

## Rapport

### **La combustion du bois contribue-t-elle à la pollution de l'air ?**

#### Avant-propos

Ce rapport présente les résultats d'une étude de synthèse conduite par l'Académie d'Agriculture de France sur la question de la combustion du bois et sur son impact sur la qualité de l'air. Il se compose de deux parties :

- Un résumé rappelant le contexte, les processus de la combustion du bois, les émissions qui lui sont liées et leur impact sur la qualité de l'air en zone fortement urbanisée, ainsi que la dépendance de ces émissions vis-à-vis des équipements de combustion utilisés.
- Un rapport complet en forme d'état de l'art donnant une vue plus exhaustive et donc plus précise des questions et des enjeux du problème. Une telle mise au point est importante dans un contexte législatif et réglementaire, national et européen, en évolution, compte tenu des préoccupations sur la qualité de l'air.

On l'aura compris, ces deux parties forment un tout que le lecteur est vivement encouragé à consulter.

*Rédacteurs : Michel Vernois et Xavier Deglise*  
*Décembre 2015*

# Résumé

## La combustion du bois contribue-t-elle à la pollution de l'air ?

### Le contexte

Le bois est aujourd'hui en France la première source d'énergie renouvelable (47%) et son usage s'accroît. Le bois consommé pour l'énergie devance tous les autres usages du bois, y compris le bois dans la construction. **Le chauffage domestique consomme 73% du bois utilisé pour l'énergie**, les 27 % restant allant aux chauffages tertiaire, collectif ou industriel. L'innocuité du chauffage au bois fait l'objet de controverses à cause de l'émission de COV et de particules fines, inhérente à la combustion d'un solide carboné comme le bois.

Le présent avis a pour objet de donner un avis scientifique sur la combustion du bois et les risques sanitaires qui peuvent être associés à ses rejets atmosphériques, en tenant compte de l'évolution des technologies de combustion, des matériels qui s'y rattachent et d'utilisations différenciées. Sont concernées les utilisations du bois bûche et des granulés ligno-cellulosiques pour le chauffage domestique, en foyers ouverts ou fermés, ainsi que celles du bois et de ses dérivés (plaquettes forestières, sciures, rémanents...) à destination du chauffage collectif ou tertiaire et des procédés industriels qui requièrent de la chaleur (générateurs de vapeur à titre d'exemple).

### La combustion du bois : processus et émissions

**La première étape de la combustion du bois** est la **pyrolyse** endothermique où le bois, se décompose en gaz, liquides (goudrons) et solide (charbon). Les gaz combustibles  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , se forment à partir de  $300^\circ\text{C}$  environ, température d'inflammation du bois. Les proportions relatives de gaz, goudron et charbon dépendent de l'état de division du combustible, et de la température de pyrolyse, donc de celle de la combustion (figure 1).

**La deuxième étape** est la **combustion des gaz** et celle partielle du charbon. Les goudrons contenant majoritairement des hydrocarbures aromatiques (HAP) ne brûlent pas directement. Ils partent avec les fumées et pour être éliminés, ils doivent être filtrés ou craqués par traitement catalytique durant ou après cette combustion.

Les micro-fragments de charbon imbrûlé forment des particules fines classées en trois catégories ( $\text{PM}_{10} < 10$  microns,  $\text{PM}_{2,5} < 2,5$  microns et  $\text{PM}_{1} < 1$  micron). La température de combustion ( $500^\circ\text{C}$  à  $1000^\circ\text{C}$ ) varie en fonction du taux d'humidité du bois et de la quantité d'air en excès.

Plus le bois est humide et plus la température de combustion sera faible, avec formation de goudrons dans les fumées, donc de pollution. Plus le bois est divisé (sciures, granulés), plus complète est la combustion avec peu de

particules de charbon imbrûlé, plus grande est la proportion de gaz et moins il y a formation de goudrons.

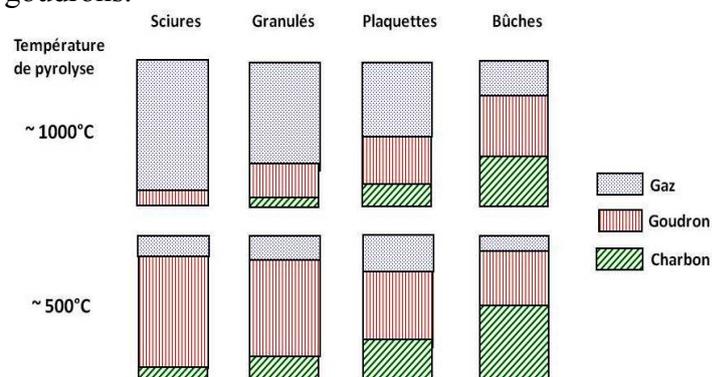


Figure 1- Diagramme de tendance de combustibles bois courants en fonction de la température de pyrolyse

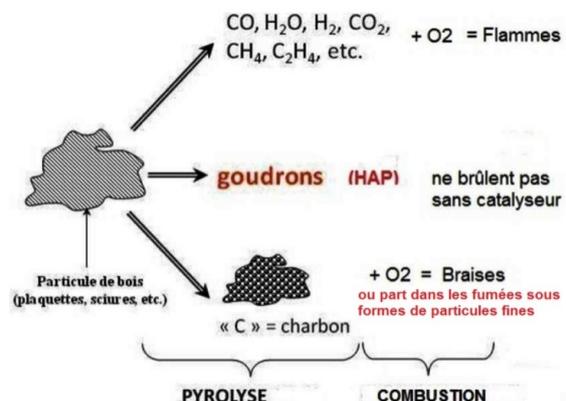


Figure 2. Schéma réactionnel de la combustion du bois

Ces phénomènes peuvent être amplifiés par la topographie des lieux (vallées encaissées...) et par des conditions météorologiques telles que la présence d'une couche d'inversion empêchant la dispersion verticale des particules et polluants divers.

## La combustion du bois impacte la qualité de l'air en zone fortement urbanisée

Les problèmes de mauvaise qualité physico-chimique de l'air, concernant les grandes agglomérations et les régions à forte activité industrielle. Pour l'Île de France, le réseau de surveillance Airparif souligne le fait que le "secteur résidentiel et tertiaire, notamment le chauffage domestique et des entreprises, contribue à hauteur de 26% aux particules PM10 émises, à 39% des particules fines PM2,5 et à 30% des émissions d'hydrocarbures". En détaillant par combustible ces émissions, le bois apparaît comme le contributeur majoritaire. Bien qu'il ne représente que 5% des consommations de ce secteur, il est à l'origine de près de 90% des émissions de particules (PM10 et PM2,5) et de plus de 80% des émissions d'hydrocarbures du chauffage résidentiel. Il en est de même au plan national, cf tableau I suivant :

Emissions de PM10 en 2010 du secteur résidentiel Ile-de-France

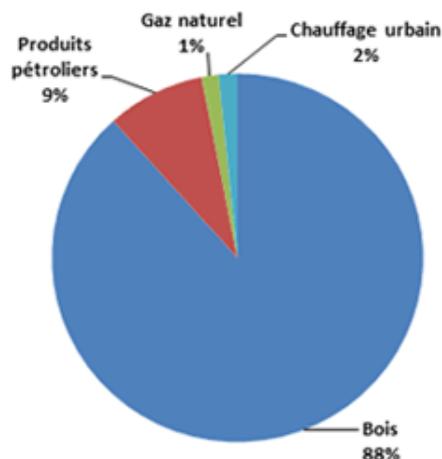


Tableau 1- Pourcentage des polluants dégagés par diverses sources en regard de leur importance nationale (données 2009 ADEME, 2008 INERIS)

	% énergie nationale	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	COVNM	HAP	Dioxine	PM 2,5*	PM 10*
Bois énergie	5,6	1,6	3,6	36	21	70	20	40	60
Fioul	4	10	12	1,2	2,7	5	2	7	12
Charbon	3,4	37	4	3		1	3	2,3	2,2
Gaz naturel	21	1,4	8	1,1	1,3	0		0,4	0,8
Transport routier	26	0,3	53	13	10	17		17	16,5

\*PM 2,5 particules fines (particulate matter) dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm, PM 10 particules moyennes.

## Les émissions liées à la combustion du bois dépendent des équipements utilisés

Les foyers ouverts (cheminées sans inserts) présentent un très faible rendement énergétique, généralement compris entre 10 à 20 % restitués sous forme de chaleur utile. En conséquence, leur facteur d'émission de particules carbonées est très élevé, totalement non conforme aux normes actuelles préconisées ou en vigueur. Les nouveaux dispositifs de chauffage, en particulier ceux présentant le label flamme verte 5\* peuvent atteindre un rendement énergétique important (≥70 %). Leur taux d'émission de particules (fines et autres) peut être diminué d'un facteur 40 par rapport aux émissions issues d'une cheminée ouverte. L'utilisateur a donc doublement intérêt à se tourner vers ce type d'insert à haut rendement pour disposer d'un capital de chaleur bien plus important à consommation identique de bois et réduire

drastiquement la pollution induite (pollution extérieure et intérieure au lieu de vie).

Tableau 2  
Rendements d'installations de chauffage domestique

Installation de chauffage au bois	Rendement en %
Cheminée foyer ouvert	10 à 20
Insert foyer fermé	30 à 70
Poêle à bûches	40 à 70
Chaudière à bûches	55 à 75
Chaudière à granulés	75 à 90

Les chaufferies bois sont surveillées et il existe de multiples normes en fonction de la puissance de l'appareil (NF EN 3023-5 pour moins de 500 kW et arrêté 2910 A & B pour les plus grosses puissances). Les installations automatiques collectives ou industrielles de plus de 2 MW sont soumises à une législation et une réglementation particulières, relatives à ce que l'on appelle "les installations classées pour la protection de l'environnement".(ICPE) et sont donc suivies. Ces installations où les fumées sont filtrées (filtres électrostatiques ou à manche) donnent des niveaux de particules négligeables.

## Conclusions

- La combustion du bois improprement réalisée génère des polluants dont certains présentent un risque avéré pour la santé humaine. Elle contribue, à ce titre, à la pollution globale de l'air extérieur et intérieur. Cette contribution peut s'avérer significative en fonction de caractéristiques locales géographiques défavorables (vallées encaissées...), météorologiques (couches d'inversion) ou liées à un taux très important d'utilisation du bois énergie tant dans des installations domestiques individuelles que collectives, ce qui pose la question de l'application éventuelle de normes plus restrictives.
- La qualité du combustible (siccité, homogénéité, essence, fragmentation) est un facteur important à prendre en compte. Le PCI (pouvoir calorifique inférieur) du bois varie peu selon l'essence mais considérablement en fonction du taux d'humidité (5,2 kWh/kg pour le bois sec et tombe de moitié pour 40% d'humidité sur brut)
- L'utilisation d'appareils et de dispositifs anciens, obsolètes et de faible rendement énergétique, donc loin des conditions optimales de combustion, contribue très significativement à cette pollution. Les foyers ouverts sont de ceux-ci.
- Les récents dispositifs à foyer fermé (inserts), à haut rendement, minimisent considérablement les émanations issues de la combustion du bois et devraient être conformes aux normes environnementales en vigueur.
- Les installations automatiques collectives et industrielles de production d'énergie à partir de la biomasse bois sont soumises à des normes de rejets atmosphériques contraignantes qui leur sont spécifiques et qui pourraient évoluer, à l'avenir, pour abaisser les seuils actuels et tenir compte d'autres polluants que ceux qui sont retenus actuellement dans ces normes.

# Rapport Complet

## La combustion du bois contribue-t-elle à la pollution de l'air ?

Le bois énergie est actuellement la première consommation de bois et son usage s'accroît, même si les prix des hydrocarbures ont tendance à diminuer. C'est maintenant la première énergie renouvelable, devant l'hydraulique. Mais à la suite des phénomènes climatiques de l'hiver dernier, la pollution par la combustion du bois est pointée du doigt. La décision d'interdire les feux de cheminées, en foyer ouvert, à Paris a fait débat en début d'année.

Les émanations issues du bois lors de sa combustion, tant en composés gazeux qu'en particules fines, font incontestablement l'objet de controverses. Leur innocuité fait débat, les récentes restrictions réglementaires sur l'utilisation en région parisienne de foyers ouverts et les ajustements administratifs qui sont venus restreindre la portée de ces restrictions peu de temps après sont là pour témoigner qu'il s'agit d'un sujet sensible auprès du public.

En effet, la flambée ancestrale du bois dans l'âtre, son caractère d'authenticité, les bienfaits de sa chaleur rayonnante, la cuisson douce des aliments sont associés à un bien être convivial issu d'un produit naturel abondant et renouvelable.

Le présent avis a pour objet de faire un point scientifique 'dépasionné' sur la combustion du bois et des risques sanitaires qui peuvent y être associés ceci dans un contexte d'évolution sensible des technologies de combustion, des matériels qui s'y rattachent et d'utilisations différenciées.

Il s'attache, au travers de solides travaux scientifiques, bien étayés et issus de diverses sources, à mieux cerner la contribution de la combustion de la biomasse (bois et dérivés) à l'ensemble des rejets atmosphériques et aux risques potentiels liés à cette utilisation qui en découlent.

Sont concernées les utilisations du bois bûche et des granulés ligno-cellulosiques pour le chauffage domestique (foyers ouverts ou fermés) ainsi que le bois et ses dérivés (plaquettes forestières, sciures, rémanents...) à destination du chauffage collectif, tertiaire et des procédés industriels (générateurs de vapeurs à titre d'exemple).

### Les principes fondamentaux qui régissent les phénomènes physico-chimiques liés à la combustion du bois sont les suivants :

#### I – Rappels des fondamentaux de la combustion du bois (1), (2), (3)

Ces rappels sont nécessaires pour mieux comprendre pourquoi la neutralité carbone est sujette à débat et quelle est l'origine des problèmes liés à la pollution émise par la combustion du bois.

#### Equation bilan de la combustion

La combustion est l'oxydation complète des éléments contenus dans le bois, conduisant à la formation de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O ainsi qu'à la production de chaleur.

A partir de la composition élémentaire du bois,

Elément	C	H	O	N	Minéraux
Teneur en masse	45 à 49 %	5 à 6 %	41 à 44 %	0,1 à 0,3 %	0,2 à 1 %

Tableau 1 Composition chimique élémentaire du bois

l'équation de combustion complète du bois peut s'écrire :



Dans la plupart des cas, la combustion ne se fait pas avec de l'oxygène pur, mais avec de l'air constitué à 21 % d'O<sub>2</sub> et 79 % de N<sub>2</sub>.

L'équation stœchiométrique de combustion devient alors :



Comme on opère toujours avec un excès d'air (25 à 100 %) la composition théorique des fumées est : CO<sub>2</sub>, 9,6 % ; H<sub>2</sub>O vapeur, 6 % ; O<sub>2</sub>, 9,9 % et N<sub>2</sub>, 74,5 %. Comme il y a de l'azote intrinsèque dans la composition du bois et que l'azote s'oxyde à haute température, on décèle toujours N<sub>2</sub>O ou NO<sub>x</sub>.

### **Pouvoir calorifique du bois (PCI, PCS)**

Le bois peut contenir une quantité importante d'eau (plusieurs fois sa masse sèche). La quantité d'eau contenue dans le bois se mesure relativement à la masse de bois :

- si l'on exprime la quantité d'eau par rapport à la masse de bois anhydre, alors on définit l'humidité sur sec  $H_S$  qu'utilisent les professionnels de la transformation du bois :

$$H_S = 100 \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{anhydre}}}{m_{\text{anhydre}}}$$

- si l'on exprime la quantité d'eau par rapport à la masse de bois humide, on définit alors l'humidité sur brut  $H_b$  utilisée en combustion :

$$H_b = 100 \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{anhydre}}}{m_{\text{humide}}}$$

### ***Pouvoir calorifique supérieur***

Le pouvoir calorifique supérieur ou PCS est la quantité d'énergie maximale que peut générer la combustion d'une unité de masse d'un combustible sec alors que l'eau produite par cette combustion est condensée.

Le PCS du bois varie peu selon l'essence, les feuillus ayant un PCS légèrement plus faible que celui des résineux, et approche les 20 000 kJ.kg<sup>-1</sup> ou 5,6 kWh/kg Sa valeur peut-être approchée à partir de la composition élémentaire, à l'aide de l'une ou de l'autre des deux relations les plus courantes, donnant des valeurs moyennes adaptées au bois.

$$PCS = 43730.x_C - 350,9$$

$$PCS = 47500.x_C - 2380$$

où :  $PCS$  est exprimé en kJ.kg<sup>-1</sup>  
 $x_C$  est la fraction massique en carbone

Feuillus	PCS (kJ.kg <sup>-1</sup> )	Résineux	PCS (kJ.kg <sup>-1</sup> )
Chêne (duramen)	18463	Sapin pectiné	18990
Chêne (aubier)	19169	Epicéa	19195
Hêtre	18802	Douglas (duramen)	19165
Charme	18735	Douglas (aubier)	19370
Frêne	18521	Pin maritime	19165
Peuplier	18392	Pin sylvestre	20946
Noyer	18572	Mélèze	19688
Acacia	19015	Cèdre (duramen)	20984
Eucalyptus	17773	Cèdre (aubier)	19822

Tableau 2 – Pouvoir calorifique supérieur à l'état anhydre de divers essences [1]

### ***Pouvoir calorifique inférieur***

Le pouvoir calorifique inférieur ou PCI est la quantité de chaleur maximale fournie par une unité de masse de combustible sec lorsque l'eau formée par la combustion demeure à l'état de vapeur. Autrement dit, le PCI se déduit du PCS par soustraction de l'énergie utile à la vaporisation de l'eau produite au cours de la combustion. Cette dernière a pour origine l'hydrogène contenu dans le bois.

Le PCI anhydre du bois peut donc être exprimé de la manière suivante :

$$PCI_{\text{anhydre}} = PCS - L_v \cdot \frac{M_{H_2O}}{2 \cdot M_H} \cdot x_H \quad (\text{Pour le bois } PCI = PCS/1,11)$$

où :  $L_v$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau

$M_{H_2O}$  est la masse molaire de l'eau

$M_H$  est la masse molaire de l'hydrogène atomique

$x_H$  est la fraction massique d'hydrogène dans le combustible anhydre

Tout comme le PCS, de nombreuses études ont cherché à corréler le PCI anhydre à la composition élémentaire. Le modèle suivant prend en compte les 3 éléments C, H et O :

$$PCI_{\text{anhydre}} = 34,03 \cdot x_C + 121,64 \cdot x_H - 12,54 \cdot x_O$$

où : le PCI s'exprime en MJ.kg<sup>-1</sup>,

$x_C$  est la fraction massique de carbone,

$x_H$  est la fraction massique d'hydrogène,

$x_O$  est la fraction massique d'oxygène

Le PCI utilisé en combustion est aussi appelé PCI humide par opposition au PCI anhydre. Il prend en compte l'eau contenue dans le bois, on utilise alors l'humidité sur brut  $H_b$ .

$$PCI_{\text{humide}} = (1 - H_b/100) \cdot PCI_{\text{anhydre}} - (H_b/100) \cdot L_v$$

où :  $L_v$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau

$H_b$  est l'humidité sur brut du combustible en %

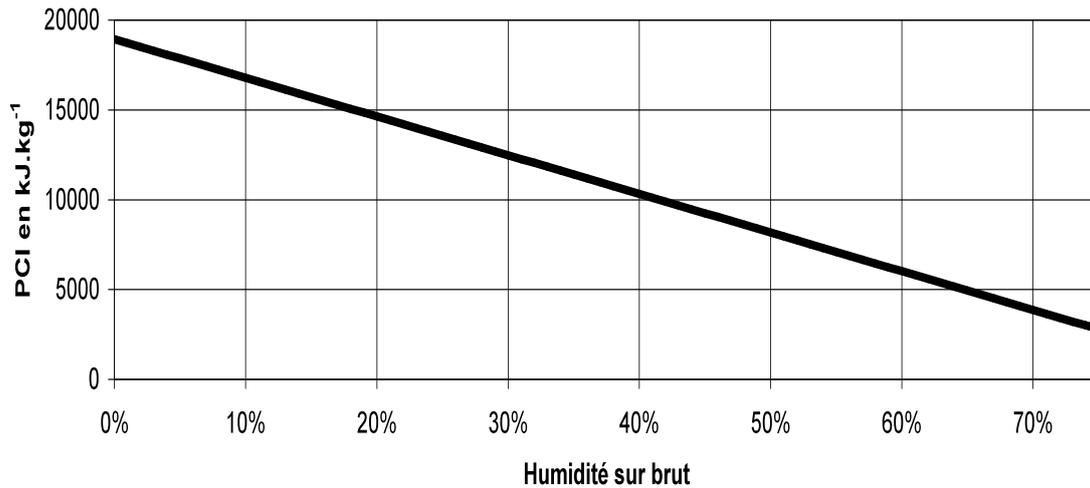


Figure 1: *PCI en fonction de l'Humidité*

On peut comparer le PCI du Bois à celui des combustibles courants :

Combustible	PCI en kWh/kg
Bois brut en bûches	4
Charbon (coke)	8
Fioul domestique	12
Gaz naturel	17

Tableau 3 : *PCI de combustibles courants*

## Mécanismes

Le bois ne brûle pas spontanément et doit être pyrolysé par une source externe (allumage) avant de libérer des gaz combustibles qui vont eux-mêmes s'enflammer lorsque la température dépassera une température de l'ordre de 280°C. La pyrolyse sera alors exothermique et entretenue par la combustion.

Température	Phénomènes	Réaction
$\theta < 200^{\circ}\text{C}$	Déshydratation Traces de $\text{CO}_2$ , glyoxal, acides formique et acétique	Endothermique
$200 < \theta < 280^{\circ}\text{C}$	Traces de $\text{CO}_2$ , CO, glyoxal, acides formique et acétique Début de carbonisation	Endothermique
$280 < \theta < 500^{\circ}\text{C}$	Dégagement de $\text{CO}_2$ , CO, HCHO, acides formique et acétique, $\text{H}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CH}_4$ Goudrons inflammables Carbonisation	Exothermique
$\theta > 500^{\circ}\text{C}$	Charbon	Exothermique

Tableau 3: *Les étapes de la pyrolyse du bois*

Environ 85 % de la masse de bois brûle, en phase gazeuse homogène, sous forme de gaz, principalement CO, H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. Normalement les flammes obtenues sont incolores ou légèrement bleutées. La couleur jaune provient de la combustion partielle de goudrons et caractérise une combustion imparfaite (manque d'air, bois humide), avec dégagement de COV (composés organiques volatils), HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques), sous forme d'aérosols organiques. Les composés organiques issus de la pyrolyse du bois, étape primaire de la combustion du bois, sont très nombreux. Ils proviennent de la décomposition de l'holocellulose, comme le composé primaire principal, le lévoglucosane, ou de la lignine, sous forme de benzènes, phénols, métoxy-phénols...pour les COV précurseurs des HAP. Ces derniers sont cancérogènes, comme certains COV.

Les 15 % restants, correspondant au charbon brûlent par combustion surfacique, en phase solide hétérogène. La vitesse de cette combustion lente dépend du degré de division du charbon. De l'air est injecté dans les braises et capte le carbone constitutif pour dégager du CO<sub>2</sub>.

*Remarque : les proportions relatives, 85% et 15% de la masse de bois brûlant en phase gazeuse ou solide dépendent de l'état de division du combustible (voir plus loin).*

Avec les minéraux présents dans le bois sous formes de sels ou d'oxydes, le charbon non brûlé se retrouve dans les cendres, à l'origine des **particules** présentes dans les fumées.

Pour avoir une combustion totale, il est nécessaire d'atteindre un niveau de température minimum, suffisante pour entretenir une dégradation complète du bois et les réactions d'oxydation des gaz produits. Une température de 600 °C apparaît comme minimum dans le cas du bois, 800 à 900 °C étant certainement le niveau idéal. Une température plus élevée peut conduire à la formation d'oxydes d'azote N<sub>2</sub>O, NO, puis NO<sub>2</sub>.....donnant lieu à la formation d'ozone sous irradiation solaire.

La température de combustion ne doit pas dépasser 1200°C pour éviter la fusion des cendres (à cause de sodium, potassium et silice présents dans les bois en proportions variables) provoquant le "bistrage" (avec les goudrons et les suies) et le "coulage" des réfractaires des cheminées, contenant de la silice.

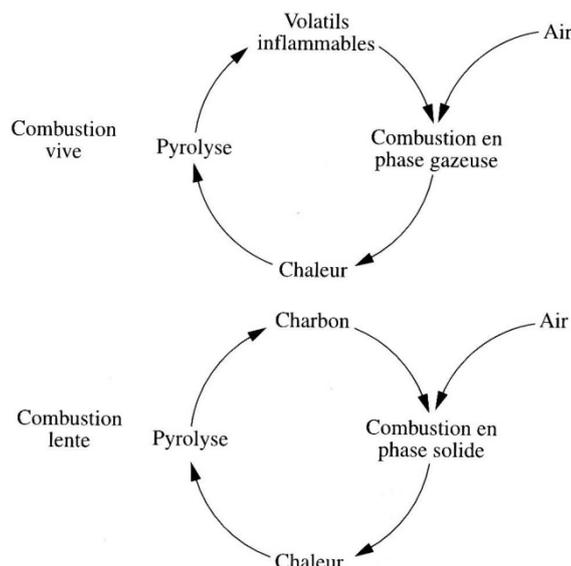


Figure 2: Mécanisme de combustions homogène et hétérogène du bois

**Combustion avec excès d'air** : pour s'assurer que tous les gaz produits par la pyrolyse du bois soient oxydés, une des solutions consiste à brûler le bois avec excès d'oxygène, donc d'air.

Malheureusement cela augmente le volume de fumées à chauffer et diminue ainsi la température moyenne dans l'appareil générant une combustion incomplète, si l'excès est mal contrôlé.

Dans le cas du bois, il est courant d'injecter entre 25 et 100 % d'air en plus du minimum nécessaire (pouvoir comburivore). la composition théorique des fumées est : CO<sub>2</sub>, 9,6 % ; H<sub>2</sub>O vapeur, 6 % ; O<sub>2</sub>, 9,9 % et N<sub>2</sub>, 74,5 %. Comme il y a de l'azote intrinsèque dans la composition du bois et que l'azote s'oxyde à haute température, on décèle toujours N<sub>2</sub>O ou NOx.

*Remarque : On définit un pouvoir comburivore, qui est le volume d'air théorique nécessaire à la combustion ( $V_a = 4,57 \text{ m}^3/\text{kg}$  de bois), et un pouvoir fumigène,  $V_f$ , qui correspond au volume de fumée sèche ou humide (dans les faits humide).*

### Influence de la géométrie (taille et forme) du bois sur sa combustion

La géométrie du bois utilisé en combustion dépend de la ressource et du système d'alimentation, manuel ou automatique des équipements.

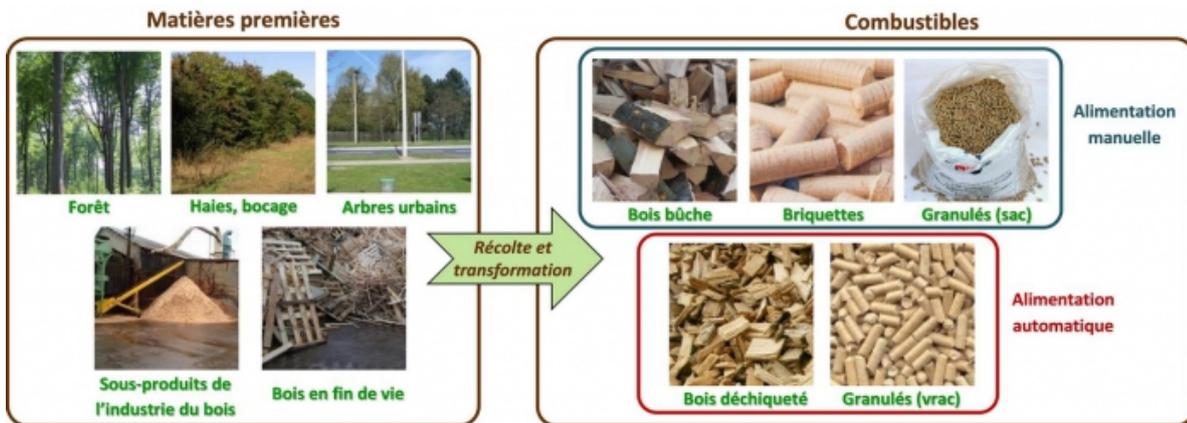


Figure 3: Ressources et combustibles (4)

Comme il a été dit précédemment, c'est la pyrolyse qui est l'étape primaire de la combustion du Bois. C'est aussi l'étape limitante qui va gouverner la vitesse de combustion du bois. Sa vitesse est liée à la granulométrie (rapport Surface/Volume) du combustible. Plus le bois est divisé plus la vitesse est importante et plus il se formera de gaz combustible.

La température d'inflammation du bois est d'environ 300°C, mais sa température de combustion, comme son état de division, doit être suffisante pour maximiser le volume de gaz combustibles. On comprend ainsi mieux pourquoi l'utilisation de bûches en foyer ouvert de type cheminée à l'âtre est la plus polluante et pourquoi les granulés de sciure sont performants !

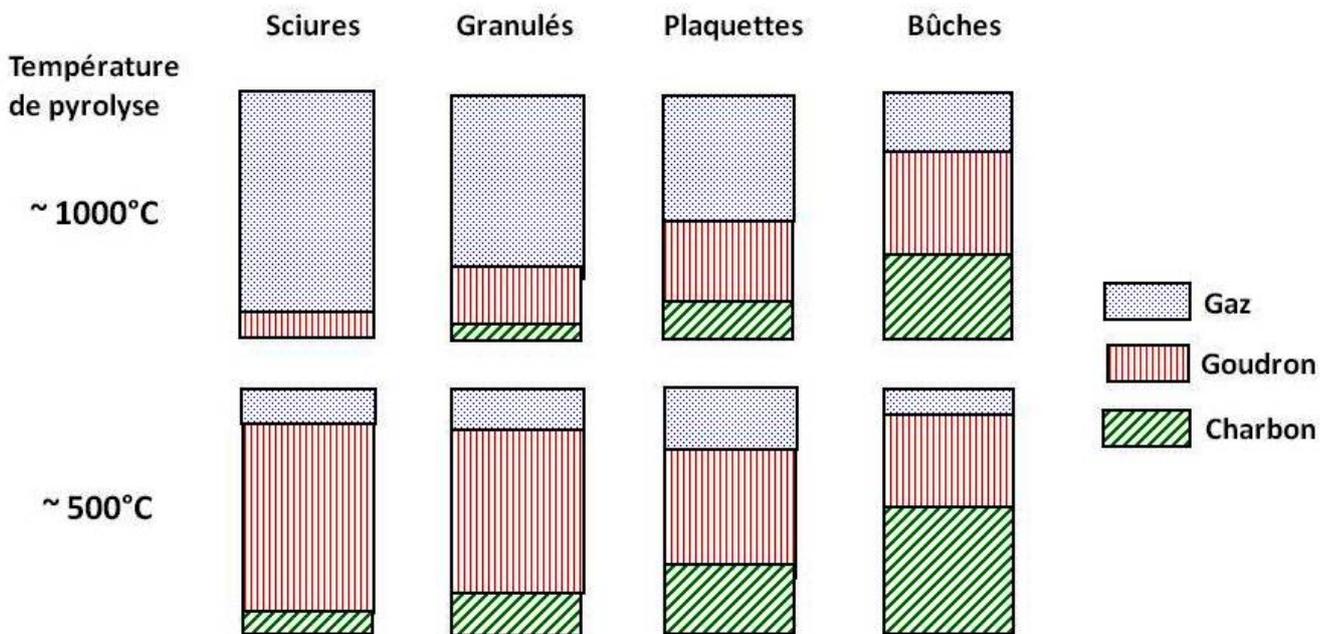


Figure 4 : Influence de la température et de l'état de division sur la pyrolyse, donc la combustion du bois.

Remarque : Le résultat ci-dessus, pour les sciures vers 1000°C, explique certaines explosions de silos de sciures, comme les silos à grains, dues à la formation très importante de gaz à ce niveau de température.

Il est possible de résumer le mécanisme de la combustion du bois dans la figure suivante

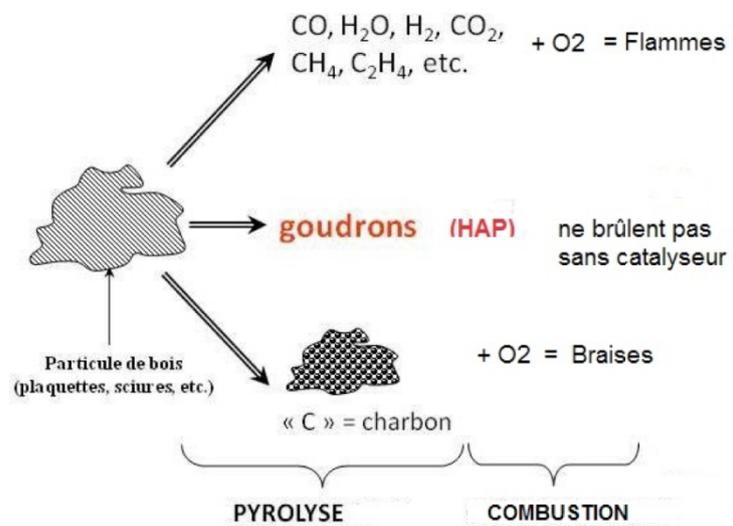


Figure 5 Mécanisme de combustion du bois

Le traitement des fumées par filtres pour les particules fines (cendres carbone imbrûlé) et catalyseurs pour les goudrons et suies est difficilement réalisable dans les installations domestiques. Il est donc primordial de veiller à la qualité du combustible (bois feuillu, propreté, siccité et division) et du procédé de combustion.

### Rendement énergétique de la combustion du bois (TRE),

Le taux de retour énergétique (Energie utilisable/Energie dépensée) est compris entre 20 et 40 pour le bois énergie, et dépend du coût de l'approvisionnement, de la préparation du combustible bois et des coûts de transport (granulés importés du Canada ou Etats Unis !). Il dépend bien entendu de la

technologie de conversion et du traitement des effluents. La cogénération aurait un TRE élevé, proche de 40.

Par contre le TRE des biocarburants peut être relativement faible, notamment pour l'éthanol, 0,8. Il peut atteindre 16 pour le biodiesel issu de la filière huile.

Pour ce qui concerne les autres énergies renouvelables la tendance sera inverse, on va aller vers une augmentation liée à l'amélioration des capacités et performances.

*Remarque : Le TRE des hydrocarbures est de l'ordre de 17, celui de l'énergie nucléaire, 5-15, de l'énergie éolienne, ~18 et du photovoltaïque, ~7. Il est fort probable que dans le futur, les TRE du pétrole et gaz vont diminuer, à cause de la plus faible accessibilité des ressources. Il en sera de même pour l'énergie nucléaire, à cause du coût de la mise en sécurité et du démantèlement.*

## Références

- (1) Deglise X., Donnot A. (2004), "Bois énergie" chapitre BE8535, "Techniques de l'Ingénieur".
- (2) Autret A., Rogaume Y. (2011), "Production de Chaleur à partir du bois - Emissions atmosphériques - Notions de base", chapitre BE8750, *Techniques de l'Ingénieur*.
- (3) Autret A., Rogaume Y. (2011), "Production de Chaleur à partir du bois - Emissions atmosphériques – Bilan, impact et évolution", chapitre BE8751, *Techniques de l'Ingénieur*.
- (4) <http://www.bois-et-vous.fr/filiere-foret-bois/bois-energie/generalites.html>

## Rappel des enjeux de santé publique liés à la pollution atmosphérique

Selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) la pollution intérieure aux habitations et extérieure constitue le principal risque environnemental vis-à-vis de la santé humaine.

D'après cet organisme, (rapport datant de Mars 2014), la pollution de l'air sous toutes ses formes serait responsable d'environ 7 millions de décès prématurés dans le monde en 2012, dont 1,7 millions en Asie, l'Inde étant principalement touchée.

En France, les estimations font état de 42 000 décès liés directement ou indirectement à la pollution de l'air.

Afin de limiter ce lourd bilan, l'OMS a édicté des recommandations à savoir :

- Cesser d'utiliser du charbon non transformé dans les foyers pour se chauffer ainsi que du Kérosène.
- Développer à grande échelle, pour cette même application, des combustibles propres gazeux ou liquides (Biogaz, éthanol, gaz naturel, GPL...).

**Les Principaux polluants atmosphériques ayant un impact prouvé sur la santé sont répertoriés ci-après :**

- Les particules fines (voir définition au § suivant)
- Les oxydes d'azote NOx et plus particulièrement le dioxyde d'azote NO2 et sa forme dimère.
- Les composés organiques volatils COV
- L'ammoniac NH3
- Les Hydrocarbures aromatiques Polycycliques HAP
- Certains composés organophosphorés POP
- Le dioxyde de Soufre SO2
- Le carbone micronisé sous sa forme de suie
- Le mercure

Cette liste fait référence aux polluants majeurs dont la présence, à certaines concentrations dans l'atmosphère que nous respirons, permet de mettre en évidence un lien de cause à effet sur la santé humaine au travers d'études statistiques épidémiologiques.

Il est à noter toutefois qu'une partie des COV présents dans l'atmosphère est d'origine naturelle et provient de l'émission par les feuilles des arbres sous l'effet du rayonnement solaire. L'isoprène et la famille des terpènes, en particulier, sont des composés émis par le couvert végétal.

### Les pathologies liées, pour partie, à la présence de polluants spécifiques

- Est mis en avant le caractère mutagène – cancérigène avéré ou cancérogène (suspecté) de composés tels que les HAP voire des COV. Certains HAP peuvent affecter le système immunitaire, en particulier le benzo(a) pyrène qui est cancérigène et classé en groupe 1 par le CIRC.
- Le phénomène cumulatif de certains métaux lourds.
- Les problèmes respiratoires liés aux particules (asthme, bronco-pneumopathies, altération du développement respiratoire chez l'enfant notamment lors d'une exposition chronique).
- Accroissement de la morbidité cardio-respiratoire.

L'Organisation Mondiale pour la Santé fixe un certain nombre de valeurs guide pour différents polluants atmosphériques du fait de leurs effets sanitaires. Ces valeurs sont à la base des législations sur la qualité de l'air dans le monde entier. Elles sont données dans le tableau ci-dessous:

Polluants	Valeurs guide de l'OMS	Effets sur la santé
Particules de diamètre inférieur à 10 microns (PM <sub>10</sub> )	50 µg/m <sup>3</sup> en moyenne journalière 20 µg/m <sup>3</sup> en moyenne annuelle	Risques de développement de maladies cardio-vasculaires et respiratoires
Particules de diamètre inférieur à 2,5 microns (PM <sub>2,5</sub> )	25 µg/m <sup>3</sup> en moyenne journalière 10 µg/m <sup>3</sup> en moyenne annuelle	Risques de développement de maladies cardio-vasculaires et respiratoires
Ozone (O <sub>3</sub> )	100 µg/m <sup>3</sup> en moyenne sur 8 h	Peut induire des difficultés respiratoires, asthme Risque de perturbation du fonctionnement des poumons
Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	40 µg/m <sup>3</sup> en moyenne annuelle 200 µg/m <sup>3</sup> en moyenne horaire	Risque de développement de bronchites chroniques chez les sujets asthmatiques.
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	20 µg/m <sup>3</sup> en moyenne journalière 500 µg/m <sup>3</sup> en moyenne sur 10 mn	Peut affecter les fonctions respiratoires et le système pulmonaire, ainsi que des irritations des yeux

Tableau 4 : Source: PREV'AIR : Plate-forme nationale de la qualité de l'air

### La Pollution particulaire

Les particules fines sont mesurées par des stations de surveillance de la qualité de l'air et répertoriées selon trois catégories, fonction de leur taille (diamètre aérodynamique), comme suit: particules supérieures ou égales à 10 microns, à 2,5 microns et 1 micron.

#### En quoi les particules les plus fines sont-elles particulièrement dommageables pour la santé ?

Il existe un consensus médical et scientifique pour admettre que la mortalité prématurée est essentiellement imputable à des affections respiratoires, des maladies cardiovasculaires et des cancers dus à ces particules fines qui induisent des modifications biologiques de par leur taille et leur forme (action physique essentiellement) et par leur composition chimique (interactions moléculaires).

Celles dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 microns sont les plus nuisibles pour la santé car, après inhalation, elles interagissent à la surface des alvéoles pulmonaires et diminuent d'autant les échanges gazeux.

Les enfants constituent un groupe particulièrement vulnérable aux effets de la pollution atmosphérique. Outre une aggravation des manifestations asthmatiques par irritation et inflammation des bronches, une exposition chronique aux particules fines inférieures à 2,5 microns peut conduire à une diminution de la capacité pulmonaire chez les enfants ( Gauderman et Col. 2004).

Pour autant, d'autres polluants liquides (aérosols) ou gazeux (COV) qui sont émis lors de la combustion du bois et de ses dérivés, contribuent indubitablement aux problèmes de santé publique mentionnés par le corps médical.

### **Pourquoi la combustion du bois engendre des particules fines ?**

La combustion du bois génère d'autant plus de fines particules en suspension que la réaction de combustion est incomplète, loin de l'équilibre stoechiométrique (en déficit d'oxygène le plus souvent).

Des mesures effectuées Outre-Atlantique, à titre d'exemples, mettent clairement en exergue la contribution du chauffage résidentiel au bois sur l'apparition de smog hivernal. Deux pics de concentration en particules fines sont très nettement observés, en secteurs résidentiels, tôt le matin lorsque l'on ajoute du bois dans le foyer, puis en fin d'après-midi, au retour du travail, pour réactiver le dispositif de chauffage au bois et entretenir les braises.

Ces phénomènes peuvent être amplifiés par la topographie des lieux (vallées encaissées...) et par des phénomènes météorologiques tels que la présence d'une couche d'inversion empêchant la dispersion verticale des particules et polluants divers.

**Concentration horaire moyenne en hiver à la station de mesure du Parc les Primevères 03021 (Québec)**

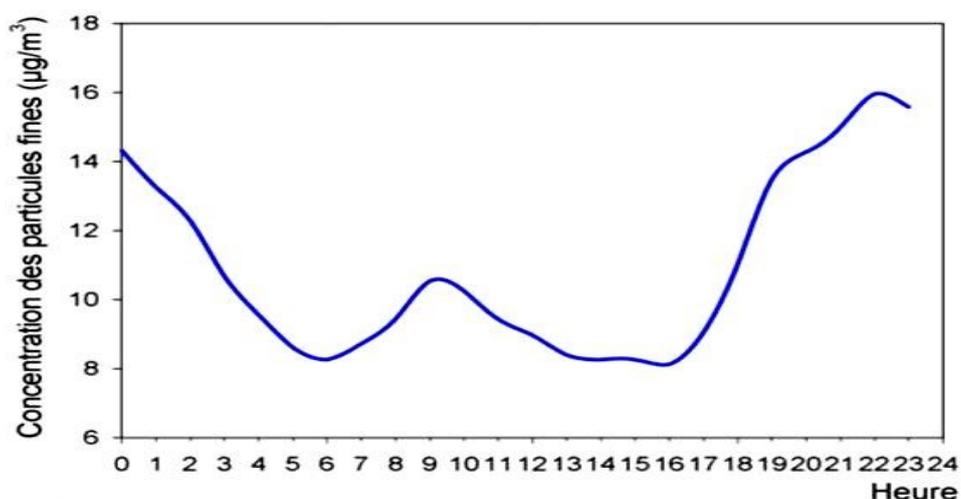


Figure 6

Concentration moyenne horaire de particules fines en hiver<sup>1</sup> (de 2008-2009 à 2012-2013) à la station du Parc Les Primevères (03021) dans le secteur Champigny à Québec

<sup>1</sup> Mois d'« hiver météorologique » : décembre, janvier et février

Les deux pics de pollution particulaire (entre 6- 10h et au-delà de 17 h) correspondent à l'insertion de bûches dans les foyers au lever puis au retour du travail des occupants des logements.

### **Un problème accru dans les grandes agglomérations**

Une étude en date de janvier 2009 comparant 51 villes américaines a clairement démontré qu'une réduction de l'exposition à des particules fines contribuait de façon significative à l'amélioration de l'espérance de vie des résidents.

Sur l'ensemble du territoire européen, la qualité de l'air est suivie et modélisée par le service atmosphère du programme COPERNICUS de la Commission Européenne.

Au niveau national, le Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie a mis en place des outils performants de suivi de la qualité de l'air parmi lesquels on peut citer :

PREV'AIR, plate-forme nationale de la qualité de l'air.

l'INS inventaire national spatialisé qui recense les émissions des polluants atmosphériques majeurs avec une résolution spatio-temporelle fine.

l'INERIS dans le cadre des travaux menés par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA).

L'ADEME, Agence de Développement et de Maîtrise de l'Energie, le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) ainsi que les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) apportent également leur concours à cette problématique.

La plupart des grandes agglomérations disposent désormais de stations de monitoring permettant de cartographier les polluants et les principales sources d'émissions.

AIRPARIF est une source d'information fort bien documentée sur les différentes activités contributives aux rejets de polluants atmosphériques présents en Région Parisienne.

Concernant le secteur résidentiel et tertiaire, AIRPARIF mentionne sur son site Internet les éléments suivants :

« Le secteur résidentiel et tertiaire, notamment le chauffage domestique et des entreprises, contribue à hauteur de 26% aux particules PM10 émises en Ile-de-France, à 39% des particules fines PM2,5, à 30% des émissions d'hydrocarbures (COVNM) et à plus de 41% des rejets de GES. »

### Contribution de la combustion du bois en secteur résidentiel à l'émission de particules fines en Ile-de-France

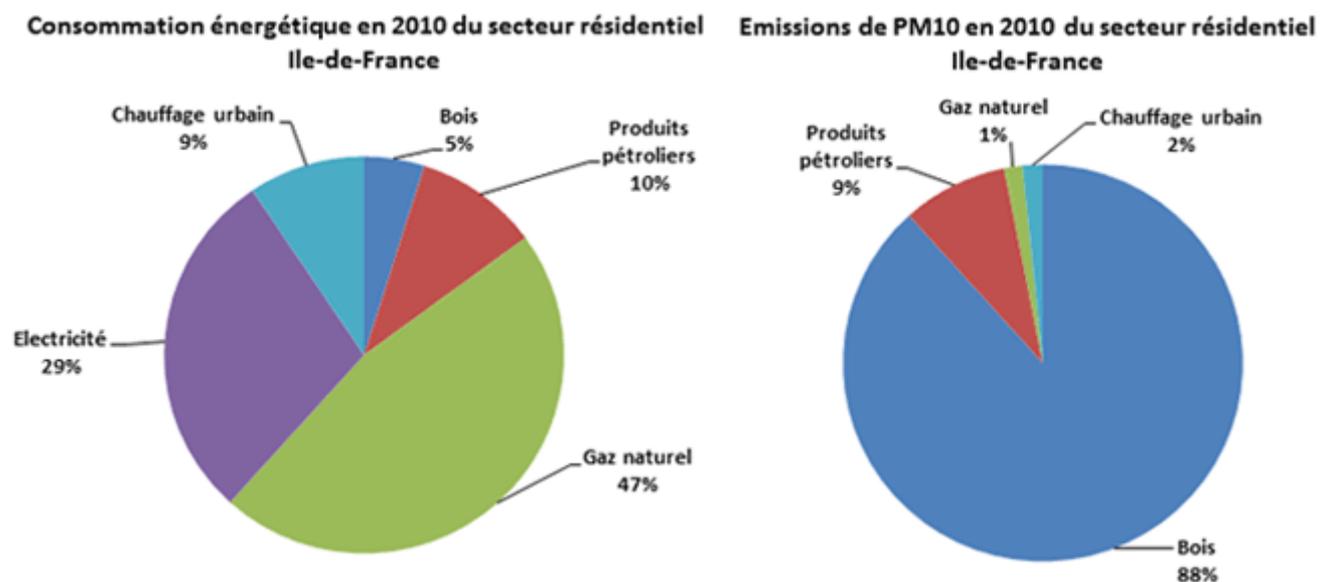


Figure 7: Consommation énergétique et émissions de particules en résidentiel Ile de France

Source Airparif –Actualités 01/12/2014

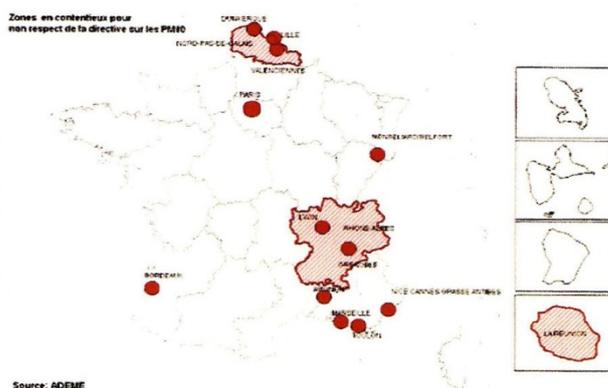
En détaillant par combustible les émissions du secteur résidentiel, le bois apparaît comme le contributeur majoritaire. Bien qu'il ne représente que 5% des consommations de ce secteur en Ile-de-France, il est à l'origine de plus de 90% des émissions de particules (PM10 et PM2,5) et de plus de

80% des émissions d'hydrocarbures du chauffage résidentiel « (Source : Inventaire d'émissions AIRPARIF – 2012).

## Le contexte Français dans un cadre Européen relatif à la qualité de l'air

La France, au même titre que de très nombreux pays, doit faire face à une pollution particulière spécifiquement concentrée sur des régions à forte activité industrielle, notamment la région Rhône-Alpes, le Nord proche de la Belgique ainsi que les agglomérations à forte concentration humaine (parisienne, bordelaises, marseillaise et niçoise à titre d'exemples).

Depuis le 18 mai 2011, la Commission européenne poursuit la France devant la Cour de justice pour non-respect des valeurs limites de qualité de l'air pour les PM10 dans 15 zones dont 12 agglomérations de plus de 100 000 habitants



Afin de réduire les impacts sanitaires et ramener les niveaux de PM10 en dessous des Valeurs Limites européennes, il est

- nécessaire d'engager à court terme des **actions efficaces** d'amélioration de la qualité de l'air,
- notamment pour réduire les émissions du **chauffage au bois individuel**

Source: Ademe Contexte - Qualité de l'air

Conscientes de cette problématique, les autorités nationales, lors du Grenelle de l'Environnement, ont fixé des objectifs quantifiés et planifiés dans le temps pour améliorer la qualité de l'air.

Avec pour objectif :

- Réduire de 30% les particules fines dans l'air ambiant d'ici 2015 (avec un seuil de 15 microgrammes/m<sup>3</sup> pour les PM 2,5 à cette même date).

Cette valeur englobe l'ensemble des particules fines en provenance de toutes les sources d'émissions, en particulier les transports (les véhicules à moteur diesel étant particulièrement visés) mais également les combustibles utilisés pour le chauffage ou la cuisson des aliments.

Fin 2014, sur proposition du Ministère en charge de l'Environnement, après avis du Conseil de l'environnement et des risques sanitaires et technologiques de Paris (CoDERST), l'interdiction est partiellement levée sous forme d'une modification de l'arrêté concerné (courant Janvier 2015).

Cette évolution réglementaire, pour le moins évolutive, montre que ce sujet, qui présente pourtant une composante sanitaire majeure, touche fortement la sensibilité d'un public attaché au combustible bois et retranscrite, par l'administration, dans les règlements qui régissent son utilisation.

## Les règlements et les normes qui régissent les émissions de polluants

Un certain nombre de directives internationales, européennes et nationales ont été promulguées et mises en application au cours des dix dernières années. Après avoir été incitatives, nombre d'entre elles sont désormais réglementaires et par là même contraignantes.

On peut citer à titre informatif non limitatif :

- Les plafonds d'émissions de la directive NEC (National Emission Ceilings)
- La convention de Genève/Protocole de Göteborg qui concerne les PM 2,5 (Particules dont le diamètre moyen est inférieur à 2,5 microns)
- La convention de Stockholm sur les POP (Polluants Organiques Persistants)
- La Directive 2008/50/CE qui fixe les valeurs limites de particules inférieures à 10 microns (PM 10) et d'oxydes d'azote
- La loi française 96/1236 du 30 Décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie
- Les normes de l'OMS : Soucieuse de réduire la mortalité due à la pollution domestique, l'OMS a, pour la première fois, défini et proposé le 12 Novembre 2014 des normes chiffrées concernant l'émission maximale des polluants en provenance des appareils de cuisson et de chauffage.

Ces normes font référence aux éléments suivants:

Pour les particules fines les plus dangereuses (PM 2,5 diamètre inférieur à 2,5 microns), l'OMS recommande que les appareils de cuisson et de chauffage n'émettent pas plus de 0,8 milligramme par minute (mg/min), ceci lorsque l'enceinte est dotée d'une ventilation adaptée.

Dans un milieu non ventilé, le seuil d'émission de PM 2,5 ne devrait pas dépasser 0,23 mg/min.

Quant au monoxyde de carbone (CO), les appareils ne devraient pas en générer plus de 0,59 g/min (en milieu ventilé) et 0,16 g/min dans un lieu non pourvu de ventilation.

***Pour bien mesurer les enjeux et les défis que constituent de telles valeurs normatives, l'OMS souligne que les émanations actuelles sont en moyenne 100 fois supérieures à cette norme.***

L'Agence Européenne pour l'Environnement détaille dans son dernier rapport 2013 l'évolution des exigences des directives européennes ainsi que les politiques et mesures mises en place au niveau européen pour améliorer la qualité de l'air et réduire les impacts sur la santé et l'environnement.

### **Aspect réglementaire spécifique à la région parisienne**

Parmi les mesures prises en Ile-de-France, la pollution particulaire dépassant parfois les valeurs réglementaires limites internationales, l'utilisation du bois comme combustible est désormais restreinte, voire interdite selon les cas, depuis Septembre 2007.

En effet, L'arrêté inter-préfectoral N° 2007-1590 du 24 septembre 2007 stipule qu'on ne peut utiliser sa cheminée à Paris, qu'à la condition qu'elle ne soit pas la principale source de chauffage de son logement, donc exclusivement en tant que chauffage d'appoint ou pour son agrément.

Pour tous les foyers ouverts, (par opposition aux inserts et aux poêles), quel qu'en soit l'usage, l'interdiction devait être totale pour Paris intra-muros et les 435 autres communes concernées de l'agglomération parisienne. à compter du 1<sup>er</sup> Janvier 2015 en vertu de l'article 31 de l'arrêté préfectoral n°2013 084 002 du 25 mars 2013. Cet arrêté ne prévoyait toutefois aucune sanction pour les contrevenants.

<b>Polluant</b>	<b>Part des émissions dues à la combustion de la biomasse sur les émissions totales en 2005</b>
<b>Gaz à effet de serre</b>	
CH4	4%
N2O	1%
SO2	2%

<b>Polluants atmosphériques</b>	
NOx	2%
COVNM*	22%
CO	31%
As	25%
Cd	7%
Cr	30%
Cu	5%
Hg	2%
Ni	2%
Pb	20%
Se	13%
Zn	33%
PCDD-F	12%
4 HAP**	77%
TSP	12%
PM 10	23%
PM 2.5	34%
PM 1.0	59%

\* Composés organiques volatils non méthaniques - \*\*Somme des 4 HAP : Benzo(a)pyrène (Bap), benzo(b)fluoranthène (BbF), benzo(k)fluoranthène (BkF), indeno (1,2,3-cd) pyrène

Tableau 5 : *Part des émissions dues à la combustion du bois sur les émissions totales en 2005*

L'importance des émissions atmosphérique issues de la combustion du bois est donc à relativiser en regard des émissions totales nationales (en 2005).

On peut toutefois faire les observations suivantes :

**La part des particules fines inférieures à 10 microns est significative, voire importante en ce qui concerne les particules inférieures à 1 micron, prouvées comme étant les plus dangereuses pour la santé humaine.**

**Le pourcentage des HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), reconnus pour être cancérigènes et/ou cancérigènes, est voisin de 80% le l'ensemble des émissions de cette nature.**

Les COV (Composés Organiques Volatils) interviennent pour environ 20%. Il s'agit cependant d'une moyenne sur l'ensemble du territoire national, cette valeur en COV étant très dépendante de l'essence de bois et pouvant varier fortement d'une région française à une autre. Les résineux, dans leur majorité, re-larguent plus de COV dans l'atmosphère que les feuillus.

Les métaux lourds sont présents en quantités variables selon la nature du terrain sur lequel a poussé la biomasse mais ils peuvent contribuer jusqu'à un tiers des émissions totales de ces éléments dans certains cas (chrome, plomb, zinc).

## Emissions dues à la combustion du bois et des résidus agricoles dans le résidentiel tertiaire (hors chauffage urbain)

Polluant	Unité	1990	1995	2000	2005	2006	2007
CO2	Gg	33473	32850	30985	30016	29108	27827
CH4	Mg	177976	177181	141762	100461	90000	78916
N2O	Mg	1455	1428	1347	1305	1266	1210
GES	kt eq CO2/an	37662	37014	34379	32530	31390	29859
As	kg	3441	3380	2809	2149	1963	1769
BaA	kg	17600	15839	12451	9027	8353	7470
BaHA	kg	1015	913	718	520	481	431
BaP	kg	11005	9903	7785	5644	5222	4670
BbF	kg	12322	11088	8717	6320	5848	5229
BGHIPE	kg	3255	2929	2303	1669	1545	1381
BkF	kg	7537	6783	5332	3866	3577	3199
Cd	kg	507	498	414	317	289	261
CO	Mg	2441212	2408199	2075234	1706701	1593507	1461841
COVNM	Mg	537206	534717	428265	304175	272703	239306
Cr	kg	17025	16723	13898	10633	9711	8750
Cu	kg	11229	11030	9167	7013	6405	5771
FLUORA	kg	69917	62917	49461	35858	33180	29673
Hg	kg	290	285	237	181	165	149
INDPY	kg	6410	5768	4534	3287	3042	2720
Ni	kg	3985	3914	3253	2489	2273	2048
NOx	Mg	22383	21948	20842	20562	19955	19229
Pb	kg	32601	32022	26613	20362	18595	16755
PCDD-F	mg	35986	35356	29298	22210	20257	18168
Se	kg	2536	2491	2070	1584	1446	1303
SO2	Mg	7277	7141	6736	6525	6328	6049
TSP	Mg	222735	223740	183665	139027	127079	113978
Zn	kg	105046	103182	85752	65609	59918	53989

Tableau 6 Emissions dans le résidentiel tertiaire (hors chauffage urbain)

Source : Evaluation prospective 2020-2050 de la contribution du secteur biomasse énergie aux émissions nationales de polluants atmosphériques Etude CITEPA pour le compte de l'ADEME 11/2009

L'effet du renouvellement des appareils de chauffage au bois s'est traduit d'une manière très positive sur les émissions au cours des vingt dernières années avec sensiblement une division par deux du taux d'émission due à la combustion du bois comme présenté dans le tableau ci-dessus.

## Emissions dues à la combustion du bois dans le cadre des réseaux de chauffage urbain

Polluant	Unité	1990	1995	2000	2005	2006	2007
CO2	Gg	17,1	61,8	49,3	121,4	196,5	197,5
CH4	Mg	0,6	2,2	1,7	4,2	6,8	6,9
N2O	Mg	0,7	2,7	2,1	5,3	8,5	8,6
GES	kt eq CO2/an	17,4	62,7	50,0	123,2	199,3	200,3
As	kg	1,8	6,4	5,1	12,5	20,3	20,4
BaA	kg	0,2	0,7	0,6	1,5	2,3	2,4
BaHA	kg	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
BaP	kg	0,1	0,5	0,4	0,9	1,5	1,5
BbF	kg	0,1	0,5	0,4	1,1	1,7	1,7
BGHIPE	kg	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4
BkF	kg	0,1	0,3	0,3	0,7	1,1	1,1
Cd	kg	0,3	0,9	0,7	1,8	3,0	3,0
CO	Mg	46,6	168,0	133,8	330,0	534,0	536,8
COVNM	Mg	0,9	3,2	2,6	6,3	10,3	10,3
Cr	kg	8,8	31,6	25,2	62,0	100,4	100,9
Cu	kg	5,8	20,8	16,6	40,9	66,2	66,6
FLUORA	kg	0,8	2,9	2,3	5,7	9,2	9,2
Hg	kg	0,1	0,5	0,4	1,1	1,7	1,7
INDPY	kg	0,1	0,3	0,2	0,5	0,9	0,9
Ni	kg	2,0	7,4	5,9	14,5	23,5	23,6
NOx	Mg	37,3	131,4	90,4	220,0	386,6	371,6
Pb	kg	16,7643	60,5	48,2	118,8	192,2	193,2
PCDD-F	mg	7,5	26,9	21,4	52,8	85,4	85,9
Se	kg	1,3	4,7	3,7	9,2	15,0	15,0
SO2	Mg	3,7	14,1	8,7	21,0	45,9	38,0
TSP	Mg	18,6	64,7	40,0	64,7	142,1	140,1
Zn	kg	54,0	194,9	155,3	382,8	619,4	622,7

Tableau 7 Emissions des réseaux de chauffage urbain

Source : Evaluation prospective 2020-2050 de la contribution du secteur biomasse énergie aux émissions nationales de polluants atmosphériques Etude CITEPA pour le compte de l'ADEME 11/2009

A contrario, il résulte de l'utilisation intensive de biomasse pour le chauffage urbain, qui a été très fortement encouragée par les pouvoirs publics aux cours de ces deux dernières décennies, une augmentation par un facteur 10 environ des émissions de polluants même si les dispositifs de

production d'énergie sont performants et soumis à une réglementation environnementale contraignante.

### Emissions dues à la combustion du bois dans des chaudières industrielles

Polluant	Unité	1990	1995	2000	2005	2006	2007
CO2	Gg	17,1	61,8	49,3	121,4	196,5	197,5
CH4	Mg	0,6	2,2	1,7	4,2	6,8	6,9
N2O	Mg	0,7	2,7	2,1	5,3	8,5	8,6
GES	kt eq CO2/an	17,4	62,7	50,0	123,2	199,3	200,3
As	kg	1,8	6,4	5,1	12,5	20,3	20,4
BaA	kg	0,2	0,7	0,6	1,5	2,3	2,4
BaHA	kg	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
BaP	kg	0,1	0,5	0,4	0,9	1,5	1,5
BbF	kg	0,1	0,5	0,4	1,1	1,7	1,7
BGHIPE	kg	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4
BkF	kg	0,1	0,3	0,3	0,7	1,1	1,1
Cd	kg	0,3	0,9	0,7	1,8	3,0	3,0
CO	Mg	46,6	168,0	133,8	330,0	534,0	536,8
COVNM	Mg	0,9	3,2	2,6	6,3	10,3	10,3
Cr	kg	8,8	31,6	25,2	62,0	100,4	100,9
Cu	kg	5,8	20,8	16,6	40,9	66,2	66,6
FLUORA	kg	0,8	2,9	2,3	5,7	9,2	9,2
Hg	kg	0,1	0,5	0,4	1,1	1,7	1,7
INDPY	kg	0,1	0,3	0,2	0,5	0,9	0,9
Ni	kg	2,0	7,4	5,9	14,5	23,5	23,6
NOx	Mg	37,3	131,4	90,4	220,0	386,6	371,6
Pb	kg	16,7643	60,5	48,2	118,8	192,2	193,2
PCDD-F	mg	7,5	26,9	21,4	52,8	85,4	85,9
Se	kg	1,3	4,7	3,7	9,2	15,0	15,0
SO2	Mg	3,7	14,1	8,7	21,0	45,9	38,0
TSP	Mg	18,6	64,7	40,0	64,7	142,1	140,1
Zn	kg	54,0	194,9	155,3	382,8	619,4	622,7

Tableau 8 : Emissions des chaudières industrielles

Source : Evaluation prospective 2020-2050 de la contribution du secteur biomasse énergie aux émissions nationales de polluants atmosphériques Etude CITEPA pour le compte de l' ADEME 11/2009

**Commentaires:** Quant aux chaudières industrielles au bois, leurs émanations ont peu évolué sur cette même période de temps, de l'ordre de + 20 %, à relativiser compte tenu du nombre plus important d'installations industrielles faisant appel à ce type de combustible actuellement.

## Répartition par type d'appareil domestique de chauffage au bois (France)

### *Le Chauffage au Bois Domestique*

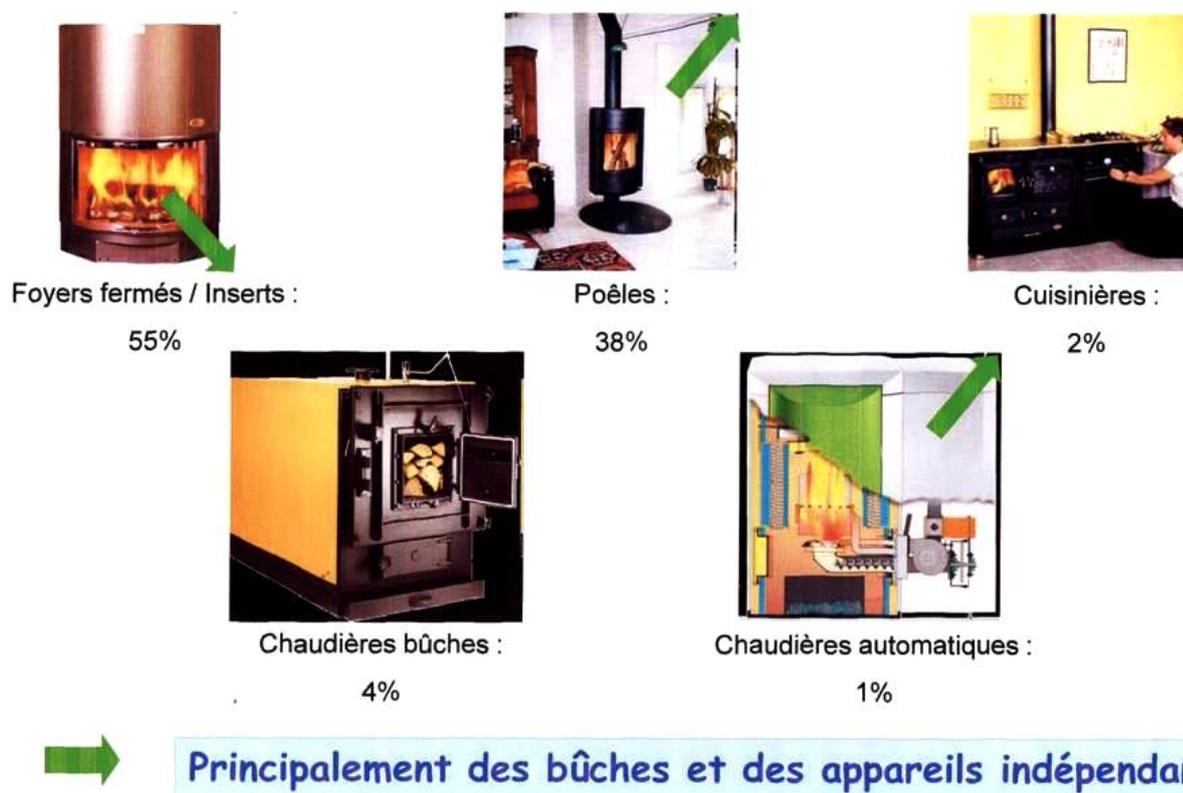


Figure 8: *Les Chaudières individuelles*

Source : Yann Rogaume Lermab-Université de Lorraine Combustion de la Biomasse, place, procédés et enjeux Colloque 28-29 Mars 2013

**Les tendances du marché à l'horizon 2020 font ressortir les évolutions suivantes d'augmentation du nombre d'installations en service**

- Foyers domestiques : 5,7 millions d'utilisateurs en 2006 - 7,4 millions en 2012 - 9 millions prévus en 2020. En revanche fort taux de renouvellement vers des appareils très peu polluants.

- Installations collectives et industrielles de production de chaleur à partir de biomasse : On devrait passer d'une production de chaleur de 1400 ktep en 2006 à 7600 ktep en 2020 (exprimé en équivalent pétrole) soit une augmentation d'un facteur 5.

## Objectifs prévisionnels de consommation par typologie d'utilisation à l'horizon 2020

Energie	Situation 2006	Horizon 2012		Horizon 2020	
		Objectif au 31/12/2012	Supplément à réaliser	Potentiel 2020	Supplément à réaliser
Bois individuel	7400 (5,75 Mlogts)	7400 (7,3 Mlogts)	0 (1,55 Mlogts)	7400 (9 Mlogts)	0 (3,25 Mlogts)
Biomasse	<b>1 400</b>	<b>2 500</b>	<b>1 100</b>	<b>5 200</b>	<b>3 800</b>
<i>dont bâtiments</i>	100	300	200	800	700
<i>dont réseaux de chaleur collectif/tertiaire</i>	100	300	200	1 200	1 100
<i>dont industrie/process</i>	1 200	1 900	700	3 200	2 000
Biomasse chaleur cogénération	0	540	540	2 400	2 400
Géothermie profonde	130	195	65	500	370
Géothermie intermédiaire	50	100	50	250	200
Pompe à chaleur individuelle	200 (0,075 Mlogts)	1 200 (1,245 Mlogts)	1 000	1 600 (2,0 Mlogts)	1 400
Solaire thermique individuel	17 (0,085 Mlogts)	150 (0,730 Mlogts)	133 (0,645 Mlogts)	817 (4,285 Mlogts)	800 (4,2 Mlogts)
Solaire collectif	10	35	25	110	100
Part ENR des UIOM et bois DIB	400	470	70	900	500
Biogaz	55	60	5	555	500
<b>Total</b>	<b>9 662</b>	<b>12 650</b>	<b>2 988</b>	<b>19 732</b>	<b>10 070</b>

Mlogts : millions de logements

Tableau 9 : Prospective consommation à l'Horizon 2020

Source : Evaluation prospective 2020-2050 de la contribution du secteur biomasse énergie aux émissions nationales de polluants atmosphériques Etude CITEPA pour le compte de l' ADEME 11/2009

**Commentaires :** L'utilisation du bois pour les usages individuels devrait demeurer sensiblement constante jusqu'en 2020. En effet si le nombre d'appareils installés pendant la période 2006 - 2020 prévue est en nette augmentation, l'efficacité énergétique supérieure des nouveaux foyers devrait contre-balancer cet accroissement.

Par contre, le recours à la biomasse, durant cette même période, triplera de par le grand nombre de réseaux de chaleurs et d'industries qui se tourneront vers le bois en tant que combustible.

De même la cogénération chaleur - production électrique, pour des raisons identiques de politique énergétique, devrait jouer un rôle prépondérant si l'on s'en réfère aux prévisions mentionnées dans le tableau ci-dessus.

## La problématique environnementale liée aux foyers ouverts

Les foyers ouverts (cheminées sans inserts) présentent un très faible rendement énergétique, généralement compris entre 10 à 15 % restitués sous forme de chaleur utile.

En conséquence, leur facteur d'émission de particules carbonées est très élevé, totalement non conforme aux normes actuelles préconisées ou en vigueur.

### Facteur de réduction des émissions de particules selon le type de technologie du foyer

Appliance	Particulate Emissions Factor	
	Grams/Kilogram	Reduction (%)
Conventional Stove (combustion lente)	18,5	–
Conventional fireplace (foyer conventionnel)	17,0	8
Non-Catalytic Stove (combustion évoluée non catalytique)	6,0	68
Catalytic Stove* (combustion évoluée catalytique)	6,2	65
Pellet Stove (à granules)	2,0	89
Masonry Heater (foyer de masse thermique)	3,0	84
Conventional Stove with Densified Fuel (fournaise à l'huile)	14,0	24

\*With a well maintained catalyst after normal use, on the average a newer catalyst will produce lower emissions and an older catalyst higher emissions.

Source : HOUCK, James E. and Paul E. Tiegs (1998). *Residential Wood Combustion Technology Review*, Volume 1, Technical Report, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C. 20460.

Tableau 10: Réduction des émissions selon la technologie

	<b>Rendement énergétique</b>	<b>Facteur d'émission de particules (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>
<b>Foyer ouvert</b>	10%	<b>3750</b>
<b>Foyers fermés non performant (avant 2000)</b>	45%	<b>3000</b>
<b>Appareil « Flamme Verte 5* »</b>	70%	<b>90</b>

Source: Document "Flamme Verte"

## Evolution des performances des appareils de chauffage domestique

	Combustible	Rendement	Autonomie
<b>Cheminées</b>			
<b>Foyer ouvert</b>	Bûches, briquettes	<10 à 30%	Faible : 2 à 3 heures
<b>Insert, foyer fermé</b>	Bûches, briquettes	60 à 80%	Jusqu'à 10 heures
<b>Poêles</b>			
<b>Ancien</b>	Bûches, briquettes	40 à 50%	3 à 6 heures
<b>Turbo</b>	Bûches, briquettes	60 à 70%	5 à 12 heures
<b>A post-combustion</b>	Bûches, briquettes	60 à 80%	5 à 15 heures
<b>A inertie</b>	Bûches, briquettes	70 à 85%	8 à 20 heures
<b>A granulés</b>	Granulés	80 à 85%	12 à 72 heures
<b>Chaudières</b>			
<b>A bûches</b>	Bûches, briquettes	75 à 85%	6 à 20 heures
<b>A bois déchiqueté</b>	Plaquettes	75 à 85%	Plusieurs mois
<b>A granulés</b>	Granulés	Jusqu'à 93%	Plusieurs mois

Tableau 11 : Performances des appareils de chauffage domestique

Source: Conso Neo : Portail info conso des énergies renouvelables

Les nouveaux dispositifs de chauffage, en particulier ceux présentant le label flamme verte 5\* peuvent atteindre un rendement énergétique important (70 % et plus). Le taux d'émission de particules (fines et autres) peut être diminué d'un facteur 40 par rapport aux émissions issues d'une cheminée ouverte.

L'utilisateur a donc doublement intérêt à se tourner vers ce type d'insert à haut rendement.

- Pour disposer d'un capital de chaleur bien plus important à consommation identique de bois.
- Pour réduire drastiquement la pollution induite (pollution extérieure et intérieure au lieu de vie).

## Emission de polluants issus de la combustion de bois bûches ou de granulés (Pellets)

À 13% d'O <sub>2</sub>	
•Rendement >= 75%	
•Émissions CO : bûches <= 0,12% granulés <= 0,02%	
•Émissions particules : bûches <= 40 mg/m <sup>3</sup> granulés <= 20 mg/m <sup>3</sup>	
•Émissions COVt : bûches <= 80 mg/m <sup>3</sup> granulés <= 40 mg/m <sup>3</sup>	
•Émissions NOx : <= 200 mg/m <sup>3</sup>	

Tableau 12

Source : Ademe, Directive Ecodesign

Les granulés à base de sciure de bois compressée, de par leur homogénéité et leur siccité (faible taux d'humidité), s'avèrent particulièrement performants tant en faible émission d'oxyde de carbone qu'en taux de particules réduit. Leur facilité d'utilisation dans des dispositifs à approvisionnement automatisé leur ouvre des potentialités de marché incontestables.

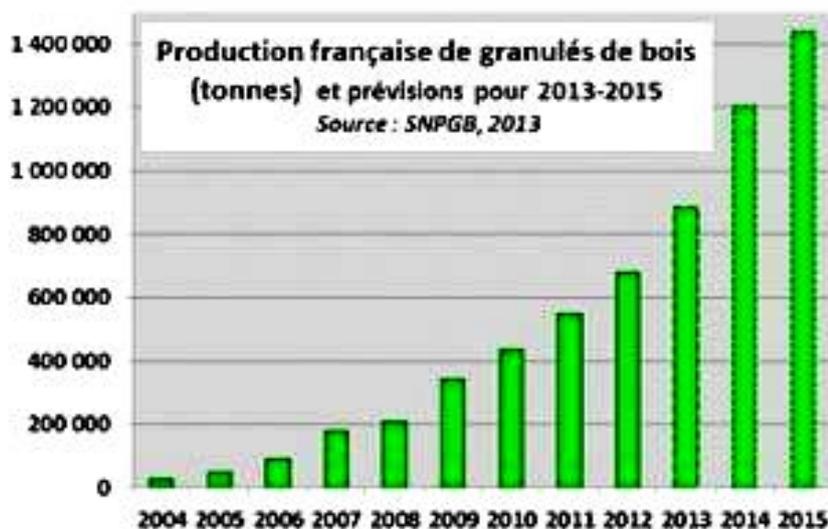


Figure 9: Production de granulés

## **En Conclusion**

**La combustion du bois improprement réalisée génère des polluants dont certains présentent un risque avéré pour la santé humaine. Elle contribue, à ce titre, à la pollution globale de l'air extérieur et intérieur. Cette contribution peut s'avérer significative en fonction de caractéristiques locales géographiques défavorables (vallées encaissées ...), météorologiques (couches d'inversion) ou liées à un taux très important d'utilisation du bois énergie tant dans des installations domestiques individuelles que collectives ou industrielles.**

- L'utilisation d'appareils et de dispositifs anciens, obsolètes et de faible rendement énergétique, donc loin des conditions optimales de combustion, contribue très significativement à cette pollution.**
- Les foyers ouverts sont de ceux-ci. La qualité du combustible (siccité, homogénéité, essence) est un facteur important à prendre en compte.**
- Les récents dispositifs à foyer fermé (inserts), de haut rendement, minimisent considérablement les émanations issues de la combustion du bois et devraient être conformes aux normes environnementales en vigueur.**
- Les installations collectives et industrielles de production d'énergie à partir de la biomasse bois sont soumises à des normes de rejets atmosphériques contraignantes qui leur sont spécifiques et qui pourraient évoluer, à l'avenir, pour abaisser les seuils actuels et tenir compte d'autres polluants que ceux qui sont retenus actuellement dans ces normes.**

## Aspect Documentaire

**Nous disposons désormais de nombreux documents pertinents sur l'impact au plan national de l'utilisation du bois en tant que combustible, entre autres références bibliographiques :**

- S .Collet Rapport INERIS « Mesure à l'émission de chaudières à bois utilisant comme combustible du bois naturel » 1995
- Etude ADEME/LERMAB, « Mise en œuvre d'un indice de performance global des appareils de chauffage au bois », 2008
- Y. Rogaume « La combustion du bois », Pollution atmosphérique, numéro spécial bois, 2009
- CITEPA, « inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France », 2009
- MSI Reports, Marché des Poêles, Foyers Fermés et Inserts en France 2015
- Etude ADEME / Bio Intelligence Service « Bilan environnemental du chauffage domestique au bois », 2005
- Document récent (Janvier 2014) du service Bioressource de l'ADEME : Chauffage domestique au bois.
- Avis de l'ADEME Bois énergie et qualité de l'air (Nov 2013).
- Documents en provenance du BIP : Bioressources, Industries et Performances (performance énergétique).
- De nombreuses études scientifiques SBIO sur la qualité de l'air (35 études contractuelles recensées).
- Colloque « biomasse : énergies nouvelles et renouvelables, un élément clé au service d'une croissance durable » Lermab – Université de Lorraine 28-29 Mars 2013
- Y. Rogaume Combustion de la Biomasse : Place, procédés et enjeux.  
Colloque « biomasse : énergies nouvelles et renouvelables, un élément clé au service d'une croissance durable » Lermab-Université de Lorraine 28-29 Mars 2013
- Y.Rogaume, « La combustion des granulés de bois », colloque SNPGB, Paris, 2009