

Le bois-énergie dans le secteur domestique



Jean-Pierre SAWERYSYN

Professeur honoraire de Lille 1,

Vice-président du comité régional APPA du Nord-Pas de Calais

DREAL, 24 juin 2014

- **Le bois-énergie en France : Intérêts, prix et utilisations.**
- **Le bois et ses caractéristiques physico-chimiques et de combustion.**
- **Nature des composés émis par**
 - **une combustion « idéale »**
 - **une combustion incomplète.**
- **Impacts environnementaux.**
- **Contribution à la pollution intérieure.**
- **Impacts sanitaires potentiels. Valeurs guides.**
- **Moyens pour réduire les émissions de polluants.**
- **Conclusion.**

Regain d'intérêts pour trois raisons essentielles :

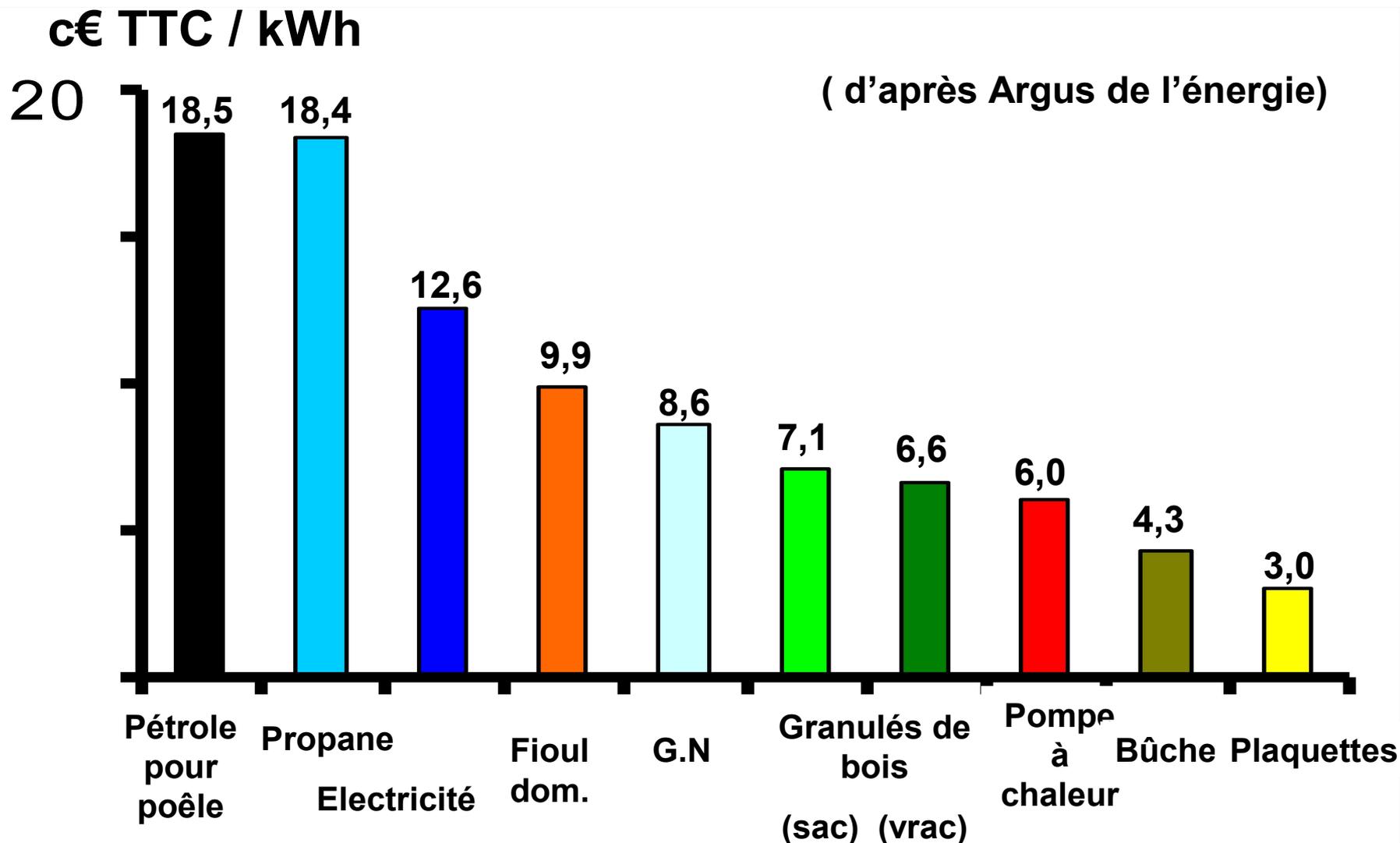
- **économique** (bon marché, non indexé sur le cours des monnaies et du baril de pétrole),
- **écologique** (source d'énergie renouvelable, permet de lutter efficacement contre le changement climatique en réduisant les émissions de GES),
- **sociale** (ressource locale favorisant le développement d'activités créatrices d'emplois en zone rurale).

Consommation en France: ~ 40 millions de m³/an (9,3 Mtep)

Gisements 2006-2020: 71 Mm³/an de BIBE dont 46,1 exploitables actuellement. (Evaluation 2008-2009 -ADEME : www.dispo-boisenergie.fr)

Le bois-énergie en France (2)

Prix de l'énergie observés en avril 2013 pour les ménages



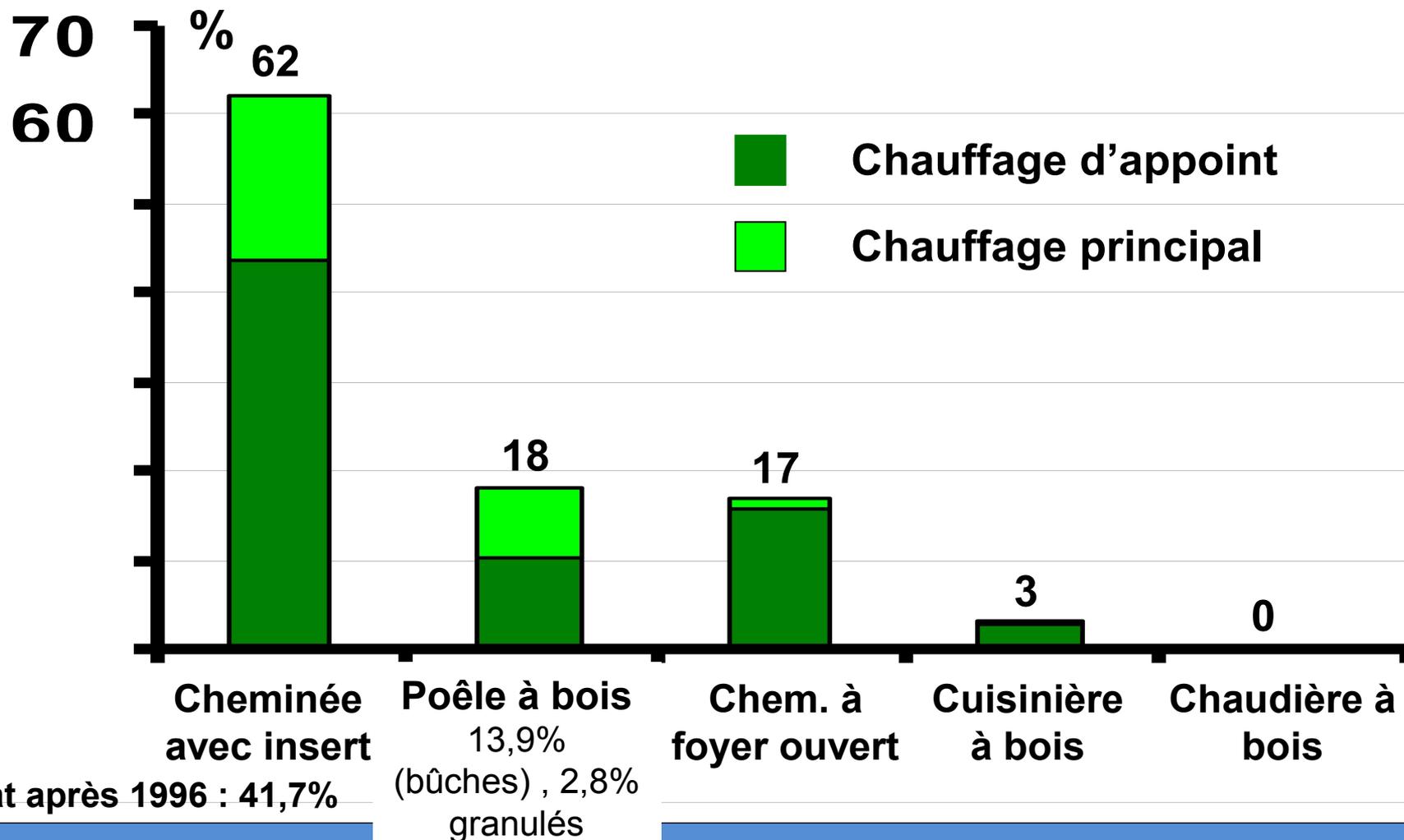
Utilisations : chaleur (majoritairement), électricité ou les deux (cogénération).

Secteurs :

- **domestique** (> 80% de la filière, évolution du chauffage d'appoint et d'agrément vers le chauffage principal),
- **industriel** (chaleur et électricité, valorisation des co-produits des entreprises du bois),
- **collectif /tertiaire**, avec ou sans réseau de chaleur, habitat (résidences, HLM) et tertiaire (bureaux, écoles, hôpitaux, bâtiments administratifs, ..),
- **agricole** (serres maraîchères et horticoles).

Utilisations du bois de chauffage dans le Nord-Pas de Calais (4)

(d'après « Etude du chauffage dans la région Nord-Pas de Calais pour la DREAL» Basic-Avril 2012)



- Facteurs extérieurs : conditions météorologiques (périodes hivernales anticycloniques, absence de vent, ..)
- Facteurs liés aux installations de chauffage:
 - Concept et dimensionnement de l'installation (nature et proportions différentes des effluents gazeux et particulaires),
 - Caractéristiques et origine du bois ,
 - Interactions entre l'appareil utilisé, le combustible et l'air.

- Composition moléculaire :**
- cellulose (~ 50%)
 - lignine (20-30%)
 - hémicellulose (15-25%)
 - éléments minéraux (< 1%)

Composition élémentaire :

	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

S % ~ 0,02%

Cl % ~ 0,001 – 0,03%

**Zn, Pb, Cr,
100 ppm**

Composition élémentaire moyenne : C% =50 ; H%=6 et O%=44

- Trois types d'eau :
- eau libre (sans retrait du bois lors de l'évaporation)
 - eau liée, piégée dans la structure du bois (retrait)
 - eau de constitution, libérée par combustion.

Taux d'humidité sur brut E% : **15 à 60 %**

- sur pied (bois vert) : $\leq 60\%$
- séché à l'air pendant 1 à 2 ans : 15 à 20 %
- séché sous flux d'air chaud (1 à 3 sem.) : $\leq 10\%$

- **Le bois brûle d'autant mieux qu'il est sec.**
- La 1^{ère} phase de la combustion correspond à l'évaporation de l'eau (processus endothermique)

PCI : Quantité de chaleur libérée par la combustion complète du combustible, l'eau étant à l'état vapeur;

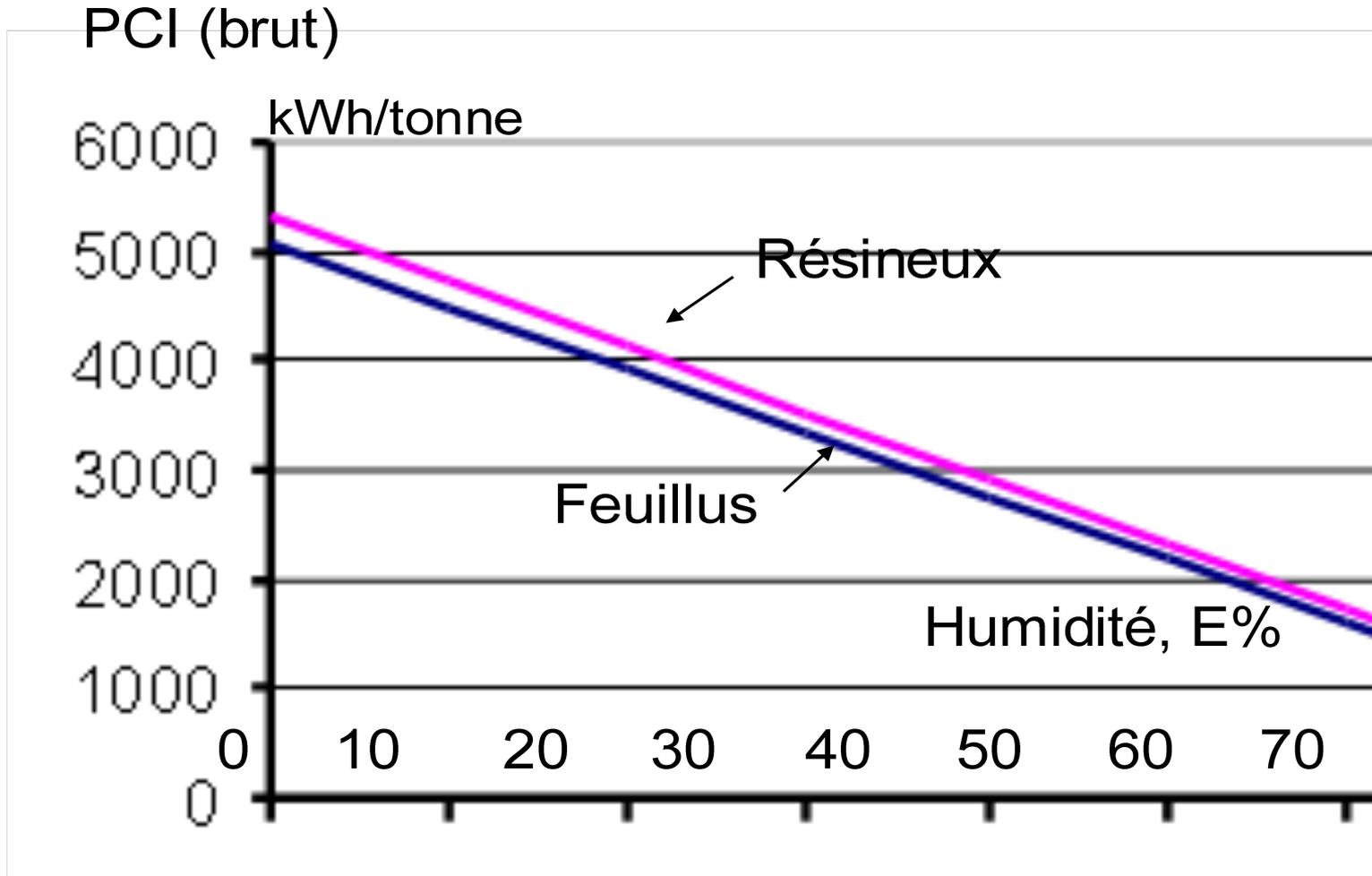
PCS : Quantité de chaleur libérée par la combustion complète du combustible, l'eau étant condensée à l'état liquide.

Unités : kJ / kg ou kWh / kg

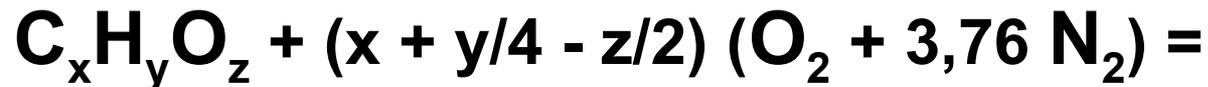
PCI (moyen sur « sec ») : 5,1 kWh/kg (Feuillus) ; 5,3 kWh/kg (Résineux)

Combustible	PCI (kWh/kg)
Bois brut	2 – 5
Charbon (coke)	8
Fioul	12
Gaz naturel	17

Influence de l'humidité sur le PCI



Equation de combustion complète du bois :



Combustion dite neutre : stoechiométrique, sans défaut
ni excès d'air

Pouvoir comburivore V_a : volume d'air théorique nécessaire à la combustion neutre (complète, sans défaut ni excès d'air) de 1 kg de bois parfaitement sec dans les conditions dites normales (273 K, 101325 Pa).

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

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

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

Pouvoir fumigène sur fumées sèches : volume de fumées sèches libérées par la combustion neutre de 1kg de bois sec dans les conditions normales.

$$V_f = V_{CO_2} + 0,79 V_a \quad (= 4,546 \text{ Nm}^3/ \text{ kg de bois sec})$$

Pouvoir fumigène sur fumées humides : volume de fumées humides libérées par la combustion neutre de 1kg de bois brut dans les conditions normales.

$$V_f = V_f + V_{H_2O} + V_{\text{humidité}} \quad (= 5,130 \text{ Nm}^3/ \text{ kg de bois brut})$$

En principe, la combustion complète d'un bois sain et parfaitement sec n'émet que les produits résultant de l'oxydation de ses éléments, à savoir :

- **comme produits gazeux** : CO_2 , H_2O , NO_x , (SO_2)
- **comme particules** : **particules minérales** .

Un équipement même performant n'est pas exempt du risque de combustion incomplète, qui est la principale cause génératrice de polluants gazeux et particulaires.

Plusieurs facteurs peuvent induire une combustion incomplète du bois :

1- au niveau du combustible :

- le taux d'humidité du bois,
- la granulométrie (bûches, plaquettes, granulés ..),
- l'origine (type d'essence, bois altéré ou souillé, ..).

2- au niveau de la combustion :

- l'allure de fonctionnement du foyer (démarrage, en régime, ..),
- l'alimentation en air,
- la charge en combustible.

Les rendements thermiques observés pour les différents types d'installation

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

(d'après ADEME , 2009)

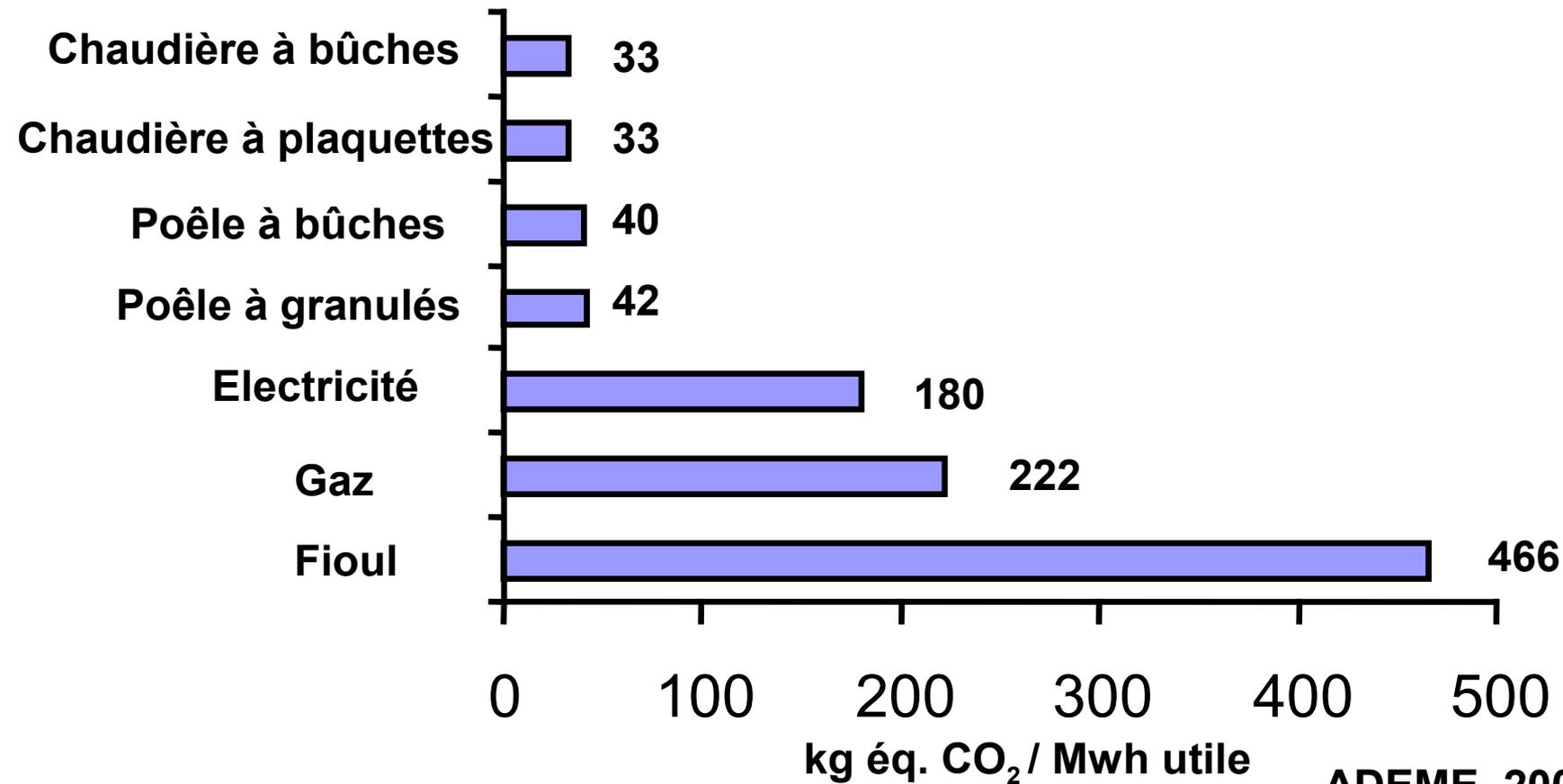
1) CO, N₂O, CH₄, COVNM, HAP, polluants spécifiques (lévoglucosan et méthoxyphénols), particules de suie.
formés par combustion incomplète du bois.

Principales causes : mauvais réglage ou mauvais entretien de l'installation, installation inadaptée, installation ancienne, et/ou utilisation d'un bois trop humide.

2) Polluants additionnels : SO₂, poussières minérales et/ou mixtes, dioxines/furanes ...

Cause : utilisation de bois de mauvaise qualité (bois souillé, altéré ou traité).

- Changement climatique : CH₄ , N₂O (et CO₂) comme GES



ADEME, 2005,2006

- **Pollution atmosphérique primaire : CO, SO₂, NO_x, COVNM dont benzène , HAP et PARTICULES FINES**

Taille : très variable (PM₁₀, PM_{2,5} , PM₁, PM_{0,1}...)

Composition : Fraction minérale (oxydes et sels métalliques)

Fraction organique (suie, HAP, PCDD/PCDF, ...)

- **Pollution atmosphérique secondaire : O₃ , photo-oxydant formé à partir de CO, COVNM et NO_x**

Contributions aux émissions atmosphériques à l'échelle nationale (1)

Contributions (% massiques) par rapport à celles des autres types de combustible pour 2009

	SO ₂	NO _x	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

(Données CITEPA , 2011)

Contributions aux émissions atmosphériques à l'échelle nationale (2)

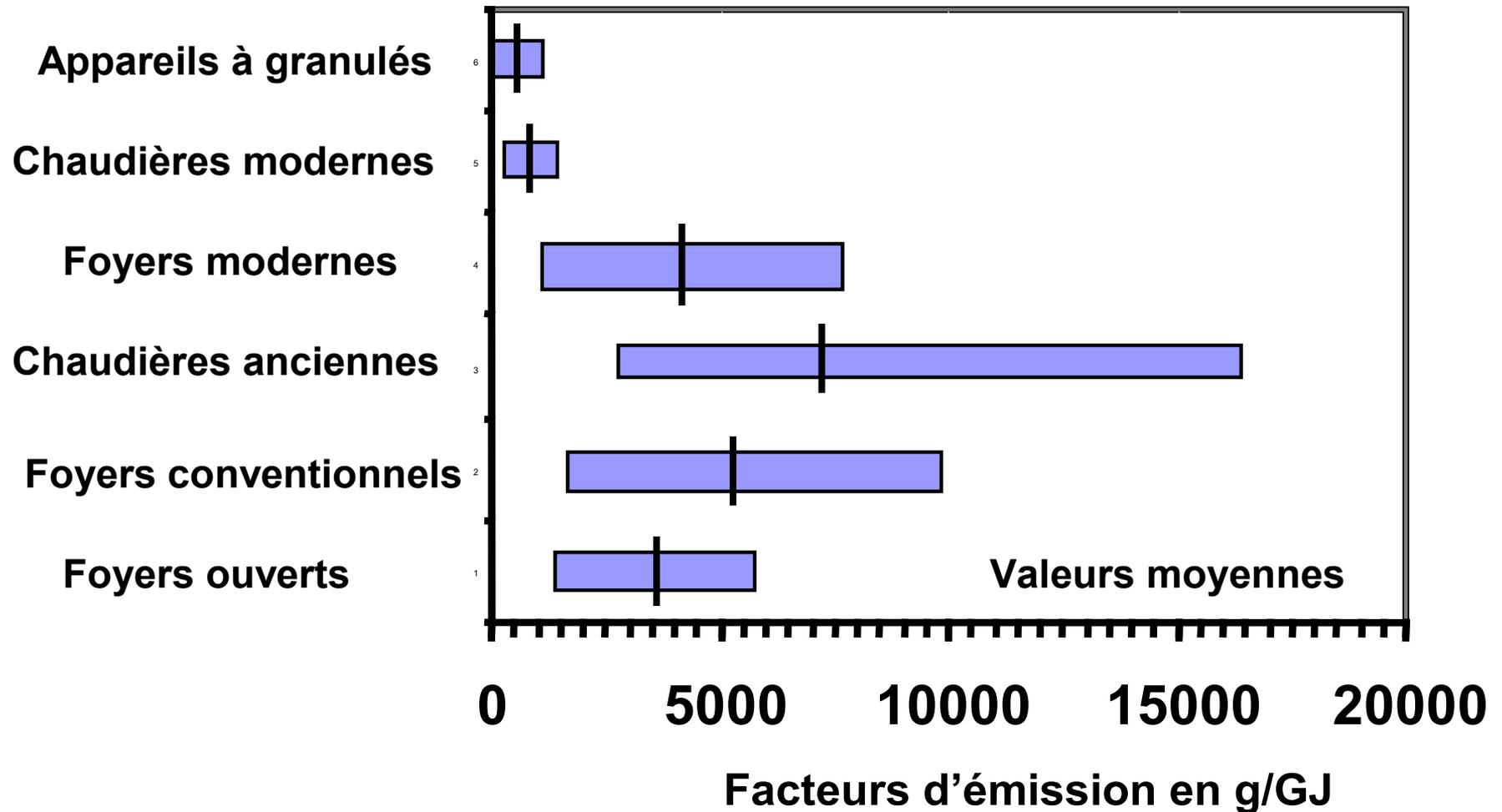
Contributions du bois énergie dans différents secteurs d'utilisation par rapport aux émissions nationales

	SO ₂ kt	NO _x kt	CO kt	COVNM kt	HAP* t	Dioxines gITEQ	PM ₁₀ kt	PM _{2,5} kt
Secteur domestique % du total bois	6,4	19,2	1704,4	303,9	19,1	21,9	131,3	128,6
	82 %	69 %	98 %	99%	98 %	91 %	97 %	97 %
Secteurs collectif, industriel et agricole % du total bois	1,4	8,7	35,3	2,9	0,3	2,1	4,1	3,5
	18 %	31 %	2 %	1 %	2 %	9%	3 %	3 %
% du total national	2 %	2 %	31 %	22 %	77 %	11 %	27 %	40 %

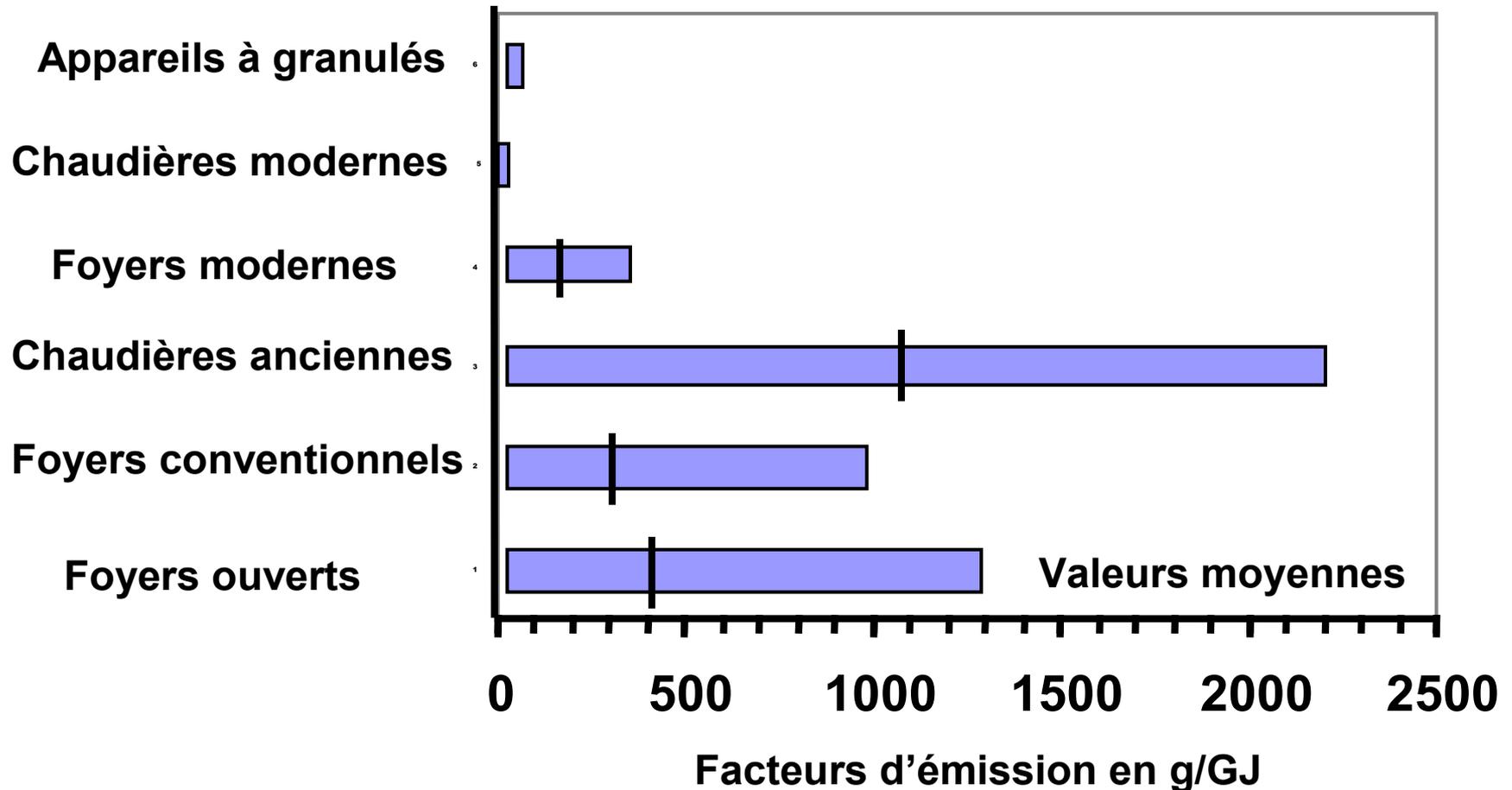
Source : le bois-énergie et la qualité de l'air, ADEME 2009

CO émis par différents appareils

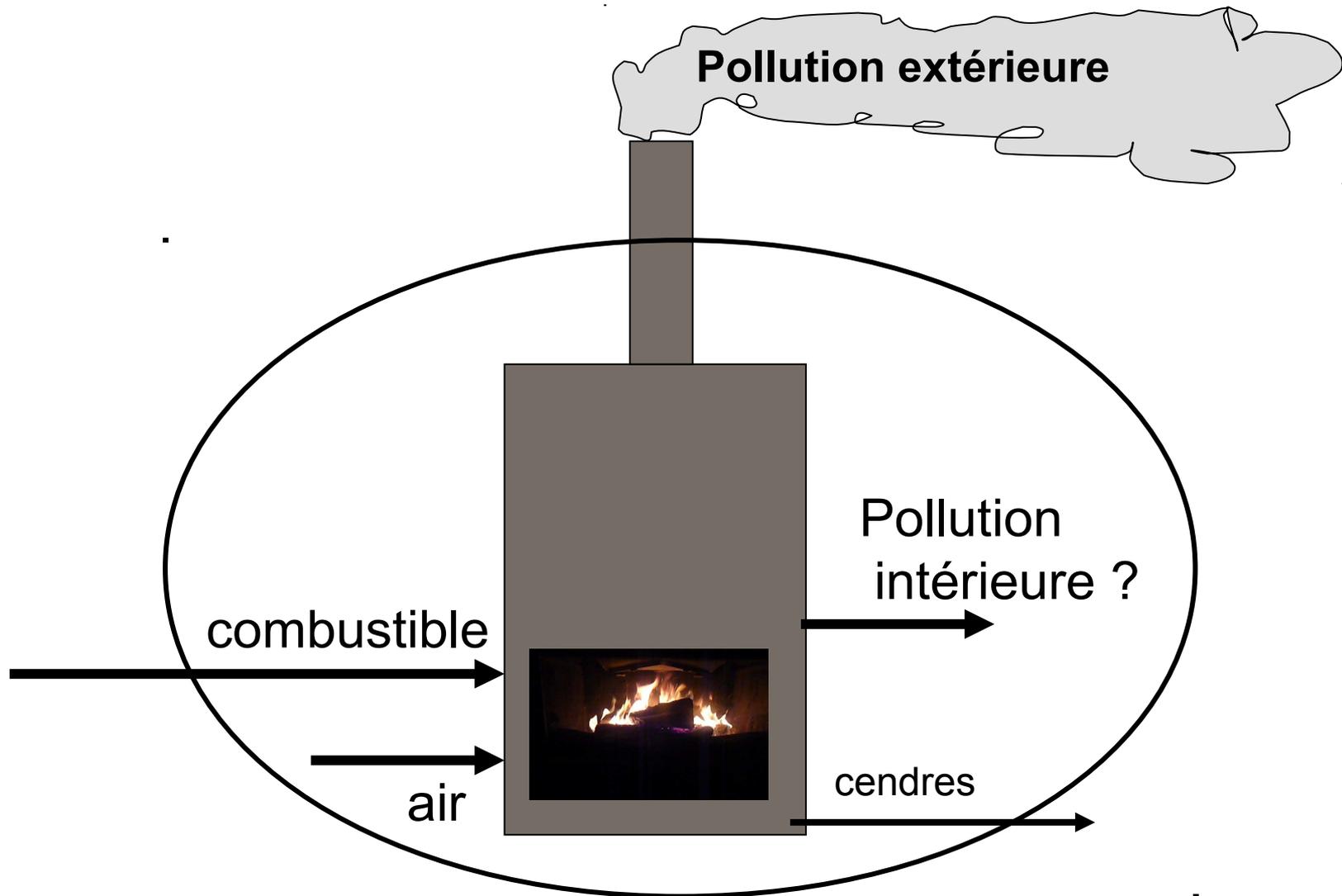
Emissions rapportées en unité d'énergie entrante (d'après Collet, 2009)



Emissions rapportées en unité d'énergie entrante (d'après Collet, 2009)



Contribution à la pollution de l'air intérieur (1)



Exposition directe aux polluants gazeux et particulaires émis dans le cas de feux ouverts ou de fourneaux utilisés sans évacuation pour le chauffage et la cuisson des aliments.

Personnes concernées : principalement, les femmes et les enfants en bas âge. _

La qualité de l'air intérieur des habitations peut être altérée si l'installation comporte des fuites. Ces fuites sont plus ou moins importantes selon :

- le type, l'âge et la qualité de l'entretien de l'appareil utilisé,
- la qualité de l'installation,
- la qualité du système d'évacuation des gaz et des particules,
- les modes d'utilisation de l'appareil.

1) Evaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique au bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur.

Rapport final d'étude du 21 octobre 2008. DRC-08-70801-15219A **INERIS et LCME (Université de Savoie)**

Conditions : Hiver 2006-07, zone rurale, essais sur 8 h dans 6 habitations

Appareils : 2 foyers ouverts, 1 poêle ancien, 1 poêle récent, 1 foyer fermé ancien, 1 foyer fermé récent.

Composés analysés : acétaldéhyde et CH_2O , COV, C_6H_6 , NO_2 , CO, $\text{PM}_{2,5}$, HAP_{tot} , HAP_{part} , B(a)P et lévoglucosan.

Principaux résultats : sur l'air intérieur, influence variable selon les composés : mineure pour NO_2 et CO, notable pour les particules et majeure pour le benzène et les HAP. Lévoglucosan : traceur spécifique majoritaire.

2) Campagne de mesures de la qualité de l'air intérieur dans des logements alsaciens se chauffant au bois. Source d'information ASPA

12062901-ID

Conditions : Hiver 2012, zone rurale, essais sur 7 jours dans 7 logements.

Appareils : 3 inserts anciens, 3 poêles anciens, 1 poêle récent,

Composés analysés : aldéhydes, 35 COV (terpènes, esters, alcools, éthers, éthers de glycol, composés chlorés, BTEX, hydrocarbures) NO₂, CO, PM_{2,5}, HAP_{tot}, HAP_{part} (B(a)P), et lévoglucosan.

Principaux résultats:

- pas d'influence dominante du bois sur la qualité de l'air intérieur pour les COV, NO₂, PM_{2,5} et les HAP.
- Investigations complémentaires nécessaires pour certains logements
- présence de lévoglucosan en milieux intérieur et extérieur;

1) COVNM : formaldéhyde (cancérogène humain avéré gpe 1, CIRC 2004)

V L en exposition longue : 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 1/1/2015

10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 1/1/2023

et benzène, (cancérogène humain avéré gpe 1, CIRC 1987)

V L en exposition longue : 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 1/1/2015

2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 1/1/2023

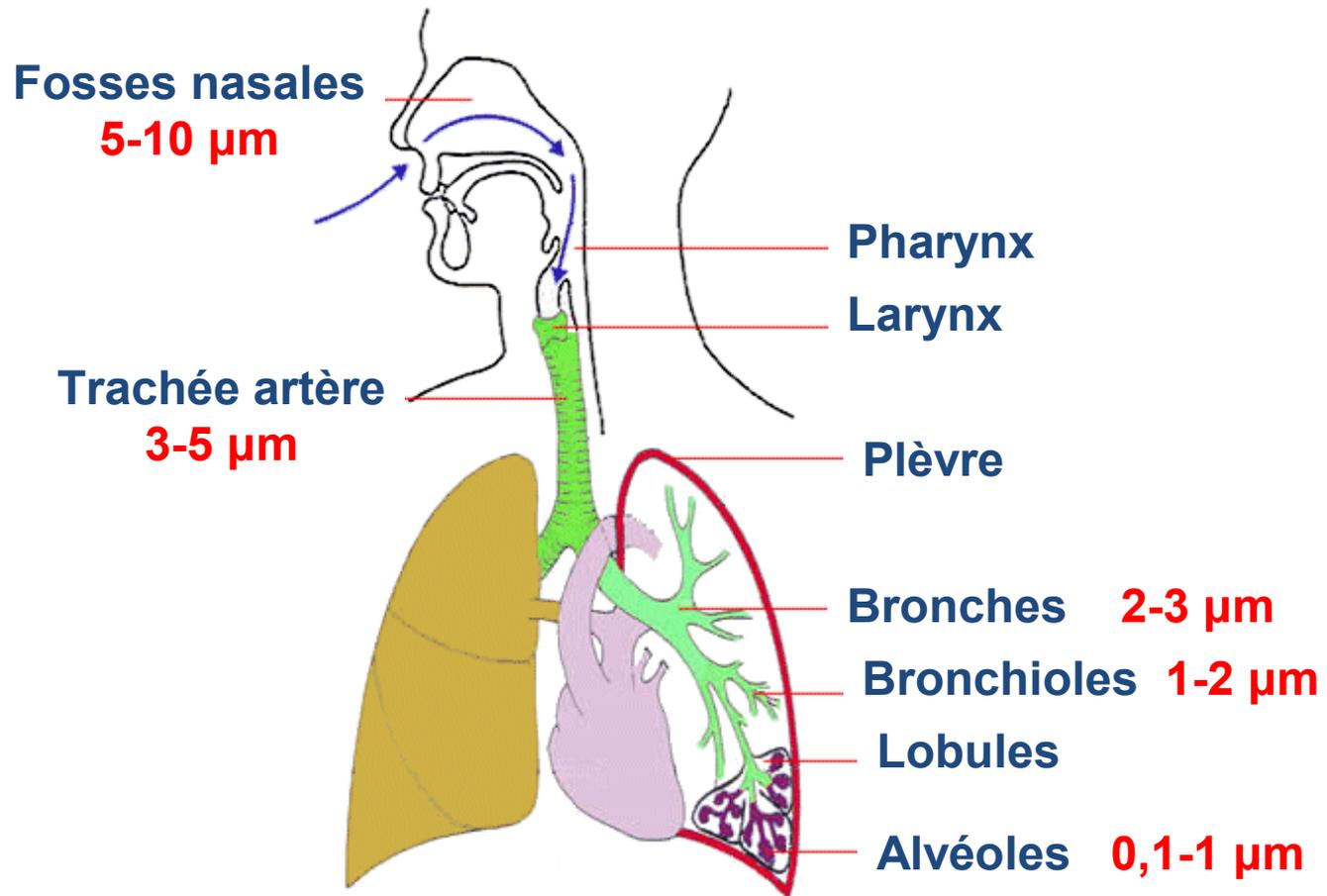
(décret n° 2011-1727 du 2/12/2011)

2) Les PARTICULES FINES ET ULTRAFINES, dont la nocivité pour la santé humaine dépend de la taille et de la composition.

PM_{2,5} : VGAI(OMS) : 25 mg/m^3 sur 24 h

50 mg/m^3 sur long terme.

- **Impacts dus à la taille** : aggravation de l'asthme, maladies respiratoires, stress cardio-vasculaire,



- **Impacts liés à la composition :**

- **risques cancérogènes** dus à la forte présence de HAP, et éventuellement de dioxines.

8 HAP à surveiller :

4 HAP (Directive 2004/107/CE) : **benzo(a)pyrène (cancérogène, V.C :1 ng / m³)**, (benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène et indéno(1,2,3,-cd) pyrène

4 HAP (Arrêté du 2 février 2008) : benzo(a)anthracène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène (g).

1) Réduction de la formation des polluants à la source par :

- l'emploi d'appareils plus performants (rendement élevé, meilleure conception de l'appareil, ..). Label « Flamme verte ».5 étoiles.
- INTERDICTION d'installer des cheminées à foyer ouvert dans les habitats neufs ou en rénovation (Réglementation),

Depuis 2007, seuls les chauffages au bois d'appoint et d'agrément étaient autorisés à Paris. A partir du 1^{er} janvier 2015,

- A Paris, la combustion du bois sera totalement interdite, sauf dérogation pour les appareils émettant moins de 20 mg/m³ .

- En Ile-de-France, seuls les foyers ouverts seront interdits.

- Renouvellement incitatif des anciennes installations.
- Construction et rénovation des habitats permettant de réduire les besoins en chaleur.

2) Traitement des fumées en sortie par :

- l'installation, sur conduit, de techniques d'épuration des fumées telles que :
 - séparateur de poussières,
 - oxydation catalytique du CO et des hydrocarbures.

(L. Robert, Revue IFP, 2006).

LES ATOUTS

Le bois-énergie présente deux atouts incontestables :

- c'est une source d'énergie nationale et renouvelable, dont les gisements sont potentiellement abondants en France ,
- en se substituant aux énergies fossiles, il participe à la réduction des gaz à effet de serre.

Il devrait contribuer de façon significative à la réalisation des objectifs visés dans les lois Grenelle 1 et 2.

LES FAIBLESSES

En cas de **combustion incomplète** et/ou de l'emploi de **bois de mauvaise qualité**, le bois-énergie est une source importante de polluants gazeux (CO, COVNM, NOx, ...) et de particules fines et ultrafines atmosphériques, particulièrement nocives pour la santé humaine.

Sa contribution à la pollution intérieure dépend de la nature des composés formés, mais des études complémentaires s'avèrent nécessaires pour consolider les quelques résultats obtenus.

Merci pour votre attention !