiquement ou manuellement).

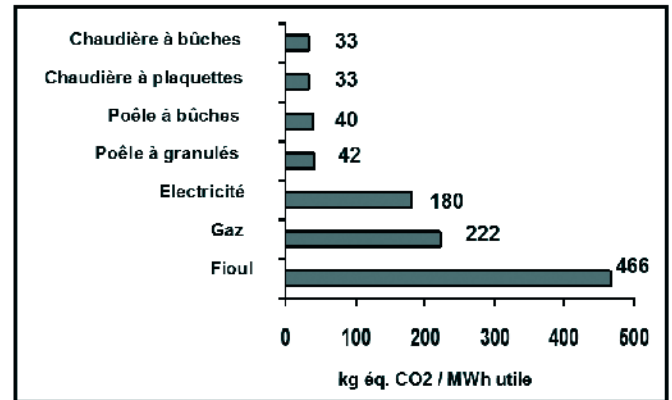


Figure 2a : Emissions des gaz à effet de serre du chauffage domestique (ADEME, 2005a, 2005c) (ADEME et EDF, 2006).

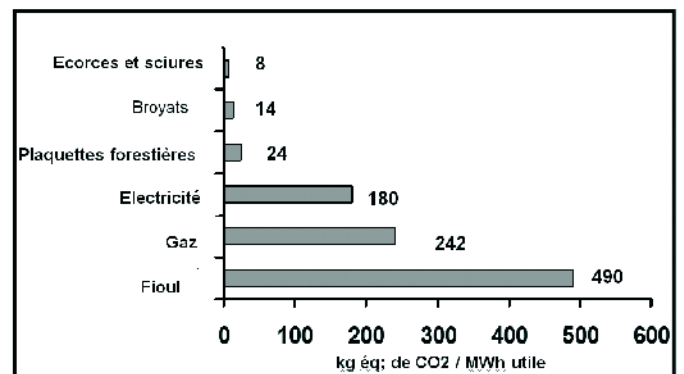


Figure 2b : Emissions des gaz à effet de serre du chauffage collectif (ADEME, 2005b) (ADEME et EDF, 2006).

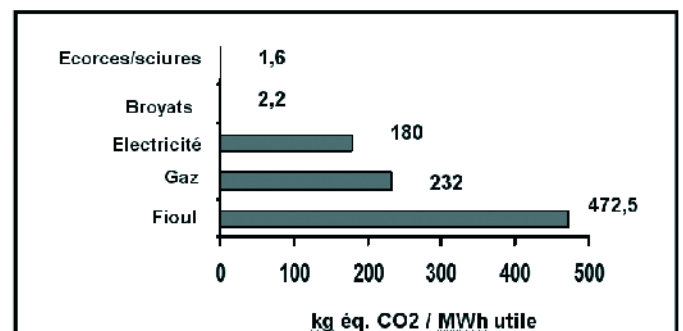


Figure 2c : Emissions des gaz à effet de serre du chauffage industriel (ADEME, 2005b) (ADEME et EDF, 2006)

3- Les autres polluants atmosphériques

a- Emissions atmosphériques et taux d'émission à l'échelle nationale

Si le bois-énergie possède un atout indiscutable en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, il est par contre responsable de l'émission de nombreux autres polluants atmosphériques, gazeux et particulaires. Ces émissions peuvent être évaluées à partir des facteurs d'émissions estimés lors de campagnes de mesure, et des données sur les consommations de bois (ADEME, 2009a). Le tableau 4 rassemble les émissions atmosphériques nationales du bois-énergie pour l'année 2005, dans les principaux secteurs d'utilisation. Il indique également pour chaque polluant, sa contribution (exprimées en % massiques) aux émissions totales nationales.

Comme l'indique la note de synthèse de l'ADEME (2009b) basée sur des données estimées pour l'année 2005 (Tableau 4 en bas de page), il apparaît que le bois-énergie contribue :

- pour une faible part, aux émissions nationales de SO₂ (2%) et de NOx (2%), et à 11 % des émissions de dioxines,
- de façon significative, aux émissions nationales des COVNM (22%), de CO (31%), des HAP (77% pour la somme de quatre HAP), et des particules fines de type PM₁₀ (27%) et PM_{2,5} (40%), en raison principalement de la combustion du bois réalisée en maison individuelle dans de mauvaises conditions.

Par ailleurs, le tableau 4 met en exergue le fait que plus de 97% des polluants gazeux (CO, COVNM) et des polluants particulaires (HAP, PM₁₀ et PM_{2,5}) émis par la combustion du bois proviennent du secteur domestique.

b- Emissions de différents appareils de chauffage domestique

Une étude, réalisée par l'INERIS et le Laboratoire de Chimie Moléculaire et Environnement (LCME) de l'Université de Savoie (INERIS/ LCME, 2008), évalue l'impact des appareils de chauffage domestique à bois sur la qualité de l'air. En 2009, Collet a publié une étude bibliographique sur les émissions de polluants par les foyers domestiques (Collet, 2009). Dans cette étude, il montre la très grande variabilité des facteurs

d'émission déterminés en laboratoires ou sur sites réels, pour différentes catégories d'appareils utilisés dans ce secteur. Six catégories d'appareils ont été examinées :

- les foyers ouverts (cheminées), qui se caractérisent par de très faibles rendements énergétiques (< 15%) et une combustion incomplète (< 700°C),
- les foyers conventionnels (rendements voisins de 40-50%) et les foyers à rendement énergétique amélioré (55 à 70%),
- les foyers modernes à combustion avancée, équipés de plusieurs entrées d'air et d'un préchauffage de l'air secondaire (rendement > 70%),
- les chaudières anciennes (rendement < 70%),
- les chaudières modernes à bûches ou plaquettes, pour lesquelles la combustion est optimisée (rendement > 75%),
- et enfin, les poêles et chaudières à granulés, présentant des rendements élevés, compris entre 80 et 90%.

Les figures 3 et 4 illustrent l'impact des performances énergétiques respectivement sur les émissions de poussières totales et de CO.

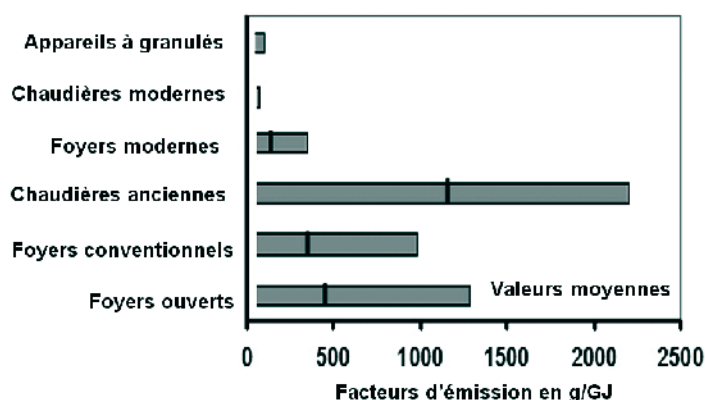


Figure 3 : Emissions de poussières totales de différents appareils, rapportées en unité d'énergie entrante (d'après Collet, 2009).

	SO ₂ kt	NOx kt	CO kt	COVNM kt	HAP* t	Dioxines g(ITEQ)	PM ₁₀ kt	PM _{2,5} kt
Secteur domestique	6,4	19,2	1704,4	303,9	19,1	21,9	131,3	128,6
% du total bois	82%	69%	98%	99%	98%	91%	97%	97%
Secteurs collectif, industriel et agricole	1,4	8,7	35,3	2,9	0,3	2,1	4,1	3,5
% du total bois	18%	31%	2%	1%	2%	9%	3%	3%
% du total national	2 %	2 %	31 %	22 %	77 %	11 %	27 %	40 %

HAP* : somme des quatre HAP définis par la CEE-NU : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène et indeno(1,2,3-cd) pyrène

Tableau 4 : Emissions atmosphériques nationales du bois-énergie utilisé dans différents secteurs, et leurs contributions aux émissions nationales pour l'année 2005 (ADEME, 2009a).

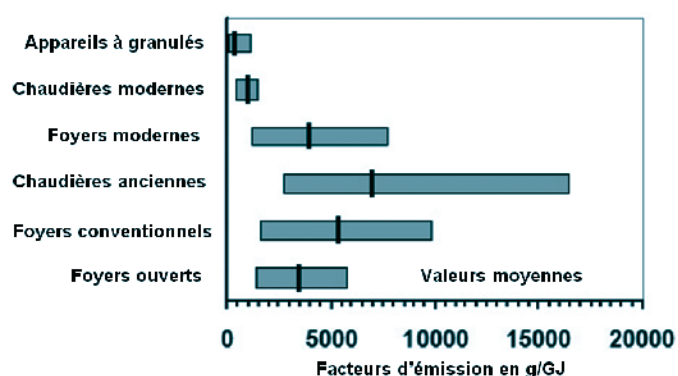


Figure 4 : Emissions de CO de différents appareils, rapportées en unité d'énergie entrante (d'après les données bibliographiques publiées par Collet dans le tableau 3, 2009)

La réduction des émissions importantes de polluants gazeux et particulaires dues à la combustion du bois dans le secteur du chauffage domestique, exige que des actions soient prioritairement engagées dans ce domaine, pour remplacer les anciens appareils de chauffage par des appareils modernes, plus performants sur le plan énergétique, et par conséquent, beaucoup moins polluants sur le plan environnemental. Le label « Flamme verte », initié par l'ADEME pour les appareils de chauffage domestique au bois mis sur le marché, garantit aux usagers des performances énergétiques et environnementales respectueuses des normes françaises et/ou européennes. Un rendement énergétique minimum de 70% est exigé actuellement pour les appareils labellisés, ainsi qu'un taux d'émission maximum de 0,3% pour CO. Des objectifs de réduction de poussières sont également prévus à partir du 1er janvier 2011. Par ailleurs, il convient de souligner l'intérêt de mettre en place, dans les secteurs collectifs et industriels, de grosses installations présentant une puissance thermique supérieure à 2 MW. Ce type d'installation est favorable à l'obtention non seulement de meilleures performances énergétiques (rendement plus élevé que celui de petites unités, et possibilité d'un chargement continu), mais également de meilleures performances environnementales, en permettant sur le plan économique, leur combinaison avec des équipements de traitement des fumées (multicyclones, filtres électrostatiques, filtres à manche). De plus, ce type d'installations relève de la réglementation des installations classées pour lesquelles des contrôles réguliers par des organismes indépendants sont prévus.

c- Comparaison des contributions de différents types de combustibles aux émissions nationales

Si l'on examine les données des émissions de 2009 estimées pour les différents types de combustibles (CITEPA, 2011) (Tableau 5), on constate que la contribution aux émissions nationales de polluants gazeux et particulaires du bois énergie demeure largement prédominante pour CO, COVNM, HAP et les particules fines et ultrafines, par rapport à celles du fioul domestique et du gaz naturel. De plus, on constate d'après le tableau 5 que la combustion du bois est particulièrement favorable à l'émission de particules fines et ultra-fines.

IV- CONCLUSION

Le bois utilisé comme source d'énergie de chauffage présente deux atouts incontestables par rapport aux combustibles fossiles : d'une part, c'est une source d'énergie nationale et renouvelable, dont les gisements en France sont potentiellement abondants, et d'autre part, en se substituant aux combustibles fossiles, il participe à la réduction des émissions nationales de gaz à effet de serre. Sa principale faiblesse réside dans le fait que de nombreux paramètres influencent le rendement de sa combustion. La combustion incomplète du bois se caractérise par la formation importante non seulement de gaz polluant l'atmosphère mais également et surtout, par celle de particules fines et ultrafines particulièrement nocives pour la santé humaine. L'utilisation du bois, sans contrôle ni précaution, dans des appareils de chauffage domestique présentant des rendements de combustion insuffisamment élevés, est responsable de la mauvaise image environnementale du bois-énergie. Des actions sont actuellement entreprises pour modifier cette image en préconisant sur le marché des appareils labellisés à usage domestique de meilleure qualité. Son emploi dans des installations de chauffage collectif ou industriel est certainement préférable car ces installations offrent de meilleures performances énergétiques et environnementales.

	SO ₂	NOx	CO	COVNM	HAP*	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{1,0}
Bois énergie	1,2	2,8	32,1	20,2	61,9	21,1	33,3	59,4
Fioul domestique	11,5	16,8	2,2	2,7	5,2	4,6	7,4	12,0
Gaz naturel	1,1	6,5	0,8	1,3	-	0,3	0,4	0,8

HAP* : somme des quatre HAP définis par la CEE-NU : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène et indeno(1,2,3,-cd) pyrène

Tableau 5 : Contributions (% massiques) aux émissions atmosphériques nationales de différents types de combustibles, pour l'année 2009 (CITEPA, 2011)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADEMEa, www.ademe.fr/midi-pyrénées/a_2_02

ADEME (2001), Critt Bois, Fibois, CTBA, Mesure des caractéristiques des combustibles, 34 p. juillet 2001

ADEME (2005a), Bilan environnemental du chauffage domestique au bois, Décembre 2005, (Etude réalisée par BIO Intelligence Service)

ADEME (2005b), Bilan environnemental du chauffage collectif (avec réseau de chaleur) et industriel au bois, Décembre 2005, (Etude réalisée par BIO Intelligence Service)

ADEME (2005c), Evaluation comparative actuelle et prospective des émissions du parc d'appareils domestiques de chauffage en France. Septembre 2005. (Etude réalisée par Erdyn Consultants)

ADEME et EDF (2006), Nouvelles estimations conjointes sur le contenu CO₂ du chauffage électrique qui fixent l'ordre de grandeur autour de 180 kg éq. CO₂ / MWh utile

ADEME (2009a), Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020. Rapport final. Novembre 2009. (Etude réalisée par l'Inventaire Forestier National (IFN), l'Institut Technique Forêt Cellulose Bois Ameublement (FCBA) et l'association SOLAGRO). 105 p.

ADEME (2009b), Le bois-énergie et la qualité de l'air- ADEME / Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la mer, juillet 2009, 17 p.

CITEPA (2011), Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Séries sectorielles et analyses étendues. Format SECTEN-avril 2011.

Collet S. (2000), Facteurs d'émission. Emissions de dioxines, de furanes et d'autres polluants liées à la combustion du bois naturel et adjuvanté ; Rapport INERIS, INERIS-DRC n°00/60-MAPA-SCO-25420, 68 p.

Collet S. (2009), Les émissions de polluants par les foyers domestiques, *Pollution atmosphérique*, Numéro spécial/Le bois-énergie : Enjeux écologiques et de santé environnementale, p.83-90

Fraser M.P., Lakslmanan K. (2000), Using levoglucosan as a molecular marker for the long-range transport of biomass combustion aerosols, *Environ.Sci.and Technol.*, 34, p.4560-4564

Hazard C., Barette J.-P., Meyer J.(1996), *Mémotech : bois et matériaux associés* ; Paris, Editions Casteilla, 455 p.

INERIS / LCME (2008), Evaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur, Rapport final, DRC-08-70801-15219A, 156 p.

Jordan T.B., Seen A.J. and Jacobsen G.E. (2006), Levoglucosan as an atmospheric tracer for woodsmoke. *Atmos. Environ.*, 40, p.5316-5321

Leithead A., Li S.M., Hoff R., Cheng Y., Brook J. (2006), Levoglucosan and dehydroabietic acid : evidence of biomass burning impact on aerosols in the Lower Fraser Valley, *Atmos. Environ.*, 40, p.2721-2734

Nolte C.G., Schauer J.J., Cass C.R., Simoneit B.R.T. (2001), Highly polar organic compounds presents in wood smoke and in the ambient atmosphere, *Environ.Sci.and Technol.*, 35, p.1912-1919

Rogaume Y. (2009), La combustion du bois et de la biomasse, *Pollution atmosphérique*, Numéro spécial/Le bois énergie : Enjeux écologiques et de santé environnementale, p.66-81

Sawerysyn J.-P. (1991), Caractéristiques de combustion d'un combustible, *Bull.Union des Physiciens* n° 732, vol. 85, p. 483-488

Sawerysyn J.-P. (1993), Les pouvoirs calorifiques, *Bull. Union des Physiciens*, n° 752, vol. 87, p.401-411

Schauer J.J., Kleeman M.J., Cass G.R., Simoneit B.R.T. (2001), Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 3.C1-C29 Organic Compounds from Fireplace Combustion of Wood, *Environ.Sci.and Technol.* 35, p.1716-1728

Simoneit B.R.T. (2002), Biomass burning—a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion, *Applied Geochemistry*, 17, p. 129-162

Simpson C.D., Paulsen M., Diels R. L. , Liu S. L. J. , Kalman D.A. (2005), Determination of methoxyphenols in ambient atmospheric particulate matter : tracers for wood combustion, *Environ.Sci.and Technol.*, 39, p.631-637

Zhang T., Claeys M., Cachier H., Dong S., Wang W. et al. (2008), Identification and estimation of the biomass burning contribution to Beijing aerosol using levoglucosan as a molecular marker, *Atmos. Environ.*, 42, p.7013-7021