



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Facteurs d'émission

**Emissions de dioxines, de furanes et d'autres polluants liées à
la combustion de bois naturels et adjuvantés**

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Serge COLLET

FEVRIER 2000

Emissions de dioxines et furanes et autres polluants liées à la combustion de bois naturels et adjuvantés

Ministère de l'Environnement

Ce document comporte 68 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	COLLET Serge	PERRET Rémi	NOMINE Michel
Qualité	Ingénieur unité « Maîtrise de la pollution atmosphérique »	Responsable de l'unité « Maîtrise de la pollution atmosphérique »	Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

1	LE BOIS, GENERALITES ET CARACTERISTIQUES	6
1.1	GÉNÉRALITÉS	6
1.2	STRUCTURE	6
1.3	COMPOSITION CHIMIQUE	7
2	LA RESSOURCE	9
2.1	LE BOIS DE COUPE	9
2.2	LES DÉCHETS DE FABRICATION DE L'INDUSTRIE DU BOIS	9
2.2.1	<i>La première transformation</i>	9
2.2.2	<i>La seconde transformation</i>	11
2.3	LES DÉCHETS DE DÉMOLITION OU DE CHANTIER	12
2.4	LES DÉCHETS EN FIN DE VIE	13
2.4.1	<i>Les emballages</i>	13
2.4.2	<i>Bois fortement adjuvantés employés en extérieur</i>	13
2.5	GISEMENT	14
3	LES ADJUVANTS	17
3.1	LES RESINES OU COLLES	17
3.2	LES PRODUITS DE PRÉSERVATION DU BOIS	18
3.3	LES PRODUITS IGNIFUGES	19
3.4	LES PRODUITS DE REVÊTEMENT DES BOIS	20
3.5	DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES	21
3.5.1	<i>Teneur en PCP des palettes</i>	21
3.5.2	<i>Teneur en lindane et PCP de divers déchets</i>	21
3.5.3	<i>Teneurs en métaux lourds de divers déchets</i>	23
3.5.4	<i>Commentaires</i>	25
4	COMBUSTION DU BOIS	26
4.1	LES DIFFÉRENTES PHASES	26
4.2	LES DIFFÉRENTS COMPORTEMENTS	27
4.2.1	<i>Comportement en milieu confiné</i>	27
4.2.2	<i>Comportement à l'air libre</i>	27
4.3	FACTEURS AFFECTANT LA COMBUSTION	27
4.4	QUALITE DE LA COMBUSTION	29
4.5	CHAUDIÈRES	29
4.5.1	<i>Chaudières industrielles</i>	29
4.5.2	<i>Foyers domestiques</i>	30
5	EMISSIONS DE POLLUANTS	31
5.1	CHAUDIÈRES INDUSTRIELLES	31
5.1.1	<i>Essais de combustion de bois naturels</i>	32
5.1.2	<i>Essais de combustion de bois adjuvantés</i>	37
5.2	FOYERS DOMESTIQUES	47
5.2.1	<i>Analyse des suies et des cendres</i>	47
5.2.2	<i>Mesures à l'émission</i>	48
6	SYNTHESE DES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	54
6.1	CHAUDIÈRES A BOIS INDUSTRIELLES	54
6.2	FOYERS DOMESTIQUES	55
7	COMMENTAIRES GENERAUX RELATIFS	62
7.1	A LA COMBUSTION DU BOIS NATUREL	62
7.2	A LA COMBUSTION DE DECHETS DE BOIS	62

7.2.1	<i>Approche générale</i>	62
7.2.2	<i>Approche en fonction du type de déchets de bois</i>	63
7.2.3	<i>Perspectives</i>	66

Liste des tableaux

- Tableau n°1 : composition moyenne du bois
- Tableau n°2 : composition chimique de différentes essences de bois sec
- Tableau n°3 : caractéristique de quelques déchets de bois
- Tableau n°4 : gisement de déchets en France
- Tableau n°5 : données d'émission aux Etats Unis – résultats moyens par type de foyers
- Tableau n°6 : émissions de métaux lourds en fonction de la teneur en poussières
- Tableau n°7 : estimation de l'efficacité d'épuration des métaux lourds
- Tableau n°8 : émissions de dioxines lors de la combustion de bois naturel en chaudière industrielle
- Tableau n°9 : mesures à l'émission de deux chaudières industrielles à différentes charges
- Tableau n°10 : mesures de dioxines et furanes lors de la combustion de palettes
- Tableau n°11 : teneurs en polluants émis lors de la combustion de bois imprégnés
- Tableau n°12 : émissions de dioxines lors de la combustion de panneaux de particules
- Tableau n°13 : résultats de mesures de CO, NO_x et HCl lors de la combustion de panneaux de particules sur unité pilote
- Tableau n°14 : résultats de mesures de CO et NO_x lors de la combustion de panneaux sur chaudière industrielle
- Tableau n°15 : mesure de polluants émis par une chaudière alimentée en copeaux de panneaux de particules
- Tableau n°16 : teneurs en dioxines et furanes lors de la combustion de copeaux de bois de démolition de bâtiment
- Tableau n°17 : émissions liées à la combustion de traverses de chemin de fer
- Tableau n°18 : émissions liées à la combustion mixte bois/ordures ménagères
- Tableau n°19 : teneurs en dioxines et furanes à l'émission de foyers domestiques alimentés en bois naturel et combustibles spéciaux
- Tableau n°20 : mesure à l'émission d'un poêle à bois à différentes charges
- Tableau n°21 : mesure à l'émission de deux cheminées
- Tableau n°22 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées en bois naturel
- Tableau n°23 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées avec des bois traités
- Tableau n°24 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées avec des résidus provenant de l'industrie de fabrication de panneaux
- Tableau n°25 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées en déchets de bois provenant de l'industrie de l'ameublement et de démolition de bâtiment
- Tableau n°26 : données d'émission relatives aux foyers domestiques
- Tableau n°27 : données d'émission de divers polluants

Liste des figures

Figure n°1 : les différents types de panneaux

Figure n°2 : teneurs en lindane de divers échantillons de bois

Figure n°3 : teneurs en PCP de divers échantillons de bois

Figure n°4 : teneurs en métaux lourds de 62 échantillons de déchets de bois

Figure n°5 : teneurs en Ba et Zn des échantillons en fonction de leur âge

Figure n°6 : combustion du bois

Figure n°7 : distribution des émissions de particules en fonction du dispositif d'épuration des poussières installé

Figure n°8 : teneurs en particules mesurées à l'émission d'unités à chargement manuel et automatique

Figure n°9 : concentrations en dioxines et furanes dans des suies de foyers domestiques alimentés avec divers déchets de bois contenant du chlore

Figure n°10 : concentration en dioxines et furanes à l'émission de poêles à bois

Figure n°11 : concentration en COVT à l'émission de poêle à bois

Figure n°12 : émissions de HAP en fonction de l'essence et de l'humidité du bois

Figure n°13 : émissions de PCDD/F en fonction de l'essence et de l'humidité du bois

Ce rapport porte essentiellement sur les rejets en dioxines et furanes liés à la combustion du bois en chaudières industrielles et en foyers domestiques. Toutefois dès que des données intéressantes concernant d'autres polluants, notamment les NO_x, les composés organiques volatils totaux (COVT), les COV chlorés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les métaux lourds, ont été obtenues, elles ont été intégrés dans les tableaux et figures de ce compte rendu.

L'objectif est d'identifier la stratégie environnementale qui devrait permettre de brûler des résidus de bois pour produire de l'énergie d'une manière acceptable. Pour cela il convient de connaître les conséquences environnementales de cette pratique en fonction de chaque type de ressource disponible. Pour chaque type de résidus la connaissance de ses caractéristiques physiques et chimiques (teneurs en polluants notamment) est nécessaire afin de rechercher les meilleures technologies, les systèmes de captation des fumées adaptés, afin d'obtenir des rejets acceptables.

Ce rapport est constitué de sept chapitres : tout d'abord sont présentées quelques généralités sur le bois, puis les ressources de bois et déchets de bois disponibles pour une valorisation énergétique, les adjuvants employés sur certains matériaux, la combustion et les différents facteurs pouvant l'influencer, avant d'aborder les émissions de polluants générées par la combustion du bois, de synthétiser les données bibliographiques et de formuler quelques commentaires sur la combustion de déchets de bois.

1 LE BOIS, GENERALITES ET CARACTERISTIQUES

1.1 GENERALITES

L'utilisation du bois comme combustible remonte aux époques préhistoriques; c'est grâce aux bois des forêts que l'homme a pu se développer en découvrant et en utilisant le feu. Il lui a permis de vivre et de prospérer. Avant que ne vienne l'époque de l'aire industrielle, le bois était le seul combustible pour le chauffage, remplacé peu à peu par le charbon et le gaz naturel.

De nos jours, le bois est encore le matériau de construction le plus polyvalent. Il peut être transformé en des formes distinctes sans altérer ses caractéristiques chimiques et physiques. Il est léger, durable, flexible, élastique, et possède une certaine beauté intrinsèque. Grâce à ses caractéristiques, le bois reste un matériau très employé dans le domaine de la construction.

En France, les essences les plus couramment employés sont d'origine indigène ou importées de Scandinavie, d'Amérique du Nord et de régions tropicales. Elles se répartissent en deux grandes familles : les résineux (sapins, épicéas, pin d'Orégon, etc.) et les feuillus (chêne, châtaignier, hêtre, noyer, merisier, peuplier, etc.).

1.2 STRUCTURE

Le bois possède une structure complexe et variable en fonction des essences.

Tout d'abord, on observe une différence nette entre l'écorce et le bois lui-même. Celui-ci est constitué par l'aubier, partie périphérique du tronc située sous l'écorce où circule la sève, et le bois de cœur ou duramen.

Le bois massif se présente comme un matériau poreux, anisotrope et comportant des irrégularités de structure.

Le tronc s'accroît, en diamètre, en formant de nouvelles couches ou cernes qui correspondent à une croissance d'un an. L'évolution du bois se fait selon trois directions : longitudinale (fil du bois), tangentielle et perpendiculaire aux cernes.

Comme tout matériau vivant, le bois est constitué de cellules, qui meurent lorsqu'elles sont rejetées vers l'intérieur du tronc lors de sa croissance. Elles peuvent alors absorber de l'eau ou se remplir d'air.

Outre l'eau de constitution, de l'eau dite libre est également présente, car le bois est hygroscopique. Il absorbe ou restitue de l'eau suivant la température et l'humidité de l'air ambiant. Un bois dit humide peut contenir en poids jusqu'à 50% d'eau, un bois dit sec ne dépassera pas 12 % d'eau.

1.3 COMPOSITION CHIMIQUE

La cellulose (C₅H₁₀O₅)_x, x variant entre 1000 et 10000, est le constituant principal du bois. Le bois est ensuite constitué de lignine, d'hémicellulose, de protéines, de résines, de tanins, de colorants, etc.

Cellulose	50 %
Lignine	25 %
Hémicellulose	15 %
Produits solubles	5 %
Minéraux	< 1 %

Tableau n°1 : Composition moyenne du bois

	C%	H%	O%	N%	Cendres
Hêtre	49.06	6.11	44.17	0.09	0.57
Bouleau	48.88	6.06	44.67	0.10	0.29
Frêne	49.18	6.27	43.19	0.07	0.57
Peuplier	49.37	6.21	41.60	0.96	1.86
Pin	50.31	6.20	43.08	0.04	0.37
Orme	48.99	6.20	44.25	0.06	0.50
Sapin	52.30	6.30	40.50	0.10	0.80
Chêne	50.16	6.02	43.26	0.09	0.37

Tableau n°2 : Composition chimique de différentes essences de bois sec

En conséquence, la masse majoritaire d'un échantillon de bois sec est essentiellement constituée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'un faible pourcentage de composés azotés (0.04 à 0.96% sur sec) provenant des protéines et de quelques éléments minéraux présents en très faible quantité. Par comparaison aux autres combustibles solides, le bois contient de faibles quantités de composés soufrés (0.02%). Du chlore est présent en quantité extrêmement faible (0.001 à 0.03%). Des éléments traces tels que cuivre, manganèse et zinc sont également présents à des teneurs inférieures à 100 ppm.

2 LA RESSOURCE

Ce chapitre décrit les différents types de matériaux potentiellement disponibles pour une utilisation en tant que combustible.

Parmi ces matériaux, on rencontre différentes catégories : les bois de coupe, les déchets de fabrication de l'industrie du bois, les déchets de démolition ou de rénovation et les déchets en fin de vie.

2.1 LE BOIS DE COUPE

Rondins et plaquettes issues du déchiquetage des rondins sur le lieu de coupe lorsque ceux-ci sont de faibles dimensions, provenant d'abattages, de coupes d'éclaircies et des houppiers des arbres, etc., sont commercialisés pour la fabrication de pâte à papier ou pour approvisionner une unité de chauffage. Cette vente permet d'abaisser le prix de revient des débroussaillages.

2.2 LES DECHETS DE FABRICATION DE L'INDUSTRIE DU BOIS

Toute l'industrie du bois de première et de seconde transformation produit des déchets qu'il est nécessaire d'éliminer.

Cette industrie comprend des activités diverses, de premières transformations qui consistent en la fabrication de produits semi-finis (panneaux de particules et de fibres, contreplaqués, placages) employés dans la deuxième transformation qui fabrique les produits finis (menuiseries, charpentes, meubles) dont le bâtiment est le principal débouché.

Ces déchets sont aisément valorisables, leur approvisionnement est régulier et connu. Leur emploi en tant que bois de chauffage directement sur le lieu de production pour le chauffage des locaux ou produire l'énergie nécessaire au procédé (unité de séchage notamment) ou la revente des produits les plus nobles sont des opérations courantes.

2.2.1 La première transformation

2.2.1.1 Les scieries

Cette activité consiste à débiter les billes de bois en produits (planches, poutres, plateaux, etc.) qui approvisionnent l'ensemble de l'industrie du bois. Elle est fortement génératrice de déchets (écorces, dosses, délignures, sciures, chutes diverses).

Ces résidus sont peu ou pas adjuvantés. Seuls des traitements en forêt ou des traitements temporaires pour protéger les grumes sur leur lieu de stockage avant leur emploi ont parfois été effectués.

Les résidus les plus nobles : dosses et délignures, prélevés sur la périphérie de la grume sont en général commercialisés pour des destinations tels que les fabrications de pâte à papier et de panneaux de particules ou comme bois de chauffage.

Les autres résidus : sciures, écorces, copeaux, etc., présentent des caractéristiques de combustion différentes des bois de chauffage et ne peuvent être brûlés que sur des chaudières de puissance suffisante équipées de matériel adapté (risques d'explosion de poussières pour les sciures, taux d'humidité élevé et présence de corps étrangers pour les écorces qui se sont incrustées lors de la manipulation de la grume nécessitant des chaudières à grille).

Ces déchets sont généralement utilisés par les scieurs dans leur unité de séchage du bois ou dans leur propre chaudière, car ils sont difficilement manipulables en l'état, du fait de leur taux d'humidité élevé. Pour être commercialisés, ces résidus nécessitent un compactage.

2.2.1.2 La fabrication de panneaux

Divers types et densités de panneaux peuvent être obtenues en utilisant différentes propriétés physiques du bois et en faisant varier le type et la quantité de résine employée (figure n°1). Cette activité est donc particulièrement consommatrice de colles. D'autres additifs (paraffines, etc.) peuvent également être employés afin d'accroître la résistance aux intempéries (teneur en poids sec < 1 %).

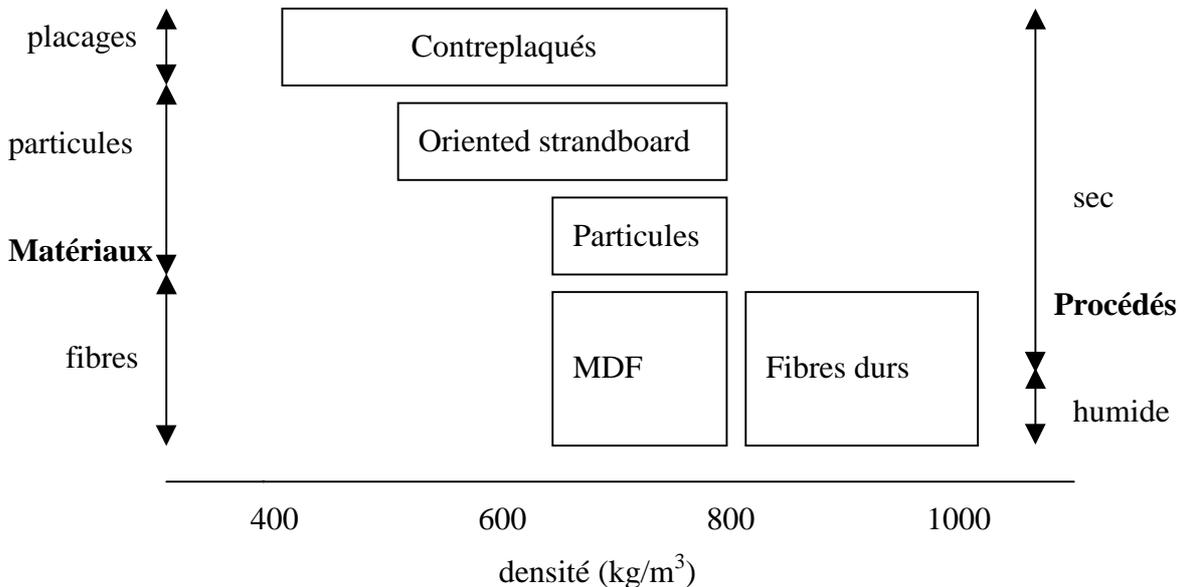


Figure n°1 : les différents types de panneaux

La fabrication des panneaux de particules permet un recyclage des résidus provenant essentiellement de scieries et de coupes de bois d'éclaircie. Ces déchets nécessitent d'être transformés en copeaux de l'ordre du centimètre ou d'une dizaine de centimètres pour les panneaux dits « oriented strandboard » (OSB) dont les copeaux sont orientés dans le sens du panneau.

Ces copeaux sont séchés avant d'être encollés au moyen d'une résine thermodurcissable qui polymérise à chaud (130°C environ) et sous pression. Les panneaux sont ensuite découpés et poncés. La teneur en colles des panneaux de particules varie entre 4 et 10 % en poids du matériau sec.

Pour un usage extérieur, la colle phénol-formol plus résistante aux intempéries offre les meilleures garanties. Différentes classes de panneaux ayant une tenue et une résistance aux intempéries variables en fonction des applications, intérieures et extérieures notamment, sont fabriquées. Leurs surfaces lisses se prêtent à une grande diversité de finition : peintures, vernis, revêtements avec divers matériaux tels que des placages fins, des feuilles plastiques, des papiers décoratifs, etc., encollés avec des colles vinyliques, acryliques ou « hot-melt » pour le collage des champs. Les déchets produits, 1 à 8 % de la matière première, contenant les colles, issus du découpage et du ponçage des panneaux sont broyés et recyclés en production.

- Les panneaux de fibres sont fabriqués à partir de bois défilé, réduit à l'état de pâte et pressé à chaud. Deux types de panneaux de densités différentes obtenus au moyen de deux procédés distincts peuvent être fabriqués : les panneaux de fibres dits durs (Isorel, marque de la société Isoroy) utilise le procédé humide sans liant (l'agglomération des fibres est obtenue par estérification de la lignine du bois) et des panneaux de moyenne densité (MDF, Medium Density Fiberboard) où les fibres sont pressées à sec avec un faible pourcentage de liant (résines phénoliques) et éventuellement d'autres additifs (hydrocarbures de poids moléculaires élevés à des teneurs < 3%) afin de rendre les fibres hydrophobes. Ce dernier procédé est largement prépondérant. L'aspect et la finition de ces panneaux (brut, poncé, habillé, etc.) diffèrent suivant leur destination (ameublement, cloisons, plafonds, etc.). La gamme des produits de revêtement est donc très large.

- Le procédé de fabrication des panneaux contreplaqués est différent des précédents. Les contreplaqués sont réalisés à partir de billes de bois étuvées, déroulées afin d'obtenir des placages, qui une fois séchés sont débités en feuilles de bois. Celles-ci sont assemblées entre-elles à fil croisé par encollage à l'aide de résine thermodurcissable et pressées à chaud (120 à 140°C). Les contreplaqués sont employés dans le bâtiment le plus fréquemment à usage intérieur, les principales colles sont les urée-formol, et plus rarement les phénol-formol ou mélamine-formol (MF) pour les contreplaqués d'usage extérieur (contreplaqués marine notamment). Ces panneaux contiennent entre 2 et 4% en poids de résines. Différentes essences de bois peuvent être employées, notamment des bois tropicaux. Les résidus de fabrication (poussières de ponçage, chutes diverses) et les rebuts de fabrication peuvent alimenter une chaudière.

L'industrie française des panneaux⁽¹⁵⁾ consomme 145 000 tonnes de sous-produits de fabrication (chutes, sciures, poussières de ponçage, etc.) à des fins énergétiques afin d'alimenter les chaudières qui fournissent l'énergie nécessaire aux séchoirs à copeaux et aux presses.

2.2.2 La seconde transformation

L'industrie de l'ameublement fait appel au bois massif ou à l'assemblage de pièces en bois massif contenant des colles à hauteur de 2% en poids environ, et aux produits semi-finis : placages, contreplaqués, panneaux de particules et de fibres.

Trois grands domaines d'emploi de colles peuvent être identifiés : le collage des placages fins sur bois ou panneaux, l'habillage et l'assemblage du meuble. Pour le premier domaine d'emploi, les colles vinyliques, urée-formol et « hot melt » pour le collage des champs sont utilisés. Le second domaine, l'habillage, consiste à recouvrir un panneau de produits décoratifs (papiers, films PVC, etc.), ces produits sont alors appelés des mélaminés ou stratifiés. Diverses colles peuvent être utilisées : vinyliques, urée-formol, néoprène, polyuréthanes, acryliques, etc. Cette opération est en général effectuée par les fabricants de panneaux. Enfin pour l'assemblage, les colles vinyliques et néoprène sont prépondérantes. Des vernis et des laques sont également employés lors de la finition.

L'industrie des charpentes utilise les produits de préservation du bois et des produits permettant une protection hydrofuge temporaire pour protéger le bois durant le montage en chantier. La charpente lamellée-collée, constituée de lames de résineux collées en fil parallèle, nécessite en supplément l'emploi de colles thermofusibles, phénol-résorcinol notamment, représentant 1% en poids environ.

La menuiserie fait également appel aux produits provenant de la première transformation du bois tels que les contreplaqués, les panneaux de fibres, etc., pour la réalisation de portes, de cloisons, de plafonds, etc. Tous ces matériaux sont encollés.

De nouveaux produits dérivés du bois tels que les mélaminés ou les stratifiés employés dans la fabrication de meubles de cuisine et de parquets notamment, pouvant contenir des teneurs en résine élevées, sont également largement commercialisés depuis les années 90.

Les résidus secs, provenant du travail du bois massif, de panneaux bruts et revêtus, de ces différents secteurs (poussières de ponçage, chutes de rabotage, de mortaisage, de découpage, etc.) sont en général valorisés sur place par combustion. Les rebuts de fabrication contenant d'autres éléments tels que des plastiques, des tissus, des visseries, etc. issus de la production de meubles, de sièges et de canapés, etc. peuvent être brûlés en chaudière avec les autres résidus, mis en décharge ou brûlés en cratère à l'air libre.

Les chaudières de ce secteur ont en majorité plus de 15 ans et une puissance moyenne de 2.3 MW. Ces unités sont équipées dans le meilleur des cas de système de dépoussiérage par multicyclone. Les déchets brûlés sont constitués par ordre décroissant d'importance : de bois massifs, de panneaux de particules surfacés-mélaminés, bruts ou avec des décors papiers, du MDF, etc.

2.3 LES DECHETS DE DEMOLITION OU DE CHANTIER

Le bois est un matériau très utilisé dans l'industrie du bâtiment. Des déchets sont produits lors de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments. La quantité de bois dans les déchets de démolition peut aller de quelques pourcents à plusieurs dizaines de pourcents suivant le type de construction, en moyenne elle se situe à 10% en France.

Ces déchets peuvent contenir des bois non souillés et souillés par une multitude de produits tels que peintures, colles, produits d'imprégnation, revêtements de divers matériaux : papiers, plastiques, pouvant contenir également des clous, des vis et des matériaux minéraux, etc., du fait de la diversité des sources. Le taux d'humidité de ces déchets est d'environ 15%.

Ces bois sont disponibles auprès des sociétés de démolition, dans les déchetteries, etc. Ces déchets sont actuellement éliminés dans les incinérateurs dans le meilleur des cas, dans les foyers domestiques ou par brûlage à l'air libre sur chantier dans le pire. Ces déchets sont difficilement utilisables en chaudières du fait de leur extrême diversité sauf à obtenir une source d'approvisionnement constante et satisfaisante en terme de nature et composition de produits à brûler faiblement adjuvantés, bien qu'il soit actuellement possible de séparer le bois des autres produits qu'il contient en particulier tous les produits de maçonneries (morceaux de briques, parpaing, plâtres, produits d'isolation, etc.) ainsi que tous les produits métalliques (clous, vis, câbles, etc.).

2.4 LES DECHETS EN FIN DE VIE

2.4.1 Les emballages

L'industrie du bois de seconde transformation fabrique également des emballages de façon très disséminée sur le territoire français, tels que des cagettes, des palettes, des caisses, etc.

Les palettes constituent à l'heure actuelle, en France, le principal gisement de déchets potentiellement disponible pour une valorisation énergétique. Les palettes peuvent être considérées comme un bon combustible avec un pouvoir calorifique de l'ordre de 3500 kW pour le broyât et avec une teneur en eau faible et relativement constante, d'environ 15%. Il s'agit en effet d'un combustible relativement homogène, ce qui permet d'optimiser aisément sa combustion et donc de minimiser les rejets en polluants émis à l'atmosphère.

La durée de vie d'une palette est d'environ 5 à 8 ans pour celles effectuant de multiples rotations, environ 35% du total. Les palettes assemblées au moyen de pointes en acier ou d'agrafes peuvent être aisément déferrailées et broyées à un faible coût pour une utilisation en tant que combustible. Elles sont disponibles auprès des dépôts de palettes et des réparateurs.

Afin de préserver le bois contre l'attaque des champignons, ces palettes subissent un traitement dit anti-bleu. Environ un tiers des palettes fabriquées en France subissent ce traitement, effectué à la surface du matériau. Le pentachlorophénol (PCP) était le produit le plus utilisé, il est aujourd'hui largement remplacé par d'autres produits l'un à base de sel de bore et d'ammonium quaternaire, représentant environ 80 à 90% du marché français, et l'autre à base de thiocyno-méthyl-thio-benzothiazole (TCMTB).

Un marquage des palettes est également effectué à l'aide de peinture.

En ce qui concerne les palettes d'autres sources de souillures ne sont pas à exclure. Un site de production pollué au PCP, pourrait contaminer le bois destiné à la fabrication des palettes. Une autre source pourrait être l'utilisateur, qui est susceptible d'employer les palettes pour le transport de substances nocives pour l'environnement.

Les cagettes, emballages destinés au logement de produits frais et constituées d'essences reconnues aptes au contact alimentaire (peuplier, hêtre, pins, etc.) ne sont pas traités. Toutefois, 5% des bois utilisés sont des contreplaqués de peupliers contenant des colles à moins de 5% de formaldéhyde.

2.4.2 Bois fortement adjuvantés employés en extérieur

D'autres déchets sont également disponibles : les poteaux téléphoniques, les traverses de chemin de fer, et autres bois d'extérieur (clôtures, berges, mobilier urbain, etc.).

Du fait de leur exposition aux intempéries et de leur contact avec le sol, ces bois ont été fortement adjuvantés avec divers procédés et composés tels que créosotes et pentachlorophénol par le passé, cuivre-chrome-arsenic actuellement notamment. Par exemple, quelques kg/m^3 de bois pour les solutions de PCP et de C.C.A. et quelques dizaines à centaines de kg/m^3 pour les créosotes sont en général nécessaires afin d'assurer une bonne protection.

Les bois les plus anciens, parfois plus de 30 à 40 ans, qui sont en général les plus adjuvantés, sont actuellement déposés et remplacés.

2.5 GISEMENT

Le gisement et les principales caractéristiques de chaque déchet de bois sont présentés dans les tableaux n°3 et 4.

L'ADEME⁽¹⁾ estime le parc de chaudière à bois française à 1000 unités industrielles et 400 chaufferies collectives. Ces installations consomment respectivement 1 460 000 et 440 000 tonnes de bois par an.

Matériaux	Composés chimiques	Quantité	Humidité	Principales utilisations/commentaires
Emballages				
palettes	faibles teneurs en produits de préservation	< 100 ppm	15 - 20%	transport, la teneur en PCP diminue depuis quelques années
cagettes	colles à moins de 5% de formaldéhyde sur 5% des cagettes			transport de produits alimentaires
Bois de démolition avec peintures				
à base plomb (< 1950)	plomb	1000 - 20000 ppm	6 - 20%	teneur en plomb dans les peintures réduite progressivement des années 50 à 70
à base acrylique	acide acrylique, styrène, nitriles, etc.	< 0.1%	6 - 20%	
avec pigments métalliques	dioxyde de titane, chromate de zinc, aluminium, etc.	< 0.1%	6 - 20%	teneurs plus élevées à la surface des matériaux
Panneaux				
contreplaqués	colles UF	1 - 4%	6%	intérieure, peut être traité avec des produits de préservation, ignifuges, etc.
contreplaqués	colles PF	1 - 4%	8 - 12%	extérieure
oriented strandboard	colles PF ou PF/isocyanate	2 - 4%	8 - 12%	intérieure
de particules	colles UF	5 – 13%	8 - 12%	intérieure
MDF et autres panneaux de fibres	colles UF	5 – 13%	4 – 12%	intérieure pour finition
Bois fortement adjuvantés employés en extérieur				
Traité CCA	cuivre chrome arsenic	1 – 3%	variable suivant l'essence et l'exposition	clôtures, quantités actuelles plus faibles
Traité PCP	chlorophénols	1.2 – 1.5%		poteaux extérieurs, emploi actuel réduit
Traité créosote	créosote contient 85% de HAP	14 - 20%		poteaux téléphoniques, traverses de chemin de fer, pertes après traitement estimées à 20 - 50% au bout de 10 - 25 ans

Tableau n°3 : caractéristiques de quelques déchets de bois

Déchets	Scieries	Industries (meubles, panneaux, etc.)	Emballages (palettes, caisses, cagettes)	PME/PMI artisanat	Déchets chantiers	Déchets spéciaux (poteaux, traverses, etc.)	Déchets ménagers (kg/hab./an)
Gisement	6070	1013	1100 à 2200	1000	1500	200	4 à 8
Valorisation actuelle							
Pâte à papier	2410						
Panneaux	1560		35				
Divers (vente)	1000	225					
Energie interne	270	628					
Energie externe	500		17				
Éliminé	330	159	(1)	(1)	(1)	(2)	(3)
Potentiellement valorisable	150	100	1000 à 2000 (palettes) 100 à 200 (cagettes)				

(1) déchets brûlés à l'air libre ou mis en décharge

(2) déchets stockés

(3) déchets incinérés

Tableau n°4 : gisement de déchets⁽¹⁷⁾ en France (en milliers de tonnes)

3 LES ADJUVANTS

Le bois nécessite d'être traité afin de préserver le plus longtemps possible toutes ses caractéristiques.

Le bois traité peut être défini comme un bois ayant été traité, revêtu, vernis, avec un quelconque produit tel que peinture, colle, vernis, pesticide, retardant au feu, produit de préservation, etc. cela peut également désigner les bois ayant été exposé ou mis en contact avec des produits chimiques durant leur utilisation.

Le combustible bois peut donc contenir des adjuvants qui affectent, dans la majorité des cas, peu la combustion, mais qui sont susceptibles de libérer à l'atmosphère des polluants. Ces adjuvants peuvent être rangés en quatre catégories : les résines ou colles, les produits de préservation du bois, les produits ignifuges et les produits de revêtement et de finition.

3.1 LES RESINES OU COLLES

Ces produits sont largement employés pour la fabrication de panneaux, dans l'industrie de l'ameublement, etc. La nature et la quantité de résine utilisée par rapport à la masse de bois sont deux facteurs déterminants pour la résistance du matériau fabriqué.

Il s'agit de polymères organiques pouvant avoir une origine naturelle ou synthétique. Outre le polymère de base, la formulation d'une colle à bois comprend plusieurs constituants (solvant, catalyseur, etc.) en proportion variable en fonction des caractéristiques du produit à fabriquer.

Cinq catégories de résines peuvent être distinguées :

- les thermodurcissables : ces résines polymérisent à chaud : urée-formol (UF), phénol-formol (PF), etc. La principale colle employée, l'urée-formol provient de la condensation de l'urée avec du formol, l'eau servant d'agent de dispersion, un durcisseur ou catalyseur : chlorure, nitrate ou sulfate d'ammonium est employé afin d'accélérer la réaction de polymérisation, ainsi que d'autres additifs tels que des paraffines (agent hydrofuge), etc. Les colles phénol-formol offrent les meilleures résistances aux intempéries, des quantités importantes d'alcali (soude) sont alors additionnées à la colle. D'autres colles permettent également une bonne protection à l'eau, il s'agit des colles urée-mélatamine-formol ou des colles UF/PF modifiées à la résorcine, de colles polyuréthanes, époxydes, etc.,
- les thermoplastiques : on désigne sous cette appellation les colles néoprène, polyamides et autres résines synthétiques dissoutes dans des solvants organiques. La colle néoprène est constituée par du chloroprène, une résine phénolique, des solvants (hydrocarbures, acétates, cétones, etc.) et d'une charge (talc, kaolin, etc.). D'autres adjuvants peuvent également être ajoutés en très faibles quantités (antioxydant, plastifiant, durcisseur),
- les colles en émulsion : principalement les colles vinyliques appelées aussi « colles blanches » il s'agit d'une émulsion aqueuse à base d'acétate de polyvinyle contenant un épaississant (alcools, celluloses, etc.) et un plastifiant (phtalates),

- les colles thermofusibles à base de cire ou paraffine dites « hot melt » qui se présentent sous forme solide, se liquéfient à température plus ou moins élevées (200°C environ) et se solidifient en refroidissant. Elles sont constituées d'un copolymère, de cires ou paraffines, de résines et d'une charge,
- les colles naturelles : les caséines, qui s'emploient à froid ou à chaud en solution dans l'eau, les colles fortes, etc.

La quantité de colles nécessaire dépend de l'essence de bois, de son humidité, du type de résine employé, etc. La mise en œuvre de la colle peut être effectuée manuellement (à la brosse ou à la spatule) ou mécaniquement suivant la nature et la quantité de colle nécessaire au matériau fabriqué.

3.2 LES PRODUITS DE PRESERVATION DU BOIS

L'objectif est de préserver le bois des attaques des insectes et champignons afin d'augmenter sa durabilité, il est donc important que les produits de préservation restent fixés dans le bois. A priori, seule une faible partie de ces produits est relarguée dans l'environnement durant leur vie. Cela peut être le cas de certains produits, protection temporaire des grumes par exemple, ne représentant qu'une faible proportion des composés employés.

Ces produits contiennent :

- des matières actives capable d'éliminer ou d'inhiber le développement d'agents biologiques,
- des adjuvants dont les propriétés permettent de bloquer les matières actives dans le bois, ou qui ont d'autres buts (pigments, produits ignifuges, etc.),
- un solvant, eau ou solvant organique qui véhicule les matières actives et les adjuvants dans le bois. Les solvants organiques peuvent être légers, white-spirit, xylènes, etc. qui s'évaporent après application, ou lourd, coupes pétrolières qui restent dans le bois.

Ils peuvent être rangés en cinq grandes familles :

- les produits en solutions organiques contenant plusieurs matières actives (pesticides) : fongicides (pentachlorophénol, etc.) associés à des insecticides (lindane, aldrine, thiodane, etc.), un solvant représentant 90 à 95% en poids du produit et divers adjuvants permettant de fixer et de stabiliser les matières actives dans le bois afin d'assurer une meilleure durabilité de la protection dans le temps. Ces dernières années de nouveaux produits de remplacement du pentachlorophénol sont apparus sur le marché : furmecycloz, azaconazole, etc.,
- les sels hydrosolubles sont des solutions aqueuses, l'eau servant de solvant, contenant les matières actives notamment des sels d'arsenic, de bore, de fluor, de cuivre et de zinc qui nécessitent d'être fixés dans le bois. Un sel de chrome est utilisé à cet effet. Parmi ces sels hydrosolubles, le plus couramment utilisé est le C.C.A. (chrome-cuivre-arsenic). Du fait de la toxicité de l'arsenic, des produits à base de bore (C.C.B.) en substitution de l'arsenic sont apparus sur le marché,

- les produits issus de la distillation de la houille (créosotes), qui se composent d'un mélange de composés sélectionné au moyen d'un intervalle de température de distillation. Le mélange est relativement complexe, riche en composés phénoliques, pyridiniques et en hydrocarbures aromatiques polycycliques : naphthalène, fluorène, anthracène notamment. Ces substances sont plus ou moins actives et participent à la préservation du bois. Ces produits sont employés notamment pour la protection des bois extérieurs en contact avec le sol (poteaux téléphoniques, traverses de chemin de fer, clôtures, etc.). Ces bois sont l'objet d'une imprégnation à cœur par injection sous pression en autoclave,
- les émulsions aqueuses contenant des matières actives en solution dans l'eau (sels) ou pour les matières actives insolubles dans l'eau (pesticides) dispersées en fine gouttelettes dans l'eau ou dans un mélange eau-alcool, en plus des adjuvants classiques, on aura dans ce cas des émulseurs,
- les lasures sont destinées à la protection du bois, à la décoration et aux traitements contre les insectes et champignons. Elles sont appliquées uniquement à la surface des pièces de bois.

Le traitement effectué peut être superficiel ou à cœur suivant le niveau de protection que l'on souhaite atteindre.

Ces produits peuvent donc être appliqués soit en surface du bois au pinceau ou par pulvérisation au pistolet soit en profondeur par substitution de la sève (ancien procédé appelé Boucherie) par trempage ou injection sous pression (en autoclave) ou encore par perforation pour les charpentes par exemple. Les quantités appliquées sont variables, en moyenne de 300 g/m² pour les traitements de surface et de 60 g/m linéaire pour les traitements par injection.

Mis à part les procédés autoclaves, la mise en œuvre des autres procédés restent simple et à la portée de l'ensemble de la population. Certains bois, naturellement très résistants ne nécessitent pas ce type de traitement. L'emploi de produits de préservation des bois peut s'avérer nécessaire dès l'abattage de l'arbre en forêt, pour protéger temporairement les sciages en attente d'être employés, en usine, pour protéger les matériaux fabriqués, sur chantier par des entreprises spécialisées ou par le grand public en protection préventive ou curative pour les pièces de bois anciennes n'ayant pas fait l'objet de traitement en usine.

Le traitement temporaire anti-bleu permet de protéger les bois frais (sciages notamment) contre l'attaque du champignon « bleu ». Les quantités de produit de préservation nécessaires à ce traitement sont très faibles (< 100 ppm).

3.3 LES PRODUITS IGNIFUGES

Le bois, même ignifugé, est combustible. Il est qualifié de facilement inflammable ou de moyennement inflammable si son épaisseur est suffisante. L'ignifugation dans la masse permet d'atteindre la qualification difficilement inflammable, voire non inflammable dans le cas de certains panneaux bien qu'ils restent combustibles. L'ignifugation du bois ne permet donc que de retarder l'inflammation.

Elle peut être réalisée en profondeur par injection ou trempage au moyen de sels ignifuges inorganiques à base de phosphates d'ammonium et de borates notamment, ou en surface en évitant le contact du bois avec l'oxygène de l'air par dépôt d'une couche de produit fusible (sels de bore) ou d'un vernis ou d'une peinture intumescente (mélamine, paraffines chlorées). Cette protection peut également être atteinte en recouvrant le bois d'un matériau incombustible (plâtre, laine minérale, etc.).

3.4 LES PRODUITS DE REVETEMENT DES BOIS

Divers revêtements peuvent être appliqués sur les bois extérieurs : les vernis, les peintures, les lasures, les enduits et les apprêts, afin de les protéger contre diverses agressions, l'action des rayons ultra-violet et des intempéries notamment. Ces produits sont employés dans l'ensemble des pièces de menuiserie, mais également pour la protection des charpentes, des meubles et des panneaux. Seul un film fin (quelques dixièmes de millimètre) est déposé à la surface des matériaux, qui ne contiennent que de très faibles quantités de produits, en général < 0.1 %.

Les vernis sont des liants appliqués en couche successive en fonction de la protection que l'on souhaite atteindre. Les peintures sont des liants dans lesquels ont été dispersés des pigments. Les lasures sont des produits intermédiaires entre les vernis et les peintures auxquels on intègre des adjuvants (produits antiseptiques par exemple). Les enduits destinés à gommer les défauts de surface contiennent un liant et une charge. L'apprêt constitue une première couche appliquée avant les couches de finition, notamment sur les menuiseries et les panneaux. Il a également un bon pouvoir couvrant et contient une charge et un liant.

La diversité des types et formulations des peintures et vernis rend difficile la connaissance de la composition de ces produits. On distingue à l'heure actuelle deux types de peintures, à base solvants ou à base eau. Les récentes réglementations sur les émissions de composés organiques volatils permettent d'accroître la production de peintures à base eau mais aussi la facilité d'application de ces peintures dont l'emploi se développe fortement notamment pour les applications intérieures. Les solvants sont largement libérés lors de l'application. Les autres constituants : des résines (acryliques, époxy, etc.) qui permettent la création d'un film, des pigments, des fongicides ou insecticides, des agents protecteurs contre les ultraviolets, etc., restent sur le bois.

Les produits classiques ont des extraits secs compris entre 35 et 60%, des produits à haut extrait sec, 20% de solvant seulement, peuvent également être employés.

Les pigments employés dans les peintures peuvent contenir des composés métalliques tels que le chrome, le cuivre, ou le zinc, qui ne représentent toutefois en poids que moins de 5% des peintures. Les bâtiments construits avant 1940 peuvent contenir des matériaux recouverts de peintures à base de mercure ou de plomb. Ces dernières contenaient de 30 à 50% de plomb.

Les produits employés diffèrent selon l'exposition des pièces de bois aux intempéries. En extérieur, des vernis ou peintures glycérophthaliques, des vernis gras phénoliques, des vernis polyuréthanes et des lasures à base de résines alkydes seront employés. En intérieur, les vernis et peintures cellulosiques, les aminoplastes, les polyesters, les polyuréthanes, les vinyliques et les époxydes sont plutôt utilisés.

Ces produits sont mis en œuvre lors de la fabrication sur site industriel au moyen de vernisseuses pour les panneaux ou par pulvérisation, après la pose sur chantier et en rénovation au moyen de méthodes manuelles.

3.5 DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

Certaines substances contenues dans les déchets de bois telles que les plastiques, les peintures, les vernis peuvent être aisément détectées, d'autres substances couramment employées par le passé telles que les insecticides ou fongicides ne peuvent être identifiées visuellement.

La concentration de l'ensemble de ces produits dans les déchets de bois est à l'heure actuelle inconnue, du fait de la méconnaissance des produits et des quantités employés par le passé et de la perte de ces produits par relargage dans l'environnement durant leur utilisation.

3.5.1 Teneur en PCP des palettes

Une étude menée par le C.T.B.A. en 1996 a permis de déterminer la teneur moyenne en PCP dans les palettes en France. Cette teneur était de 6 ppm, avec quelques lots à des teneurs à 20 ppm. Quelques palettes seraient également fortement traitées au PCP, environ 1% contiendrait 200 ppm de PCP.

Ce composé n'étant pratiquement plus employé, cette teneur en PCP dans les palettes décroît régulièrement. Toutefois il faudra encore attendre quelques années avant d'avoir éliminer complètement ce composé, les palettes pouvant être réparées et réutilisées ou recyclées en partie, le PCP n'étant pas interdit, il pourrait encore être employé dans de rares cas en France, et des palettes traitées au PCP peuvent entrer aisément sur le territoire français.

3.5.2 Teneur en lindane et PCP de divers déchets

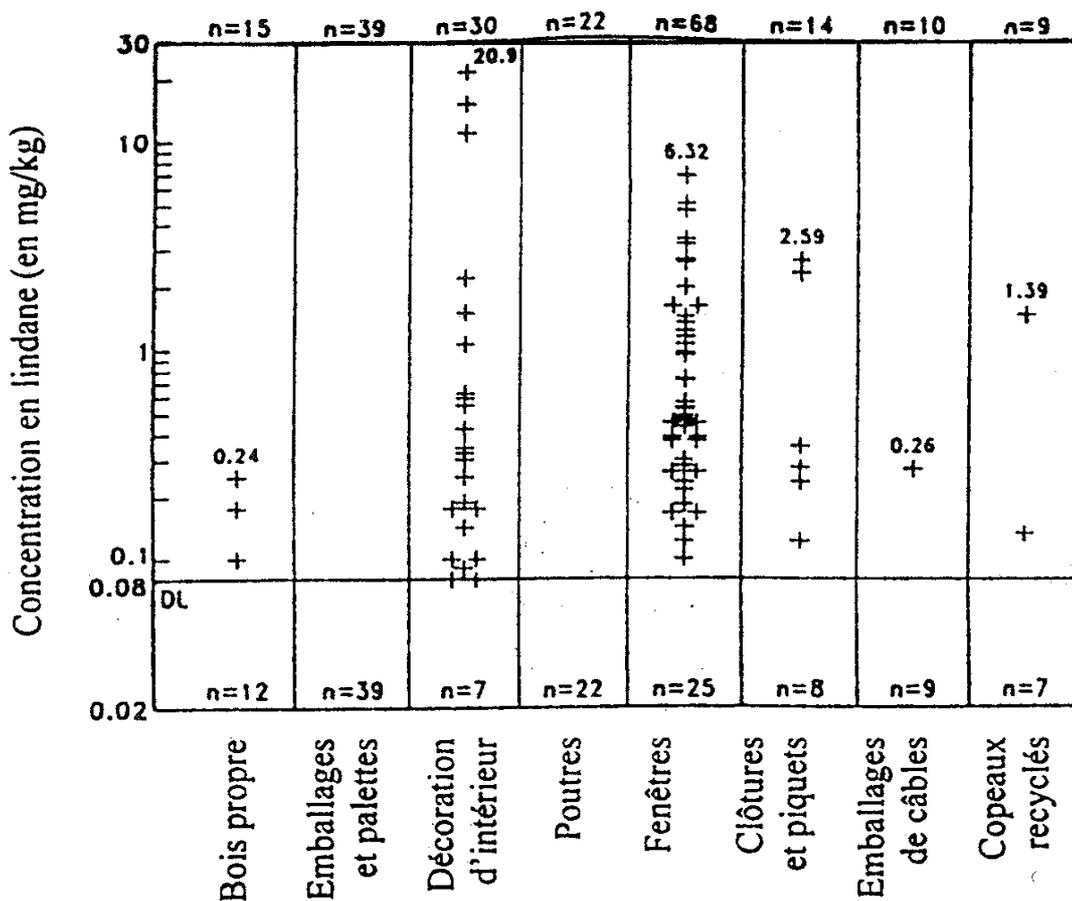
Une campagne d'essais⁽³⁾ a été effectuée en Allemagne en 1995 afin de déterminer la concentration en lindane et en pentachlorophénol dans divers déchets de bois. 214 échantillons de bois comprenant des emballages, des palettes, des décorations d'intérieur, des poutres, des fenêtres, des clôtures, des piquets et des emballages de câbles électriques ont été analysés.

La production de PCP a été stoppée dans les années 80 en Allemagne, l'emploi de ce composé y est interdite depuis 1989. Quant à la production de lindane, elle a été arrêtée en 1984.

La concentration en lindane dans les échantillons de bois non souillés est faible (< 0.24 mg/kg). Ce composé n'est pas détecté dans les emballages, les palettes et les poutres et un seul échantillon d'emballage de câbles électriques contient plus de 0.08 mg/kg (seuil de détection). Seuls deux échantillons de copeaux recyclés contiennent des teneurs supérieures à la limite de détection, la plus forte teneur mesurée (1.39 mg/kg) est probablement dûe à un traitement de l'échantillon. Pour les clôtures et les piquets, deux échantillons contiennent plus de 1 mg/kg. Le bois des décorations intérieures et des fenêtres est le plus contaminé.

Les concentrations en PCP sont significativement plus fortes que les concentrations en lindane dans les échantillons analysés. Dans la plus part des échantillons de bois non souillés, ce polluant n'est pas détecté (< 0.05 mg/kg), la plus forte teneur mesurée est de 0.25 mg/kg. Les teneurs en PCP dans les emballages, les palettes, les poutres, les clôtures, les piquets et les emballages de câbles sont faibles. Cette teneur est plus importante pour les copeaux recyclés, valeur maximale à 4.43 mg/kg, ce qui signifie que des bois traités ont été employés. Les échantillons les plus contaminés sont les fenêtres et les décorations d'intérieur où ce polluant est détecté sur pratiquement tous les échantillons. De fortes teneurs sont mesurés, notamment sur les fenêtres, un échantillon contient 163 mg/kg.

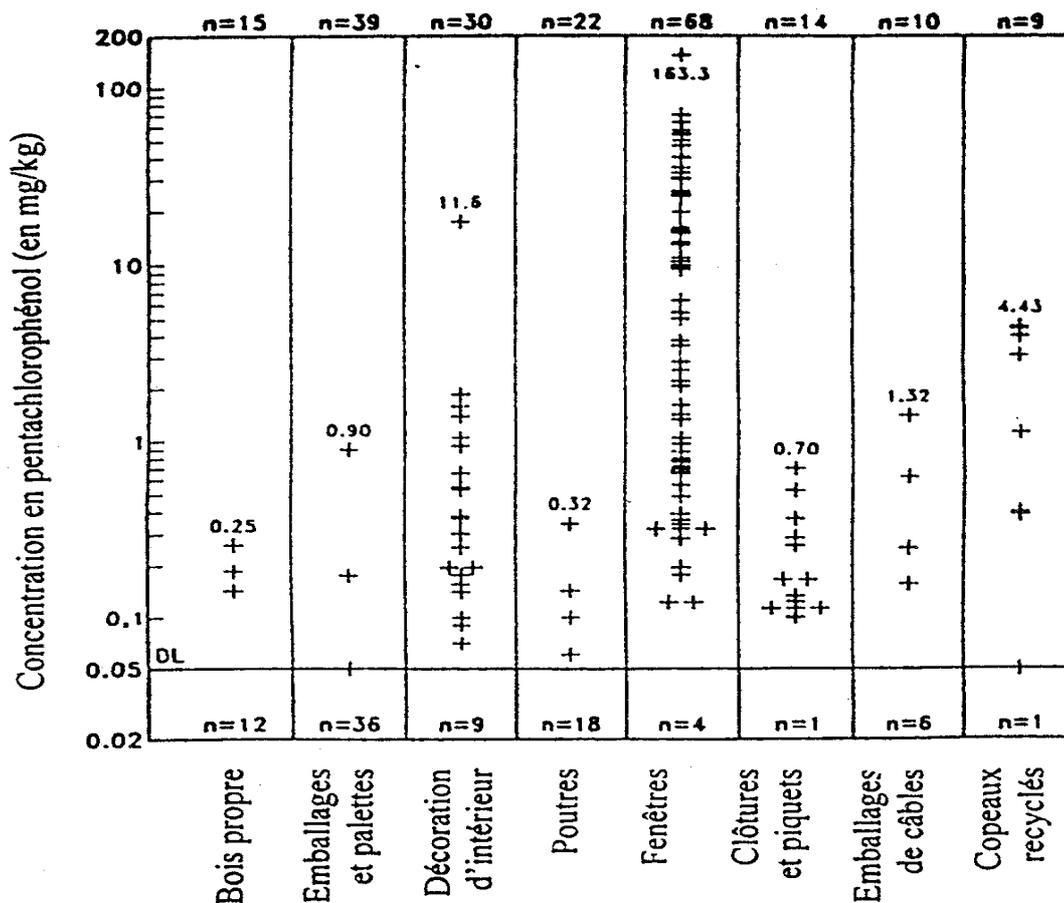
De nombreux échantillons contiennent une concentration en PCP supérieure à la limite admise en Allemagne : 5 mg/kg, limite qui ne s'applique qu'aux produits fabriqués depuis décembre 1989.



DL : limite de détection

n : désigne le nombre d'échantillons de chaque catégorie de déchets

Figure n°2 : teneurs en lindane de divers échantillons de bois



DL : limite de détection

n : désigne le nombre d'échantillons de chaque catégorie de déchets

Figure n°3 : teneurs en PCP de divers échantillons de bois

3.5.3 Teneurs en métaux lourds de divers déchets

Les déchets de bois peuvent contenir d'autres produits tels que des métaux (fixation), des peintures, des revêtements, etc., qui sont susceptibles d'émettre des métaux lourds lors de la combustion.

Une étude⁽²⁾ a été menée en Allemagne en 1996 afin de connaître les teneurs en métaux lourds de pièces de bois utilisées dans le bâtiment. La concentration de 13 métaux a été recherchée dans 62 échantillons en prélevant à la surface de chaque pièce de bois une couche de 3 mm.

Le mercure n'a pas été détecté, l'étain et le cuivre apparaissent à des teneurs proches des limites de détection. Le cadmium est dosé à de très faibles teneurs probablement dues à l'emploi de ce métal comme agent de stabilisation pour le PVC. De grandes quantités de fer et de manganèse sont mesurées mais ces métaux ont un impact mineur sur l'environnement et sont également présents dans le bois naturel. De fortes teneurs en plomb, zinc et barium ont été mesurées. Ces éléments sont présents dans les peintures et n'apparaissent pas en si grande concentration dans le bois naturel.

Dans de nombreux cas, un à deux éléments sont présents en fortes concentrations dans les échantillons. Ces fortes teneurs sont souvent dues à l'emploi de pigments dans les revêtements. Afin d'estimer l'emploi de pigments spécifiques ces dernières décennies, les échantillons ont été classés en plusieurs groupes en fonction de leur âge et de leur couleur. L'élément zinc, sous forme d'oxyde de zinc, est un important pigment blanc. Les échantillons les plus anciens sont les plus fortement contaminés, ce composé ayant été remplacé par le dioxyde de titane (TiO₂) sur la dernière décennie. Le plomb a également été largement employé comme pigment blanc. La réduction de la teneur en plomb ces dernières années, est probablement liée aux propriétés toxiques de cet élément. De fortes teneurs en barium ont également été détectées sur les échantillons les plus anciens, cet élément a également été employé par le passé afin d'obtenir certains effets de couleur. La dépendance entre la couleur et le métal contenu dans l'échantillon est importante. La détection simultanée sur un échantillon de Ba et de Zn indique par exemple l'emploi de Litophone (BaSO₄ et ZnS) comme pigment blanc. En ce qui concerne les échantillons rouge et orange, un seul échantillon sur onze contient du cadmium, ce qui est probablement dû à l'emploi de CdS comme pigment orange. Les pigments rouge sont obtenus au moyen d'oxydes de fer, de plomb et de chrome. Sur cinq échantillons les teneurs en Pb et en Cr apparaissent avec un ratio 10:1, ce qui conduit à soupçonner l'emploi de Pb₂CrO₄.PbO comme pigment rouge.

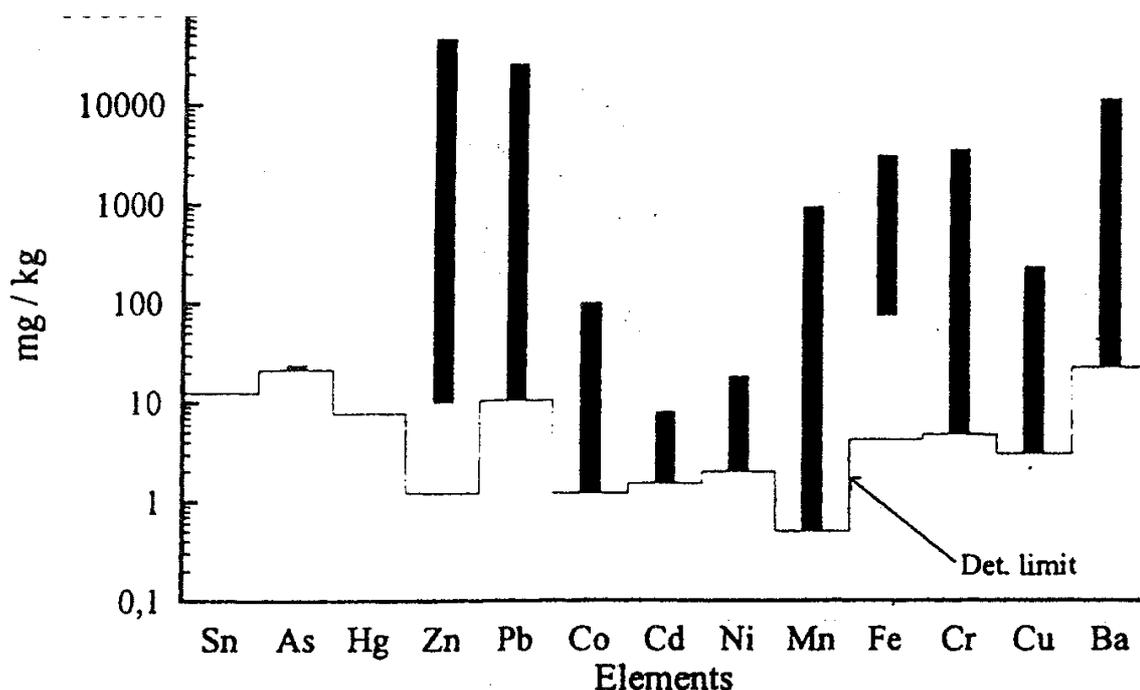


Figure n°4 : teneurs en métaux lourds de 62 échantillons de déchets de bois

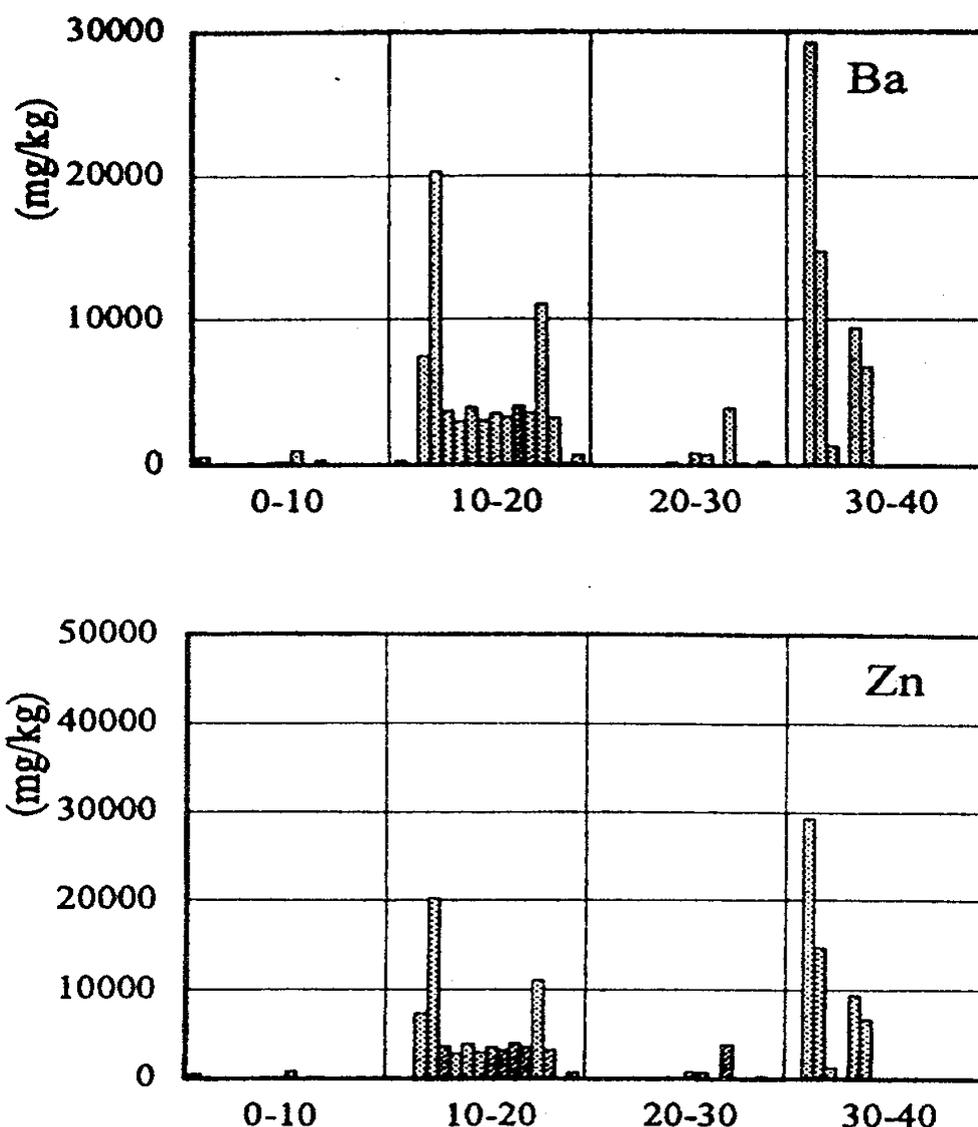


Figure n°5 : teneurs en Ba et Zn des échantillons en fonction de leur âge

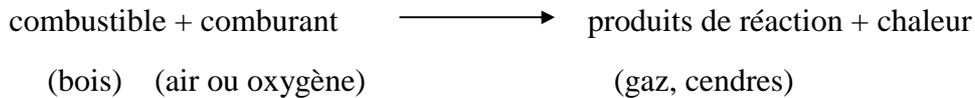
3.5.4 Commentaires

Du fait des fortes teneurs en PCP mesurés sur les échantillons testés, leur réemploi à d'autres fins (fabrication de panneaux de particules ou valorisation énergétique) paraît difficilement envisageable. En Allemagne, une valeur limite est fixée à 5 mg/kg pour le réemploi des déchets.

Les peintures sont une source de contamination par les métaux lourds. Cette contamination est localisée à la surface des pièces de bois. Si certains échantillons contiennent de faibles concentrations en métaux lourds, d'autres peuvent contenir jusqu'à 1 g/kg. Les pièces de bois anciennes sont souvent plus contaminées que les récentes.

4 COMBUSTION DU BOIS

La combustion est une réaction exothermique correspondant à l'oxydation totale du combustible :



Le bois est un combustible solide, renouvelable; il se distingue par son hétérogénéité, sa complexité et un pouvoir calorifique limité (4300 à 4500 kcal/kg pour un bois sec, à titre de comparaison, celui du pétrole est de 10000 kcal/kg). Ce combustible brûle en plusieurs étapes.

4.1 LES DIFFERENTES PHASES

Nous pouvons distinguer trois grandes étapes lors de la combustion du bois :

- l'évaporation de l'eau : le bois contient toujours un pourcentage notable d'eau. Lorsqu'il est chauffé, il laisse d'abord dégager de la vapeur d'eau. La température ne dépasse pas 100°C et pratiquement aucun autre gaz ne se dégage,
- la gazéification et l'inflammation de matières volatiles : une fois l'eau évaporée, le bois laisse dégager des gaz combustibles et incombustibles. En général les gaz combustibles se combinent rapidement à l'oxygène de l'air, s'enflamment et brûlent à la surface du bois avec une abondante production de chaleur. Il y a simultanément début de production de charbon de bois,
- la combustion des matières solides : la chaleur dégagée provenant de l'inflammation des matières volatiles augmente et atteint les couches encore intactes. Le bois se décompose, libère de plus en plus de gaz combustibles qui s'échappent par les pores et les fentes et brûlent peu à peu. Le charbon de bois se forme et ralentit la combustion en créant une couche isolante qui protège le bois encore intact. Inflammation et combustion sont difficilement séparables. Elles se chevauchent jusqu'à la combustion totale des matières volatiles. Quand le gaz s'est dégagé en totalité, seul le charbon de bois formé reste et réagit à chaud avec l'air; il devient incandescent. Le seul résidu restant est la cendre.

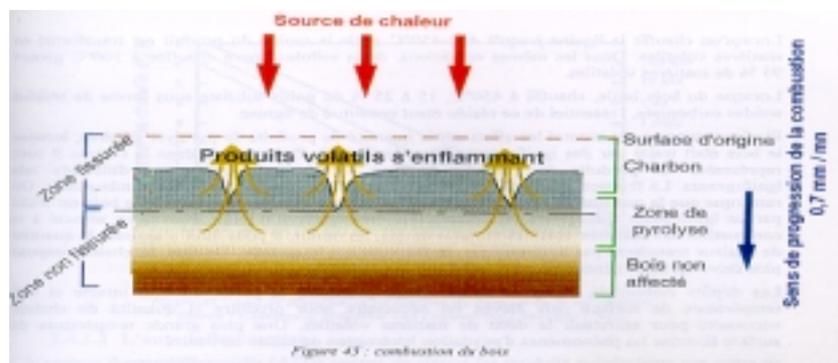


Figure n°6 : combustion du bois

4.2 LES DIFFERENTS COMPORTEMENTS

4.2.1 Comportement en milieu confiné

Le comportement du bois en vase clos est le suivant :

- la température du bois reste en dessous de 100°C tant que toute l'eau ne s'est pas évaporée,
- de 100°C à 250°C, il y a libération de gaz, 70% de CO₂ incombustible, et 30% de CO toxique et combustible et d'acides pyrolytiques. Le bois devient brun,
- vers 275°C, la réaction devient nettement exothermique, et des gaz se forment en abondance. La teneur en CO₂ diminue très vite et des hydrocarbures apparaissent. Le bois a une couleur chocolat,
- quand la température est supérieure à 350°C, l'importance du dégagement gazeux est moindre, surtout en CO, en hydrocarbures et un peu en hydrogène,
- au dessus de 450°C, de l'hydrogène et des hydrocarbures sont surtout émis; du charbon de bois apparaît, celui-ci peut également brûler en dégageant des gaz combustibles.

4.2.2 Comportement à l'air libre

Ce comportement est beaucoup plus complexe. Il ne s'agit plus du bois qui brûle mais des gaz de distillation qui s'en échappent. La température des flammes peut atteindre 1000°C à 1850°C. Celle du bois est comprise entre 400°C et 2000°C (ce qui n'est jamais atteint en pratique à cause de l'humidité du bois et de l'excès d'air apporté par le tirage). La température semble atteindre dans la majorité des cas 1000°C à 1300°C. Le charbon formé entre 275°C et 350°C brûle à l'air libre entre 340°C et 370°C.

4.3 FACTEURS AFFECTANT LA COMBUSTION

Les principaux facteurs affectant la combustion sont les suivants :

- l'humidité du bois : avec un bois sec (20% d'humidité maximum), il est plus aisé d'obtenir une combustion complète. Si le taux d'humidité est trop fort, le feu est refroidi par l'importante quantité de vapeur d'eau générée qui entraîne une diminution de l'efficacité de la combustion et une augmentation des émissions d'imbrûlés,
- l'allure (puissance réelle/puissance nominale) : ce paramètre joue un rôle important. Si l'allure est trop faible, la température nécessaire à une bonne combustion ne sera jamais atteinte ; si elle est trop forte, la combustion ne pourra être complète, il y aura alors formation d'imbrûlés,

- la dimension des morceaux de bois : si les morceaux de bois sont petits, le processus de dégazage et d'inflammation est très rapide, on obtient une bonne flamme de bois, même pour des bois humides. Si les morceaux de bois sont de grandes dimensions, le processus de combustion se poursuit par couche successive. Les matières volatiles et l'eau proviennent des couches de plus en plus profondes, tandis que simultanément une couche isolante de charbon de bois de plus en plus épaisse se forme à la surface de la bûche. Les matières gazeuses s'échappent ainsi par les pores et les fentes du bois en formant de petits jets et une couche de gaz autour des bûches. L'effet de tirage naturel autour des bûches fournit de l'air à leur partie inférieure et un mélange de gaz et d'air pollué à leur partie supérieure. L'air est d'autant plus pollué par les fumées que le charbon de bois formé à la partie inférieure de la bûche brûle mieux. Le mélange des gaz combustibles avec l'air s'effectue dans les fumées, ce qui rend la combustion des gaz difficile et ceci d'autant plus si la turbulence locale et la température des flammes sont faibles,
- l'essence et les traitements du bois : l'essence joue également un rôle sur la combustion et donc l'émission de polluants. Un bois tendre génère plus d'hydrocarbures qu'un bois dur. L'introduction de colles et de résines dans la structure du bois change la chimie de ce matériau. La combustion relativement simple de la cellulose devient alors plus complexe en raison de la présence de résines plastiques dérivées du pétrole, qui peuvent contenir des noyaux aromatiques, des composés halogénés et d'autres constituants hydrocarbonés insaturés qui affectent la production de chaleur et la composition des fumées. La valorisation énergétique de pièces de bois ayant été fortement traitées ou revêtues, peut également modifier la combustion; en affectant son allure,
- le temps de séjour : assez long, il permet d'assurer un bon mélange air-combustible, un bon transfert de chaleur et une bonne libération d'énergie chimique. Si le temps de séjour est trop court, la combustion sera incomplète, le transfert de chaleur provenant des gaz de combustion inefficace. Si le temps de séjour est trop long, la combustion sera également incomplète car la vitesse des gaz dans le foyer sera trop lente pour assurer un bon mélange air-combustible,
- la température : une température importante dans la zone de combustion favorisera les réactions chimiques et assurera une combustion complète,
- la turbulence : elle devra être suffisante afin d'assurer un bon mélange air-gaz combustibles, d'atteindre l'allumage et de soutenir le processus de combustion. Les molécules d'oxygène et de gaz combustibles doivent entrer en contact. La force et la fréquence de collision de ces molécules sont gouvernées par la température et la turbulence,
- l'excès d'air : il doit être réglé avec une précision suffisante afin d'éviter un refroidissement du foyer (excès d'air trop fort) ou la formation d'imbrulés (excès d'air trop faible). Il joue donc un rôle sur l'oxydation du combustible et l'efficacité thermique de l'installation.
- le confinement : la combustion est meilleure dans un milieu confiné. La combustion dépend de nombreux paramètres qui peuvent plus aisément être contrôlés sur une installation adaptée. Les chaudières de grandes capacités permettent d'obtenir une meilleure combustion, donc de meilleurs rendements.

4.4 QUALITE DE LA COMBUSTION

Afin de générer un minimum de pollution, il est nécessaire d'avoir la combustion la plus complète possible.

La qualité de la combustion peut être appréciée au moyen d'un suivi de la concentration en monoxyde de carbone. L'apparition de ce polluant indique que l'excès d'air, la température de flamme ou le temps de séjour des gaz dans la zone de combustion sont insuffisants. Une mauvaise qualité de combustion se traduit également par la formation d'autres polluants tels que les composés organiques volatils et les hydrocarbures lourds présents essentiellement sous forme particulaire.

4.5 CHAUDIERES

4.5.1 Chaudières industrielles

On distingue différents types d'installations :

- les installations situées sur le lieu de production du combustible, chaudières des industries de transformation du bois, parfois peu automatisées,
- les installations situées à proximité du lieu de production qui disposent d'une source d'approvisionnement régulière, chaudières industrielles ou chaufferies collectives,
- les installations qui achètent le combustible, chaufferies collectives surtout, dont l'aspect économique est primordial,

ainsi qu'une large gamme de technologies qui s'adaptent à la qualité du combustible :

- des systèmes de broyages automatisés acceptant une large gamme de combustible,
- des dispositifs de manutention pneumatique ou à vis s'adaptant à toutes les granulométries et humidités,
- des dispositifs de chargement automatiques, pneumatiques, par gravité ou à vis,
- des systèmes d'élimination automatiques des cendres,
- des avant-foyers permettant un séchage des combustibles humides, par rayonnement de la voûte du foyer,
- des foyers qui s'adaptent aux combustibles : foyers à grilles, foyers volcans, foyers cyclones, et qui acceptent une certaine hétérogénéité du combustible : foyers à grilles inclinées en gradin,
- des systèmes de dépoussiérages des fumées de plus en plus efficaces mais coûteux.

Les chaudières à bois s'intègrent bien aux besoins des petites et moyennes entreprises de l'industrie du bois, en éliminant les déchets, en produisant l'énergie nécessaire au chauffage des locaux et parfois en fournissant la vapeur aux séchoirs.

Le parc de chaudières installées dans le milieu industriel est relativement ancien, 40% des unités de l'industrie de l'ameublement ont plus de quinze ans. Il s'agit d'unités de petites tailles, quelques MW en général. Le foyer à grille est le plus couramment employé sur ces petites installations mais on trouve également des foyers à sole de type cyclonique par exemple.

Ces chaudières sont en général équipées d'un système de dépoussiérage mécanique des fumées utilisant la force centrifuge afin de capter les particules (multicyclone) qui permet d'atteindre au mieux des rejets en poussières à l'atmosphère compris entre 100 et 200 mg/nm³ en fonction du combustible brûlé.

L'utilisation du bois dans les chaufferies collectives est plus récente, les premières installations datent des années 80 et de nouvelles unités apparaissent chaque année.

4.5.2 Foyers domestiques

Il existe divers types de foyers domestiques avec des rendements de 35 à 60 % pour les plus performants (poêles, cuisinières, petites chaudières) et de 10 à 20 % au pire (cheminées, foyers ouverts).

En ce qui concerne les cheminées, l'entrée d'air est située en façade, l'air se propage et se répartit plus ou moins bien dans les flammes. L'air réchauffé est évacué immédiatement vers l'extérieur d'où de faibles rendements.

Inversement, les foyers fermés, les poêles et les petites chaudières à bois font appel à des technologies à simple ou double admission d'air équipé ou pas de dispositifs de réglage qui permettent une certaine souplesse. Ils peuvent également disposer de systèmes de préchauffage de l'air admis et de récupérateurs de chaleur permettant d'accroître les rendements.

5 EMISSIONS DE POLLUANTS

Une combustion complète émet principalement du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau et dans de plus faibles quantités les composés suivants : des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre, des cendres, des éléments traces : métaux lourds notamment. Notons également que les oxydes d'azotes proviennent d'une oxydation de l'azote de l'air de combustion.

Les produits supplémentaires émis lors d'une combustion incomplète sont le monoxyde de carbone, les particules, les composés organiques, voire d'autres composés toxiques tels que les aldéhydes, les dioxines et furanes, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.

La formation des dioxines et furanes est donc favorisée lors d'une combustion incomplète, mais d'autres paramètres tels que la teneur en chlore du combustible, sa charge en métaux lourds, en cuivre notamment qui catalyse la formation de ces polluants et le temps de séjour de fumées dans la plage de température comprise entre 250 et 350°C atteinte en général sur le système de dépoussiérage des fumées, jouent également un rôle déterminant.

De nombreux essais ont été effectués afin de caractériser les rejets polluants émis lors de la combustion de bois et déchets de bois. L'ensemble des données recueillies dans les publications a été classé par type de déchet. Du fait du manque de certaines données, les résultats n'ont parfois pu être exprimés qu'en terme de concentration ou qu'en terme de facteur d'émission. Des tableaux récapitulatifs situés à la fin de ce chapitre résument l'ensemble des résultats recueillis sur les chaudières à bois et les foyers domestiques.

5.1 CHAUDIERES INDUSTRIELLES

De nombreuses mesures à l'émission de chaudières à bois ont été réalisées aux Etats Unis dans le cadre de divers programmes. Les premières données datent de 1987 et sont rapportées par l'EPA. En 1988, le California Air Resources Board (CARB) a mesuré les rejets émis par quatre unités. En 1992, l'EPA a recensé l'ensemble des installations ayant fait l'objet de mesures, soit 124 unités, et a publié ces données sous une forme résumée. Enfin le National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement (NCASI) a présenté en 1995 les résultats de mesures effectuées sur cinq installations. Le facteur d'émission de dioxines et furanes retenu par l'EPA, s'inspire essentiellement des travaux effectués par le CARB, et est censé représenter l'ensemble du parc de chaudières à bois sans prendre en compte les déchets de bois adjuvantés avec des composés chlorés. Pour estimer les rejets en dioxines lors de la combustion de ce type de déchets, une étude a été réalisée en 1998 par l'EPA.

En France, des essais de combustion de panneaux ont été réalisés en 1993 et 1995 à l'initiative du Syndicat Général des Fabricants de Panneaux à Base de Bois sur unité pilote et en chaudière industrielle. Ces tests ont porté essentiellement sur les rejets d'oxydes d'azote, aucune mesure de dioxines n'a été réalisée, seules des déterminations de la teneur en chlore émise par certains panneaux ont été effectuées. Des mesures sur trois installations industrielles ont été effectuées en 1995 et 1996 à la demande du Ministère de l'Environnement afin d'estimer des facteurs d'émission de polluants émis par la combustion de bois non souillés. D'autres campagnes de mesures ont été effectuées plus récemment sur l'initiative de l'ADEME et du CTBA afin de quantifier les rejets en dioxines et furanes lors de la combustion de broyats de palettes.

En Allemagne, des mesures ont été effectuées durant l'hiver 93-94 à l'émission des chaudières à bois du Land de Baden Wuternberg, ainsi que sur trois installations de combustion de déchets de bois et sur une unité de fabrication de panneaux de fibres où des mesures ont été effectuées en sortie du procédé de séchage et de la presse dans le cadre d'un programme de mesures des émissions de dioxines et furanes en Rhénanie du Nord-Westphalie (NRW) conduit par l'Agence Régionale de l'Environnement en 1996.

Des essais ont également été effectués dans divers pays afin d'estimer des facteurs d'émissions, notamment en Suisse, en 1994, sur de petites unités industrielles alimentées en bois naturel et en divers déchets de bois ; ou afin de caractériser les rejets d'unités alimentées en déchets de bois, aux Pays Bas en particulier, en 1993, avec des déchets de démolition et de l'industrie de l'ameublement ; ou enfin afin d'étudier l'influence sur les émissions de polluants, d'une substitution partielle du bois naturel, par des déchets de bois traités au PCP (Canada, 1990) ou des ordures ménagères (Finlande, 1989).

5.1.1 Essais de combustion de bois naturels

- Des mesures de dioxines et furanes à l'émission d'une chaudière alimentée en divers déchets (écorce et autres résidus secs et humides de production) issus de billes de bois préalablement stockées dans l'eau de mer et qui ont accumulé une quantité significative de chlore inorganique, ont été réalisées en 1987 par l'EPA⁽⁸⁾. Les fumées traversent un cyclone et un filtre avant rejet à l'atmosphère. Un facteur d'émission de 17.1 ng I.TEQ /kg de bois brûlés a été déterminé sur cette installation.

- En 1988, le CARB⁽⁴⁾ a réalisé des mesures sur trois unités alimentées en bois naturel (écorces et copeaux). Il s'agit :

- d'un lit fluidisé équipée d'un système de filtration par multicyclone et électrofiltre et d'un système de réduction sélectif non catalytique (SCNR) des oxydes d'azotes. Un facteur d'émission de 1.32 ng I.TEQ/kg de bois brûlé a été déterminé,
- d'un foyer muni de quatre brûleurs et équipé d'un multicyclone. Un facteur d'émission de 0.64 ng I.TEQ/kg de bois brûlé a été déterminé sur cette unité,
- d'un second foyer à quatre brûleurs équipé d'un multicyclone et d'un électrofiltre. Un facteur d'émission de 0.50 ng I.TEQ/kg de bois brûlé a été déterminé sur cette dernière unité.

- Une compilation⁽⁵⁾ des données d'émission relatives aux chaudières à bois a été effectuée en 1992 aux Etats Unis. Elle porte plus particulièrement sur les rejets en métaux lourds et composés organiques. Les données de 124 installations, allant de 1 à 350 MW, comprenant différents types de foyer (à grilles, lit fluidisé, etc.) et différents systèmes d'épuration des fumées (multicyclones, électrofiltres, filtres à manches, laveurs, etc.) ont été analysées. Parmi ces installations, seules 8 d'entres-elles brûlaient des déchets, les résultats de cette étude ont donc été assimilés à des données relatives à la combustion de bois non traité.

L'ensemble des résultats ont été compilés par type de foyer (tableau n°5).

Polluants	Foyer à grille mobile	Foyer à double chambre	Lit fluidisé	Foyer à grille fixe	Foyer à suspension
Arsenic ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.43	6.65	11.35	3.86	0.86
Beryllium ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.18	0.33	0.195	1.78	0.43
Cadmium ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.63	3.67	1.59	2.07	1.99
Chrome ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.53	16.05	19.31	25.19	10.17
Chrome VI ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3.27	5.38	2.32	98.05	6.83
Cuivre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	10.78	102.6	4.28	83.57	31.33
Plomb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	11.43	51.9	98.46	108.2	15.10
Manganèse ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	254.2	2572	567.9	1029	1547
Mercure ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.48	54.4	0.26	0.87	0.35
Nickel ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.82	16.18	28.53	9.03	8.98
Selenium ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2.08	2.88	3.21	11.54	4.22
Zinc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	161.1	1670	28.87	305.3	281
Formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1660	395	399	1020	175
Acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	173	67.1	24.5	478.2	8.3
Benzaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		0.81			
Acroléine ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		0.24			
Benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1668	537.1	13.6	27.57	3073
Phénol (ng/m^3)	12120	2615		323	
Chlorophénols (ng/m^3)	438.1	7482	1717	122.5	
Phénols (total) (ng/m^3)	7896	12689	1717	404	
Naphtalène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	16.6	86.7	79.5	208.8	293.3
HAP cancérigènes ⁽¹⁾ (ng/m^3)	2094	2098	1659	86.2	126
PCDD/F ($\text{ng I.TEQ}/\text{m}^3$)	0.16 ⁽³⁾		0.54 ⁽³⁾	0.14 ⁽³⁾	
PCBs (ng/m^3)			57.43	22781	
Chlorobenzènes (ng/m^3)			1518	509	
Poussières (mg/m^3)	158	407	174	1029	236
NO _x (ppm)	90	101	93	95	
CO (ppm)	615	419	116	932	1837
SO ₂ (ppm)	21		0.6	5	
COVTNM ⁽²⁾ (ppm)	39	19	1	10	35

⁽¹⁾benzo (a) anthracène, benzo (a) pyrène, benzo (b) fluoranthène, benzo (k) fluoranthène, chrysène, dibenzo (a,h) anthracène, indeno (1,2,3-cd) pyrène et benzo (g,h,i) perylène

⁽²⁾ composés organiques volatils totaux non méthaniques exprimés en équivalent CH₄

⁽³⁾estimation à partir de données brutes

Tableau n°5 : données d'émission aux Etats Unis – résultats moyens par type de foyers

Les résultats des métaux lourds ont été présentés en fonction de la teneur en poussières des fumées, pour quatre intervalles de concentration en poussières correspondant à des procédés d'épuration distincts (tableau n°6). La figure n°7 présente la distribution des émissions de particules en fonction du procédé d'épuration employé. L'estimation de la réduction des émissions de métaux lourds entre les deux intervalles extrêmes de concentration en poussières : < 11,5 et > 114 mg/m³n, déterminée à partir de la concentration moyenne en métaux de ces intervalles, est présentée sur le tableau n°7.

Ces données d'émission permettent de mettre en évidence les points suivants :

- les métaux lourds sont présents essentiellement sous forme particulaire, lorsque les émissions de poussières sont réduites de 90%, celles des métaux lourds sont également réduites de 90%, à l'exception des quatre métaux suivants : Be, Cd, Ni et Se,
- les composés organiques chlorés sont présents à de très faibles teneurs, souvent inférieures au seuil de détection analytique,
- une vingtaine de mesures de dioxines et furanes a été effectuée sur ces installations. Les résultats sont uniquement exprimés en valeur brute. Les valeurs ramenées en équivalent toxiques indiquées sur le tableau n°5 sont estimées et donc a priori peu précises.

Polluants	Teneur en poussières* (en mg/m ³ n)			
	< 11.5	>11.5 et < 23	> 23 et < 114	> 114
Arsenic (µg/m ³)	0.19	0.75	11.33	8.75
Beryllium (µg/m ³)	0.18	0.21	0.22	1.10
Cadmium (µg/m ³)	0.46	0.37	1.32	3.55
Chrome (µg/m ³)	1.40	9.92	8.42	27.27
Chrome VI (µg/m ³)	2.73	-	4.25	56.24
Cuivre (µg/m ³)	3.19	1.03	25.01	96.87
Plomb (µg/m ³)	3.38	23.24	39.85	102.0
Manganèse (µg/m ³)	43.79	104.98	141.01	2133.2
Mercure (µg/m ³)	0.29	0.27	0.74	29.62
Nickel (µg/m ³)	3.13	4.02	11.76	18.91
Sélénium (µg/m ³)	2.10	2.12	2.64	5.70
Zinc (µg/m ³)	63.57	26.40	399.50	1211.8

* les teneurs en poussières < 11,5 mg/m³n sont obtenues avec les électrofiltres les plus performants, les teneurs en poussières > 11,5 et < 23 mg/m³n sont obtenues au moyen d'électrofiltre, les teneurs en poussières > 23 et < 114 mg/m³n sont obtenues au moyen de laveurs, les teneurs en poussières > 114 mg/m³n sont obtenues au moyen de multicyclones.

Tableau n°6 : émissions de métaux lourds en fonction de la teneur en poussières

Métaux lourds	Efficacité (%)
Arsenic	97
Beryllium	84
Cadmium	87
Chrome	94
Chrome VI	95
Cuivre	97
Plomb	96
Manganèse	98
Mercuré	99
Nickel	73
Sélénium	63
Zinc	95

Tableau n°7 : estimation de la réduction des émissions de métaux lourds entre les deux intervalles extrêmes de concentration en poussières : < 11,5 mg/m³n et > 114 mg/m³n, déterminée à partir de la concentration moyenne en métaux de ces intervalles

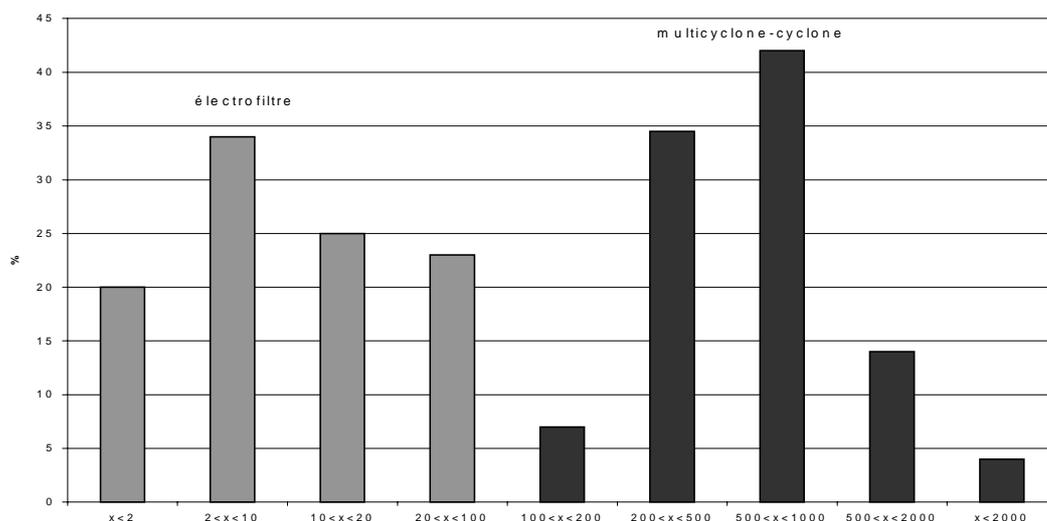


Figure n°7 : distribution des émissions de particules en fonction du dispositif d'épuration des poussières installé (teneur en poussières exprimée en mg/nm³ à 12% de CO₂)

- Une étude a été menée en 1995 par le NCASI⁽⁶⁾ sur cinq installations du secteur papetier, alimentées avec des résidus de bois humides et des écorces. Ces unités sont équipées de systèmes de dépoussiérage par multicyclone ou électrofiltre. Le facteur d'émission moyen déterminé sur l'ensemble de ces installations est de 0.40 ng I.TEQ/kg de bois brûlés.

- Durant l'hiver 1993 – 1994, une campagne de mesures à l'émission de petites unités de combustion du bois représentatives de ce secteur a été menée dans le Land de Baden-Wurtemberg⁽²⁹⁾. Ces mesures ont été effectuées sur différents combustibles, technologies de combustion et puissance des installations (40 à 800 kW).

Les teneurs en CO mesurées sont comprises entre 130 et 6450 mg/m³n pour les unités à chargement automatique et entre 1500 et 11800 mg/m³n pour les unités à chargement manuel. Les concentrations en particules varient entre 34 et 443 mg/m³n (figure n°8). Les concentrations en dioxines et furanes restent inférieures à 0.1 ng I.TEQ/m³n lors de la combustion de bois naturels.

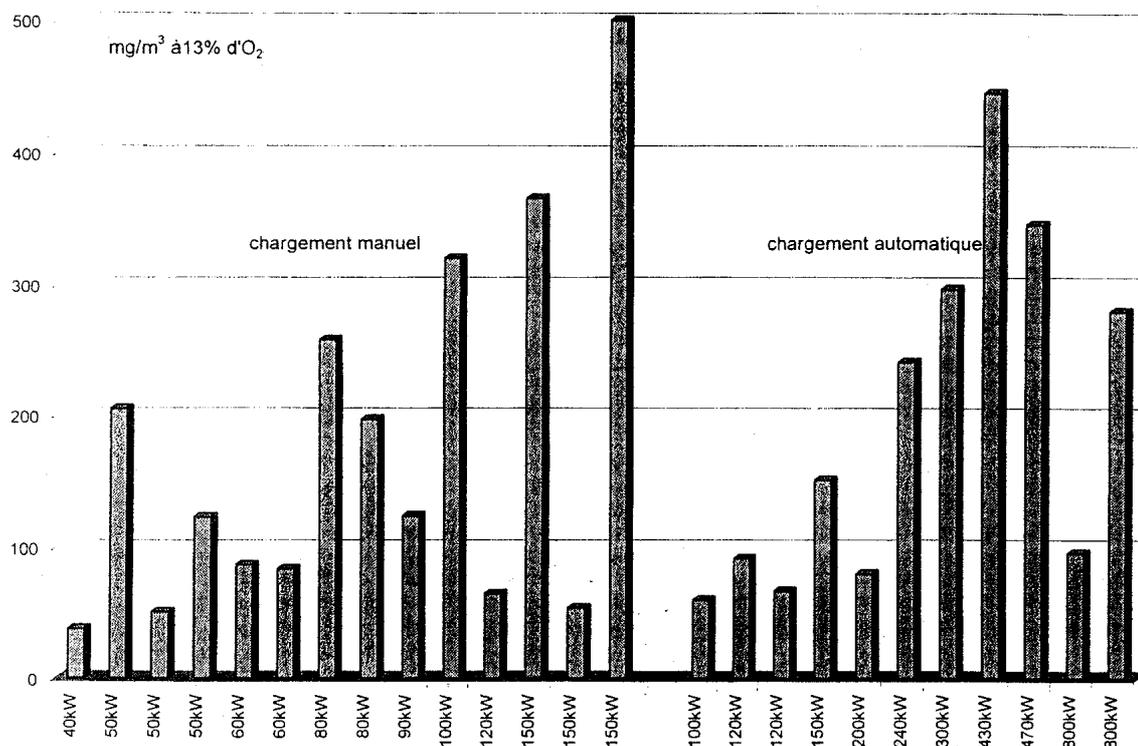


Figure n°8 : teneurs en particules mesurées à l'émission d'unités à chargement manuel et automatique

- Des mesures⁽⁷⁾ sur de petites unités pilotes ont été effectuées en Suisse en 1994. Les principaux résultats sont présentés sur le tableau n°8.

Installations automatisés	Puissance (kW)	ng ITEQ/m ³	ng I.TEQ/kg ⁽¹⁾	CO mg/m ³
Chaudière à grille	110	0.214	2.57	1300
Chaudière à grille	150	0.066	0.79	340
Chaudière à grille	150	0.173	2.08	3300

⁽¹⁾ de combustible sec consommé

Tableau n°8 : émissions de dioxines lors de la combustion de bois naturel (mélange d'essences contenant entre 40 et 60% d'humidité)

• En France, à la demande du Ministère de l'Environnement, des campagnes de caractérisation des effluents gazeux à l'émission de deux chaudières industrielles de faible puissance alimentées avec du bois non traité (résineux humides, feuillus secs) équipées de système de dépoussiérage des gaz par multicyclone ont été réalisées en 1996⁽¹²⁾. Ces mesures ont été effectuées sur deux types de foyer différents (volcan et à grille mobile). Les essais ont été réalisés à différentes charges de la chaudière. Pour les faibles charges, les mesures de dioxines d'une durée de quatre heures prennent en compte des périodes correspondant à des arrêts thermostatiques. Les résultats des mesures sont présentés sur le tableau n°9. Quelle que soit la charge de la chaudière, les teneurs en dioxines et furanes restent faibles

Installations	Combustible	Puissance (kW)	ng.I.TEQ/m ³	ng I.TEQ/kg ⁽¹⁾	CO mg/m ³
à grille mobile	Ecorces et sciures ⁽²⁾	3000	0.019	0.32	1250
volcan	Copeaux et sciures	2400	0.011	0.05	1050

⁽¹⁾ de combustible consommé

⁽²⁾ essai effectué à faible charge : 30% de la charge nominale

Tableau n°9 : mesures à l'émission de deux chaudières industrielles à différentes charges

Dans le cadre d'un programme de recherche conduit en 1996 par l'Agence de l'Environnement de NRW⁽⁹⁾, une teneur en dioxines et furanes de 0.08 ng I.TEQ/m³ a été mesurée à l'émission d'une chaudière alimentée en écorces.

5.1.2 Essais de combustion de bois adjuvantés

Les données relatives à la combustion de bois traité sont beaucoup moins nombreuses, elles ne concernent que quelques sites. Sur quatre d'entre-eux, des tests ont été réalisés avec des bois naturels et adjuvantés afin de comparer les émissions correspondantes.

5.1.2.1 Essais de combustion de bois traités

Avec du pentachlorophénol (PCP)

- Une série de test a été réalisée au Canada en 1990⁽¹⁰⁾ sur une unité de 127 MW : un foyer à projection équipé d'un multicyclone, alimenté avec du bois contaminé avec du PCP à des teneurs comprises entre 50 et 400 mg/kg. Une efficacité de destruction du PCP supérieure à 99.99% a été déterminée et une teneur moyenne en dioxines et furanes de 0.64 ng ITEQ/nm³ mesurée. Les concentrations en CO, HCl et poussières étaient respectivement de 785 ppm, 7.3 et 222 mg/nm³ lors des essais.
- L'U.S. Environmental Protection Agency⁽¹¹⁾ a mené une étude en 1998 afin de caractériser les polluants émis lors de la combustion de bois traité au pentachlorophénol. Cette étude a été effectuée en unité pilote : un foyer à grille de puissance 0.6 MW équipée d'un système d'épuration par filtre à manches et par lavage de fumées. Des essais avec du bois traité contenant 4100 mg de PCP/kg, et non traité contenant 6.7 mg de PCP/kg ont été menés dans des conditions de combustion optimisées (160% d'excès d'air, teneurs en CO inférieures à 100 ppm).

Le PCP a été totalement détruit, il n'a pas été détecté dans les fumées. Parmi les HAP, seul le naphthalène et le phénanthrène ont été détectés ce qui indique une très bonne qualité de combustion. Des composés organiques volatils tels que benzène, bromométhane, chlorométhane, butadiène, iodométhane, acétone, chloroforme, dichloroéthane, ont été détectés pour les deux types de combustible. Les composés organiques chlorés sont présents à de plus fortes teneurs lors des essais effectués avec le bois traité. Les concentrations en dioxines et furanes sont en moyenne de 1.19 ng I.TEQ/nm³ pour le bois traité et de 0.274 ng I.TEQ/nm³ pour le bois non traité. Cet écart pourrait être dû à la plus forte teneur en chlore du combustible (0.02% pour le bois non traité et 0.20% pour le bois traité, les plus fortes teneurs en dioxines mesurées lors des essais effectués avec du bois traité sont concordantes avec les fortes teneurs en HCl mesurées, approximativement 200 ppm, tandis que lors des essais avec du bois non traité ce polluant n'a pas été détecté), à la différence d'humidité ou de PCI des combustibles.

- En France⁽¹³⁾, des essais ont été menés en chaufferie collective de puissance 2.6 MW en 1997. Divers lots de palettes ont été testés, un premier de broyat de palettes tout venant afin d'établir les bonnes conditions de combustion (contenant à priori entre 3 et 10 ppm de PCP : intervalle de concentration mesurée en 1996 par le CTBA), un second lot de bois non traité au PCP mais contaminé en PCP à hauteur de 0.5 – 0.7 ppm et un troisième lot dopé au PCP et contenant entre 20 et 36 ppm de PCP. Ce dernier a également été dopé avec un autre produit de préservation, un sel d'ammonium quaternaire. Les résultats des mesures sont présentés sur le tableau n°10.

Lot	Pallettes tout venant	Bois non traité	Palettes dopées
Poussières	68	84 - 140	95 - 124
CO	400 - 870	400 - 870	400 - 870
COVT		< 20	< 20
HCL		0.2	0.6
Pb+Cr+Cu+Mn		1.96	1.7
As		< 0.03	< 0.03
Hg+Cd		< 0.03	< 0.03
PCDD/DF (I.TEQ)		1.276	2.329

Tableau n°10 : résultats des mesures exprimés en mg/nm³ sec à 11% d'O₂ sauf pour les PCDD/DF exprimés en ng/nm³ – mesures de dioxines et furanes lors de la combustion de palettes

- D'autres essais ⁽¹⁷⁾ ont également été menés en 1995 sur une installation pilote de puissance 400 kW, alimentée avec des palettes traitées au PCP (contenant 0.1 % de PCP). Une teneur en dioxines et furanes de 0.2 ng I.TEQ/nm³ (à 11% d'O₂) a été mesurée.

Avec divers produits de préservation du bois

- Afin d'estimer les rejets en dioxines et furanes des installations de combustion de bois du Land de Baden Wurtemberg⁽⁹⁾, des mesures ont été réalisées à l'émission de 6 petites unités alimentées avec du bois imprégné. Les concentrations en dioxines mesurées sont comprises entre 0.5 et 16 ng I.TEQ/nm³ avec une valeur moyenne de 4.5 ng I.TEQ/nm³.

- Des essais⁽¹⁴⁾ de combustion de bois imprégnés avec diverses substances ont été menés en Allemagne. Des déchets de bois (pin et sapin) ont été imprégnés avec l'un des produits de préservation suivant : chrome-fluor-bore (CFB), chrome-cuivre-bore (CCB), bis-(n-cyclo-hexyldiazoniumdioxyde de cuivre (Cu-HDO), fluorure d'hydrogène de potassium (KHF), fluorosilicate (SF), bore (B), insecticides dans les solvants organiques légers (LOS) (dichlorofluanid, furmecyclod, permethrine) ou créosote. Pour le test avec le KHF, des copeaux de panneaux contenant de la colle urée-formol ont été traités.

Ces déchets ont été mélangés avec du bois non traité dans un ratio de 1:4. Les essais ont été effectués sur deux types de foyers, le premier un lit fluidisé (type I) de puissance 35 kW, comprenant deux étages (préchauffage et foyer), le second un gazéifieur (type II) de 50 kW comprenant une section de pré-séchage, les gaz produits dans la chambre de gazéification sont brûlés dans la chambre de combustion. Les températures atteintes sur les foyers sont de 1000-1050°C pour le premier et de 1100-1250°C pour le second. Ces essais ont été menés sous des conditions expérimentales optimales sans l'emploi de système de captation des poussières.

Les concentrations en divers polluants mesurés sont présentées dans le tableau n°11 ci-après.

Pour le test avec le KHF, la teneur en NO_x est due à la présence de colles urée-formol dans les copeaux. Les teneurs en HCl plus élevées dans les fumées du second foyer pourraient s'expliquer par une teneur en chlore plus importante dans le bois non traité de mélange ou par les plus fortes températures atteintes dans ce foyer. Les résultats des mesures des dioxines et furanes permettent de mettre en évidence une influence significative du type de foyer. Les concentrations mesurées sur la première installation sont comprises entre 0.020 et 0.075 ng I.TEQ/m³n, sur la seconde installation entre 0.485 et 1.451 ng I.TEQ/m³n.

Composé	Foyer	CO	NO _x	Cr	Cu	COVT	PCDD/PCDF
		mg/m ³ n	ng I.TEQ/m ³ n				
CFB	I	69	144	0.9	n.d	< 1	0.075
B	I	35	141	n.d	n.d	3.9	0.040
B	II	43	174	n.d	n.d	4.5	0.485
LOS	I	155	190	n.d	n.d	2.4	0.020
LOS	II	126	181	n.d	n.d	6.9	0.698
Cu-HDO	I	99	143	n.d	0.3	2	0.022
Cu-HDO	II	37	146	n.d	4.2	2	0.592
Créosote	II	55	155	n.d	n.d	7.7	0.028
Créosote	I	62	225	n.d	n.d	1.8	0.088
CCB	I	24	137	1.9	1	< 1	0.033
CCB	II	55	145	0.4	0.3	2.8	1.451
SF	II	67	163	n.d	n.d	4.2	0.171
KHF	I	301	280	n.d	n.d	2.3	0.033

n.d : non détecté

Tableau n°11 : teneurs en polluants émis lors de la combustion de bois imprégnés (ramenées à 11% d'O₂)

5.1.2.2 Essais de combustion de panneaux

- Des mesures ⁽⁷⁾ sur une unité pilote ont été effectuées en Suisse en 1994. Les résultats sont présentés sur le tableau n°12.

Installation	Puissance(kW)	ng I.TEQ/m ³	ng I.TEQ/kg ⁽¹⁾	CO mg/m ³
Chaudière à grille	150	0.076	0.91	60
Chaudière à grille	150	0.024	0.29	3000

⁽¹⁾ de combustible sec consommé

Tableau n°12 : émissions de dioxines lors de la combustion de panneaux de particules

- Une étude ⁽¹⁴⁾ a également été effectuée en Allemagne sur une chaudière de 400kW lors de la combustion de panneaux. Les valeurs mesurées sont comprises entre 0.063 et 0.186 ng I.TEQ/nm³.
- Afin d'estimer les rejets en dioxines et furanes des installations de combustion de bois du Land de Baden Wurtemberg ⁽²⁹⁾, des mesures ont été réalisées à l'émission de 3 petites unités alimentées avec des copeaux de panneaux de particules. Les concentrations mesurées sont inférieures à 1ng I.TEQ/nm³.
- Des essais⁽¹⁷⁾ ont été menés à l'initiative du Syndicat Général des Fabricants de panneaux à Base de Bois sur des unités pilotes de 40 et 116 kW en 1993 et 1995 et sur une chaudière industrielle de 7 MW alimentée manuellement en 1995 afin de caractériser les polluants issus de la combustion des principaux types de panneaux fabriqués en France. Des essais avec des échantillons de bois massif de mêmes essences que celles employées pour les panneaux ont été également effectués. Ces essais sont représentatifs des essences, des encollages et des catalyseurs employés dans la fabrication de panneaux. Aucune mesure de dioxines et furanes n'a été effectuée lors de ces essais.

Panneaux	diverses essences	encollés UF	encollés MUF	encollés SUF	encollés MUF	encollés PF	encollés PU	bois massif
Unité	40 kW	116 kW		expérimentale				
CO		80 – 1070	30 – 220	56	112	56	56	
NO _x	100 - 1230	100 – 760	130	690	1080	220	345	110
HCl	0.1 - 34			12	34	2	2	2

UF : urée-formol, MUF : mélamine urée-formol, PF : phénol-formol, PU : polyuréthane

Tableau n°13 : résultats de mesures de CO, NO_x et HCl (exprimés en mg/nm³ sec à 11% d'O₂) lors de la combustion de panneaux de particules sur unité pilote

Les teneurs en HCl ont été mesurées lors des essais effectués sur les panneaux châtaignier et pin encollés MUF ainsi que sur le MDF. Elles varient de 57 à 74 mg/nm³ (à 11% d'O₂).

Les fortes teneurs en CO sont liées à l'humidité d'environ 30% des plaquettes okoumé.

Produits	CO	NO _x
Plaquettes okoumé	1008 - 1308	235 - 271
Plaquettes okoumés + colle	5656 - 7866	147 - 251
Bois massif châtaignier	473	387
Panneaux châtaignier encolés UF	153 - 296	400 - 513
Panneaux châtaignier encollés MUF	54 - 264	218 - 361
Bois massif pin	316 - 899	144 - 150
Panneaux pin encollés UF	530 - 761	504 - 560
Panneaux pins encollés MUF	100 - 416	476 - 618
Panneaux pin revêtements mélaminés	128 - 253	347 - 506
Déclignures contreplaqués encollés MUF	198 - 206	595 - 745
Déclignures contreplaqués encollés phénol	323 - 491	242 - 338
Panneaux durs fibres	105	214
MDF	51 - 243	498 - 688
Panneaux feuillus encollés UF	544 - 858	451 - 592

Tableau n°14 : résultats de mesure de CO et NO_x (exprimés en mg/nm³ sec à 11% d'O₂ pour les NO_x et en mg/nm³ sec pour le CO) lors de la combustion de panneaux sur chaudière industrielle

- Une campagne de mesure⁽¹⁶⁾ sur une unité industrielle de 3 MW alimentée en panneaux particules bruts a été effectuée en 1995 en France. Les résultats sont présentés sur le tableau n°15.

Foyers	Combustible	Puissance(kW)	ng I.TEQ/m ³	ng I.TEQ/kg ⁽¹⁾	CO mg/m ³
à grille mobile	écorces et sciures ⁽²⁾	3000	0.019	0.32	1250
volcan	copeaux et sciures	2400	0.011	0.05	1050

⁽¹⁾ de combustible consommé

⁽²⁾ essai effectué à faible charge : 30% de la charge nominale

Tableau n°15 : mesures à l'émission d'une chaudière industrielle alimentée en broyat de panneaux de particules

- Dans le cadre d'un programme de recherche mené par l'Agence de l'Environnement de NRW⁽⁹⁾, des mesures de dioxines et furanes ont été effectuées sur une chaudière à grille de 11 MW alimentée en écorces de hêtre, morceaux de placage, copeaux, poussière de ponçage et divers autres résidus de la fabrication de panneaux de contreplaqués dont certains sont traités avec des retardateurs de flamme et des pesticides. Le système d'épuration des fumées est constitué par un cyclone et un électrofiltre. Des teneurs en dioxines et furanes de 0.002 et 0.007 ng ITEQ/m³ ont été mesurées, respectivement lors du fonctionnement normal de cette unité et lors de son démarrage.

Dans le cadre de ce programme d'autres mesures ont été également effectuées sur une installation de fabrication de panneaux de fibres, en sortie de l'unité de séchage et de la presse. Des teneurs en dioxines et furanes de 0.25 et 0.0059 ng I.TEQ/m³ ont été respectivement mesurées sur ces deux points.

5.1.2.3 Essais de combustion de déchets de l'industrie de l'ameublement

- Des mesures⁽³¹⁾ à l'émission de deux installations, de taille différente, ont été effectuées aux Pays Bas en 1994 dans le cadre d'un projet de recherche. Ces unités sont alimentées en déchets de l'industrie de l'ameublement contenant des colles, des vernis et des plastiques.

La première installation est un foyer à grille de puissance 3.5 MW équipé d'un dépoussiéreur multicyclone. La teneur en dioxines et furanes mesurée est de 0.4 ng I.TEQ/m³n (à 11% d'O₂), soit un facteur d'émission de 3.5 µg I.TEQ/t de bois brûlé. Les essais se sont déroulés dans de mauvaises conditions de combustion, 4920 mg/nm³ de CO. La teneur en HCl mesurée était de 21 mg/nm³.

La seconde installation est un foyer à double chambre de combustion de puissance 0.3 MW équipé d'un cyclone. La teneur en dioxines et furanes mesurée est de 1.0 ng I.TEQ/m³n (à 11% d'O₂), soit un facteur d'émission de 6.7 µg I.TEQ/t de bois brûlé. Les teneurs en CO et en HCl étaient, respectivement de 1252 et 39 mg/nm³.

- Dans le cadre d'un programme de recherche mené par l'Agence de l'Environnement de NRM⁽⁹⁾, des mesures de dioxines et furanes ont été effectuées sur une unité de 1 MW alimentée en sciures, poussières de ponçage et divers morceaux de bois contenant des vernis et des colles provenant d'une fabrique de meubles. Cette chaudière est équipée d'un système de dépoussiérage par cyclone et filtre à manche conçu pour fonctionner à une température de 250°C et permettant d'obtenir une teneur en poussières inférieure à 10 mg/m³. Une concentration en dioxines et furanes de 5.77 ng I.TEQ/m³ a été mesurée. Des injections de chaux et d'un mélange de chaux et de coke de lignite réduisent respectivement de 34 et 79% ces émissions.

5.1.2.4 Essais de combustion de bois adjuvantés

- Un test a été réalisé dans le cadre du programme CARB⁽⁴⁾ en 1988 aux Etats Unis à l'émission de deux chaudières à grille mobile à projection, de puissance totale 94 MW, et équipées chacune d'un électrofiltre avant rejet des gaz de combustion à l'atmosphère par une cheminée commune. Les essais ont été effectués avec le combustible habituel de la chaudière (bois propre) et avec un mélange comprenant 70% de bois propre et 30% de déchets de bois de démolition.

A l'exception de l'arsenic et du benzène, tous les polluants recherchés ont été mesurés à de plus faibles teneurs lors de l'essai mené avec le mélange contenant des déchets de démolition. Ces essais ont été réalisés avec une mauvaise qualité de combustion (1450 ppm de CO environ) ce qui explique les teneurs relativement élevées enregistrées en composés organiques. Le facteur d'émission en dioxines et furanes mesuré pour le bois de démolition lors de cette étude est de 0.82 ng I.TEQ/kg de bois brûlé.

- Une campagne de mesure des dioxines et furanes sur une chaudière alimentée en bois de démolition de toiture contenant des matériaux isolants, a été menée en 1993 aux Pays Bas⁽³¹⁾. L'installation est constituée d'un foyer à grille, de puissance 2.3 MW, équipé d'un système de dépoussiérage des fumées par multicyclone. Une teneur en dioxines et furanes de 0.7 ng I.TEQ/nm³ (ramenée à 11% d'O₂) a été mesurée à l'émission de cette installation, ce qui correspond à un facteur d'émission de 6 µg I.TEQ/t de bois brûlé. Les teneurs en CO et en HCl étaient, respectivement de 390 et 349 mg/nm³.
- Des mesures⁽⁷⁾ sur de petites unités industrielles ont été effectuées en Suisse en 1994 (tableau n°16).

Installation	Puissance(kW)	ng I.TEQ/m ³	ng I.TEQ/kg ⁽³⁾	CO mg/m ³
chaudière à grille	150	14.2	170.7	250
chaudière à grille ⁽¹⁾	410	14.42	173.3	345
foyer à grille ⁽¹⁾	850	2.7	26	70
foyer à grille ⁽²⁾	1800	9.57	92	510

⁽¹⁾ épuration des fumées au moyen d'un cyclone

⁽²⁾ épuration des fumées au moyen d'un cyclone et d'un filtre électrostatique

⁽³⁾ de combustible sec consommé

Tableau n°16 : teneurs en dioxines et furanes lors de la combustion de copeaux de bois de démolition de bâtiment (teneur en humidité 10-15%)

5.1.2.5 Essais de combustion de traverses de chemin de fer

- Des essais de combustion de traverses de chemin de fer⁽⁵⁾ ont été réalisés sur trois sites aux Etats unis (tableau n°17).

Une campagne de mesure a été réalisée à Bay Front en 1986 sur une chaudière à grille mobile datant de 1953, de puissance 59 MW et équipée d'un système de dépoussiérage mécanique de fumées.

D'autres essais ont été réalisés en 1987 sur une chaudière de puissance et de type similaire à la précédente mais mieux équipée au niveau du système de dépoussiérage des fumées. Le combustible de l'unité est constitué d'un mélange de 24% de traverses de chemin de fer, 65% de bois non traité et 11% de charbon.

Enfin sur le dernier site des essais comparatifs entre combustion de bois propre et de traverses ont été effectués sur une chaudière à projection équipée d'un système de dépoussiérage des fumées par électrofiltre et d'un système de réduction sélectif non catalytique des oxydes d'azote (SNCR).

Puissance de l'unité	59 MW	53 MW		
Foyer	PG ⁽¹⁾	PG	PG	
Système d'épuration	cyclone		cyclone - laveur - SNCR	
Combustible	traverses	mélange	bois propre	traverses
Arsenic($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		0.82	nd	0.83
Cadmium ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		2.31	nd	0.80
Chrome ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		93.1	nd	nd
Cuivre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			1.67	3.67
Plomb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		2.11	1.67	1.17
Manganèse ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			31.5	1.50
Mercure ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		1.09	0.33	0.45
Nickel ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			nd	nd
Sélénium ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			nd	nd
Zinc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			11.67	4.50
Formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2644	nd	292.4	138.0
Acétaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1258	nd	79.2	26.6
Acroléine ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	201418	nd		
Benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8894	126	257	162
Phénol (ng/m^3)	523	nd		
Chlorophénols (ng/m^3)		nd		
Naphtalène (ng/m^3)		nd		
Benzo(a)anthracène (ng/m^3)		26.30	nd	nd
Benzo(a)pyrène (ng/m^3)	nd	20.08	nd	nd
Chrysène (ng/m^3)		255.3	nd	nd
Toluène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			nd	23.49
HCl (ppm)		nd		
Poussières (mg/m^3)	436	20	2	1
NO _x (ppm)	206		79	87
CO (ppm)	112	46	238	468
SO ₂ (ppm)			nd	16
COVTNM ⁽²⁾ (ppm)		60	6	9

⁽¹⁾ PG : foyer à projection à grille mobile

⁽²⁾ composés organiques volatils non méthaniques

Tableau n°17 : émissions liées à la combustion de traverses de chemin de fer

Les résultats du premier site mettent en évidence des teneurs en aldéhydes et benzène relativement forte dans des conditions de combustion plutôt bonnes (teneur en CO de 112 ppm).

Les essais comparatifs ne font pas apparaître de différences significatives, en ce qui concerne les polluants recherchés, entre la combustion de bois propre et celle de traverses de chemin de fer. La concentration en dioxyde de soufre est plus forte du fait de la teneur en soufre des traverses. La teneur de certains métaux est plus élevée tandis que celle de certains composés organiques est plus faible mais de façon assez marginale dans l'ensemble.

5.1.2.6 Essais de combustion mixte bois/ordures ménagères

- Ces essais⁽¹⁸⁾ ont été effectués en Finlande sur une unité de gazéification de 5 MW équipée d'un système de filtration par multicyclone alimentée habituellement avec des copeaux de bois. Trois combustibles ont été testés : bois non souillé (test n°1), un mélange déchets de bois/ordures ménagères (dans les proportions : 40/60 en poids sec – test n°2) et un mélange bois non souillé/ordures ménagères (15/85 en poids sec – test n°3).

Polluants	Test n°1	Test n°2	Test n°3
Poussières (mg/m ³ n)	64	318	294
Hg (µg/m ³ n)	62	85	84
Cd (µg/m ³ n)	7	5	7
Pb (µg/m ³ n)	13	27	27
Zn (µg/m ³ n)	1	30	32
NOx (ppm)	300	350	360
SO2 (ppm)	30	100	130
HCl (mg/m ³ n)	4	200	290
Chlorophénols (µg/m ³ n)	0.1	1.3	1.8
Chlorobenzènes (µg/m ³ n)	< 0.1	0.9	1.1
HAP (µg/m ³ n)	7.2	6.8	2.5
TCDD (ng éq Eadon/m ³ n)		0.8	1.1

Tableau n°18 : concentrations en polluants (ramenée à 10 % de CO₂) – émissions liées à la combustion mixte bois/ordures ménagères

Les dioxines et furanes n'ont pu être décelés lors de l'essai effectué avec des copeaux de bois non souillés. L'ajout d'ordures ménagères se traduit par :

- une augmentation des concentrations en SO₂, NO_x et HCl étant donné le soufre, l'azote et le chlore contenu dans ces déchets,
- une augmentation de la teneur en poussières suivant la proportion de chaque combustible et leur taux de cendres,

- la concentration en chlorophénols, et en particulier celle en pentachlorophénol, augmente de 0.01 (test n°1) à 0.05 (test n°2) et 0.09 µg/m³n ramenée à 10% de CO₂ (test n°3) en fonction de la quantité d’ordures ménagères ajoutée au combustible bois,
- les teneurs en métaux lourds mesurées sont faibles à l’exception de celle du Zn.

5.2 FOYERS DOMESTIQUES

L’analyse des suies et des cendres des foyers domestiques a permis de mettre en évidence, dès le début des années 80, la formation des dioxines et furanes lors de la combustion du bois. Depuis de nombreuses études ont été menées afin de quantifier les teneurs en polluants dans les cendres et de connaître leur variabilité en fonction du type de foyer et du combustible.

Plus tardivement, des mesures à l’émission des foyers domestiques ont été réalisées, au Danemark notamment au début des années 90. Les teneurs très élevées en dioxines et furanes mises en évidence lors de ces premiers essais n’ont pas été confirmées par la suite, en 1994, par les auteurs de cette étude⁽²⁷⁾. D’autres essais ont été également menés en Suisse, en 1994, afin de quantifier les rejets sur divers combustibles et foyers, et plus récemment, en 1998, en Allemagne afin d’estimer les rejets de foyers alimentés avec du bois adjuvantés avec certains déchets.

5.2.1 Analyse des suies et des cendres

Les premières analyses de suies datent du début des années 80⁽¹⁹⁾. La technique analytique n’étant alors pas suffisamment au point, seuls quelques groupes de congénères de dioxines et furanes ont pu être identifiés lors des tests.

Les résultats de ces premiers essais ont été confirmés par des analyses de suies collectées sur des foyers domestiques alimentés en bois naturel et situés dans trois régions des Etats Unis^(20 et 21, 1982-1983). Les résultats de cette étude montrent de grandes variations de concentrations entre les différents échantillons analysés, attribués à une différence de conception des unités, aux conditions d’échantillonnage et à une possible contamination des échantillons de bois.

Des cendres et des suies provenant de poêles et de cheminées ont également été analysées au Canada en 1985⁽²²⁾. Les teneurs mesurées varient de façon importante en fonction du type d’unités.

En 1988, Thoma⁽³⁰⁾ a mesuré des concentrations moyennes de 900, 1500 et 7500 ng I.TEQ/kg respectivement sur des cendres de poêles bois/charbon, d’une chaudière de chauffage central au bois et d’un poêle à bois.

Des études plus récentes en Allemagne^(23, 1992) et au Canada^(25, 1995) mettent en évidence des teneurs en dioxines et furanes dans les suies, respectivement de 720 et 86 à 335 ng I.TEQ/kg ; avec pour une unité située sur la côte canadienne brûlant du bois chargé en sel marin, une teneur de 7706 ng I.TEQ/kg.

Enfin des essais effectués en Bavière⁽²⁴⁾ sur 81 échantillons de suies, ont également permis de noter une grande variabilité des concentrations en fonction du couple bois/foyer, des teneurs en dioxines et furanes comprises entre 4 et 42048 ng I.TEQ/kg ont été mesurées dans des suies.

Les valeurs élevées sont probablement le résultat du contact prolongé entre les suies déposées et les gaz de combustion dans des conditions favorables à la formation des polluants ou aux conditions de combustion et à la nature du combustible utilisées. La teneur moyenne en dioxines mesurée lors de cette étude s'élève à 2643 ng I.TEQ/kg.

D'autres essais, également effectués en Allemagne, en 1998, ont permis d'estimer les teneurs en dioxines dans les cendres obtenues sur des foyers alimentés avec des déchets de bois. Les résultats sont présentés sur la figure n°9.

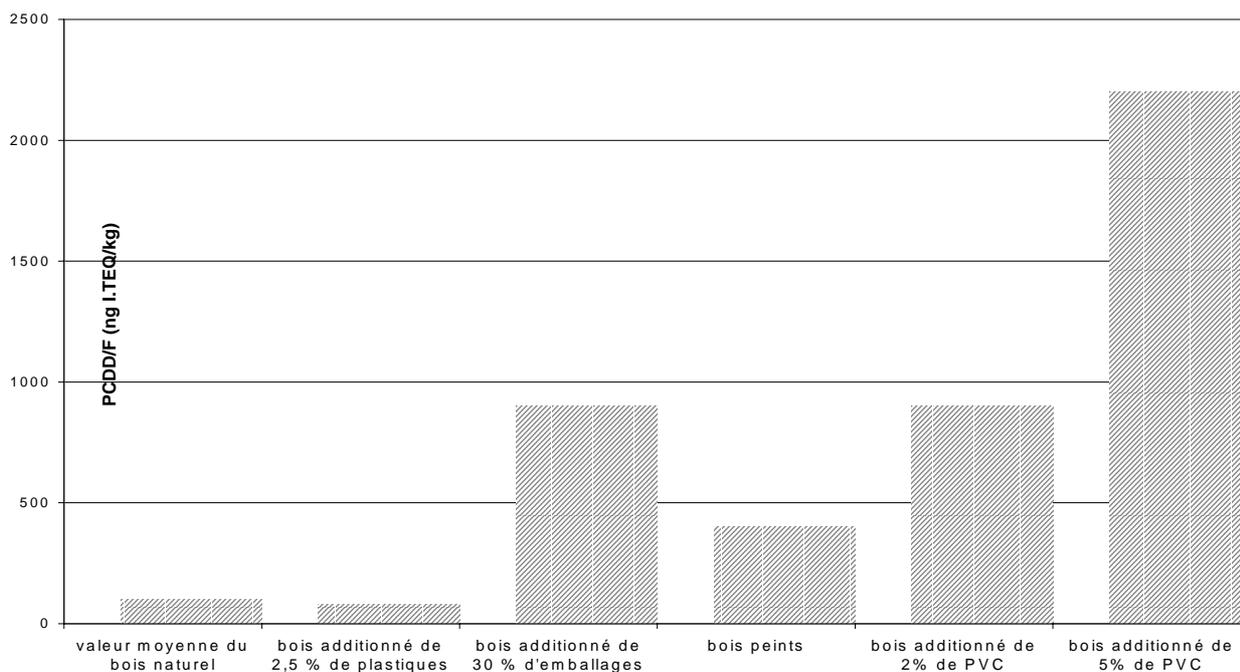


Figure n°9 : concentrations en dioxines et furanes dans des suies de foyers domestiques alimentés avec divers déchets de bois contenant du chlore

5.2.2 Mesures à l'émission

Plusieurs études ont été menées dans divers pays afin d'estimer les émissions de dioxines et furanes des foyers domestiques.

- Tout d'abord des investigations ont été menées au Danemark en 1990 et 1991 par Vikelsoe et al.⁽²⁷⁾ sur différents combustibles. Lors de la combustion de briquettes de bois et de bois imprégné avec du PCP, des facteurs d'émission de 300 et 6500 ng I.TEQ/kg ont été respectivement déterminés. Durant la répétition de ces tests en 1994, des valeurs considérablement plus faibles ont été obtenues. Ces derniers essais sont décrits ci-après.

Quatre poêles à bois ont été testés sous deux conditions opératoires au moyen d'un banc équipé d'un tunnel de dilution. Les poêles n°1 et 2 sont largement utilisés au Danemark, le n°3 est une version améliorée du n°2 et le n°4 est un prototype expérimental à deux étages de combustion. Les poêles n°1, 2 et 3 sont des modèles commercialisés. La puissance de ces unités est comprise entre 5.6 et 6.6 kW.

Trois essences de bois ont été employées, le hêtre en tant que combustible de référence pour cette étude, le bouleau en tant que combustible de référence danois et le sapin, essence la plus employé au Danemark.

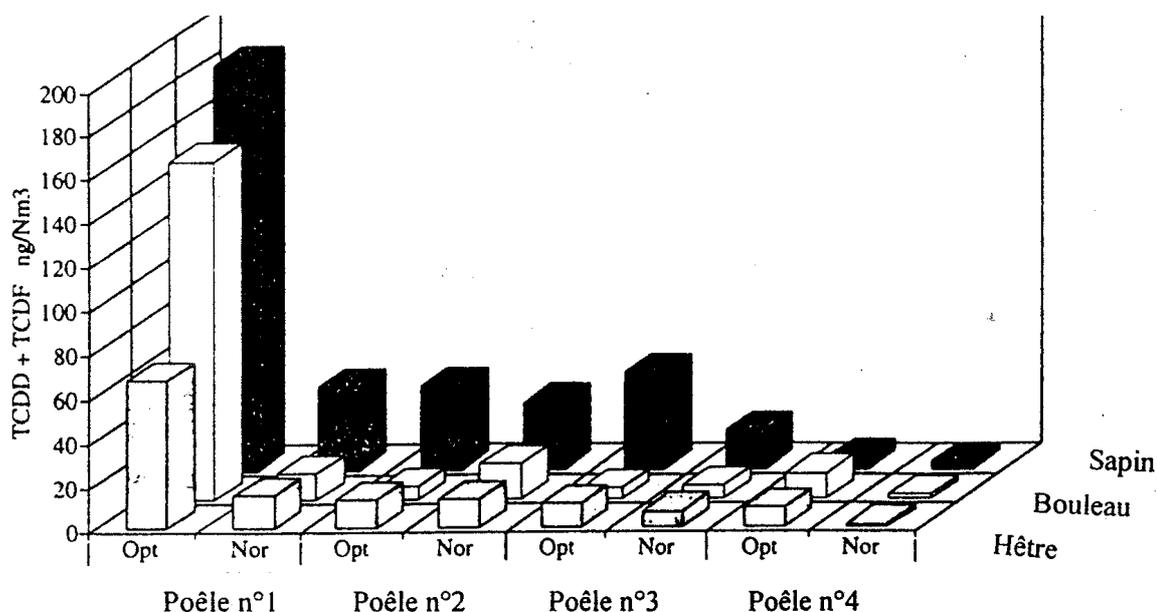
Chaque essai a nécessité 3 à 4 chargements de 4 à 8 kg chacun. Le bois a été prélevé en forêt, coupé en morceaux de 30 cm de longueur et séché en étuve jusqu'à atteindre une humidité de 18%. Deux conditions opératoires ont été testées : une condition dite "optimale" en contrôlant l'essai de façon à minimiser les émissions de CO et d'hydrocarbures et une condition dite "normale" en opérant de façon tout à fait ordinaire (la teneur en CO est alors relativement élevée).

Des différences significatives ont été observées entre les poêles, les combustibles et entre les conditions opératoires optimales et normales pour chaque unité. Les émissions du poêle expérimental n°4 sont plus faibles que celles des autres poêles, tout comme celles du poêle n°1 par rapport à celles des poêles n°2 et 3.

Les émissions correspondant aux deux essences de bois hêtre et bouleau ne sont pas significativement différentes mais sont plus faibles que celles du sapin, en moyenne de 42%.

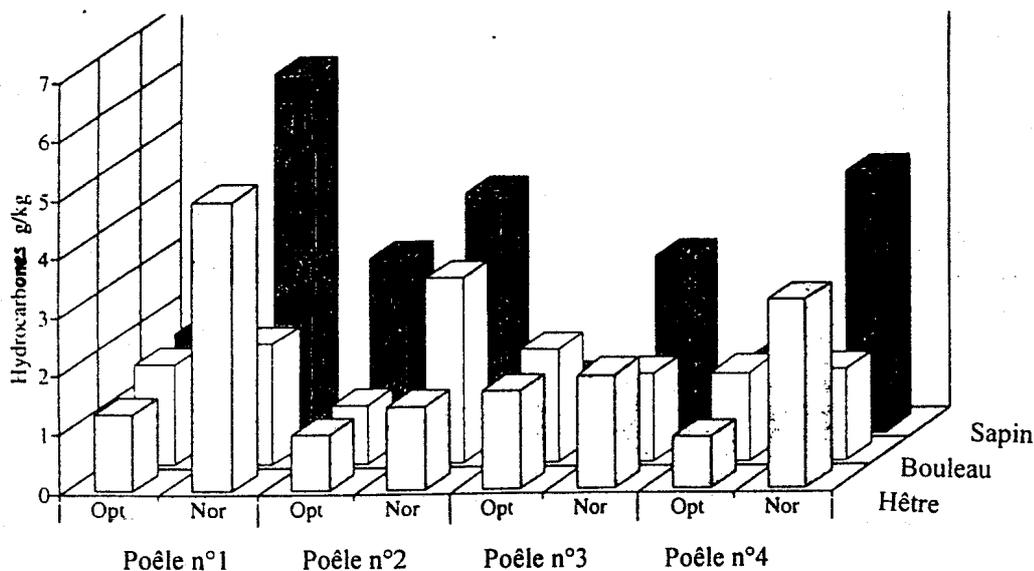
Les conditions opératoires optimales conduisent uniquement pour les poêles n°3 et 4 à des émissions significativement supérieures, en moyenne de 230% par rapport aux conditions normales. Aucune corrélation significative n'a été observée entre les émissions de dioxines et les teneurs en HCl ou en hydrocarbures dans les fumées. Le groupe de congénère prédominant pour l'ensemble des essais est le TCDF. La concentration moyenne en dioxines et furanes émise par les poêles à bois a été estimée à 12 ng/m³, correspondant à 0.18 ng I.TEQ/m³ et à un facteur d'émission de 1.9 ng I.TEQ/kg de bois brûlé.

Les deux figures suivantes n°9 et 10 présentent les évolutions des concentrations en TCDD/F et en hydrocarbures en fonction du poêle et de l'essence du bois.



opt : conditions optimales, nor : conditions normales

Figure n°10 : concentrations en TCDD + TCDF à l'émission de poêles à bois



opt : conditions optimales, nor : conditions normales

Figure n°11 : concentrations en COVT à l'émission de poêles à bois

- Une étude conduite par Bröker et al.⁽⁹⁾ en Allemagne en 1992 sur des unités de chauffage domestique au bois (hêtre) dans des conditions proches des conditions opératoires normales a permis de déterminer des facteurs d'émission de 0.7 et 1.2 ng I.TEQ/kg de bois brûlé pour les poêles et les cheminées à bois.
- Une étude a été menée par Schatowitz et al.⁽⁷⁾ en Suisse en 1994 afin de connaître les émissions des dioxines et furanes liées à la combustion du bois en foyer domestique. Divers combustibles ont été testés : du bois non souillé additionné ou non de déchets ménagers et du charbon de bois utilisé pour griller les viandes dans les barbecues (tableau n°19).

La combustion de bois naturel dans des conditions défavorables (teneur en CO élevée) entraîne une augmentation des émissions de dioxines, à l'exception des essais effectués sur les foyers domestiques ouverts et fermés. Les émissions de dioxines sont légèrement plus faibles avec un foyer ouvert comparées à celles obtenues avec un foyer fermé, même si les teneurs en CO sont plus fortes.

Les émissions de dioxines liées à la combustion de déchets ménagers sont extrêmement fortes, probablement dû à la présence de PVC. Rappelons que les Suisses payent la destruction des déchets en fonction des quantités produites ce qui peut conduire à éliminer une partie des déchets dans les foyers domestiques.

combustion de bûches de bois naturel (hêtre) - 12-16% d'humidité				
Installations	Puissance (kW)	ng I.TEQ/m ³	ng I.TEQ/kg ⁽¹⁾	CO mg/m ³
foyer domestique ouvert	6	0.064	0.77	6300
foyer domestique fermé	6	0.104	1.25	3700
poêle à bûches	35	0.019	0.23	560
poêle à bûches	35	0.034	0.41	10200
combustion en foyer fermé de combustibles spéciaux				
Combustibles	Puissance (kW)	ng I.TEQ/m ³	ng I.TEQ/kg ⁽¹⁾	
charbon de bois	6	0.028	0.04	
partie combustible de déchets ménagers (2/3 papiers, cartons + 1/3 plastiques)	6	114.4	3230	

⁽¹⁾ de combustible sec consommé

Tableau n°19 : teneurs en dioxines et furanes à l'émission de foyers domestiques alimentés en bois naturel et en combustibles spéciaux

- Des mesures⁽³¹⁾ à différentes charges ont été réalisées à l'émission d'un poêle à bois, de puissance 23 kW, et de foyers ouverts (cheminées), au Pays Bas, en 1994, afin de connaître les émissions de dioxines et furanes de ces unités. Les résultats sont présentés sur les tableaux n°20 et 21

Puissance ou charge (kW)	23	17	13
CO (mg/m ³ n)	> 6800	> 10660	> 12100
COVT (mg/m ³ n)	1480	> 2870	> 1800
PCDD/F (ng I.TEQ/m ³ n)	0.26 – 0.36	0.12 – 0.19	0.31 – 0.32
PCDD/F (µg I.TEQ/t)	2.4 – 3.3	1.0 – 1.6	2.5 – 2.6

Tableau n°20 : Mesure à l'émission d'un poêle à bois à différentes charges (résultats exprimés sur gaz sec)

Unités avec	Feux sur grille	Feux sur sole
Puissance (kW)	29	26
CO (mg/m ³ n)	1560	1450
PCDD/F (ng I.TEQ/m ³ n)	1.2	0.5
PCDD/F (µg I.TEQ/t)	28.5	13.0

Tableau n°21 : Mesure à l'émission de deux foyers ouverts (résultats exprimés sur gaz sec)

- Des mesures de dioxines ont été effectuées en Allemagne, en 1998, par Launhardt et al.⁽²⁸⁾ sur différentes petites unités de chauffage allant de 7 à 30 kW conçues pour brûler divers combustibles solides (deux poêles à bois, l'un de technologie récente, l'autre ancienne, deux petites chaudières, l'une à bois et l'autre à fioul). 60 tests d'une durée allant de 3 à 6 heures ont été effectués.

Les émissions de HAP varient pour le bois naturel entre 360 et 35 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{n}$ ramenées à 13% d'oxygène (figure n°12). Cette large fourchette s'explique par des différences de technologies et d'humidité des combustibles. Les combustibles contenant entre 15 et 20% d'eau, brûlés dans un poêle de technologie récente, fournissent les meilleurs résultats en terme de CO, COVT et HAP. A contrario, les émissions de dioxines et furanes qui sont restées faibles durant l'ensemble des essais, comprises entre 4 et 21 $\text{pg I.TEQ}/\text{m}^3\text{n}$ à 13 % d' O_2 , ne semblent pas dépendre de la technologie employée. Une augmentation notable de la teneur en dioxines est obtenue lorsque l'on ajoute avec le bois, des déchets contenant du chlore. L'ajout de 2 et 5 % de PVC entraîne la formation de dioxines en plus forte concentration, respectivement de 574 et 900 $\text{pg I.TEQ}/\text{m}^3\text{n}$, correspondant à une augmentation d'un facteur 40 par rapport au bois naturel. L'incinération de bois peints donne des résultats similaires : 458 et 952 $\text{pg I.TEQ}/\text{m}^3\text{n}$. La combustion de papiers, cartons et prospectus divers, conduit également à une augmentation de la teneur en dioxines, comprise entre 38 et 75 $\text{pg I.TEQ}/\text{m}^3\text{n}$.

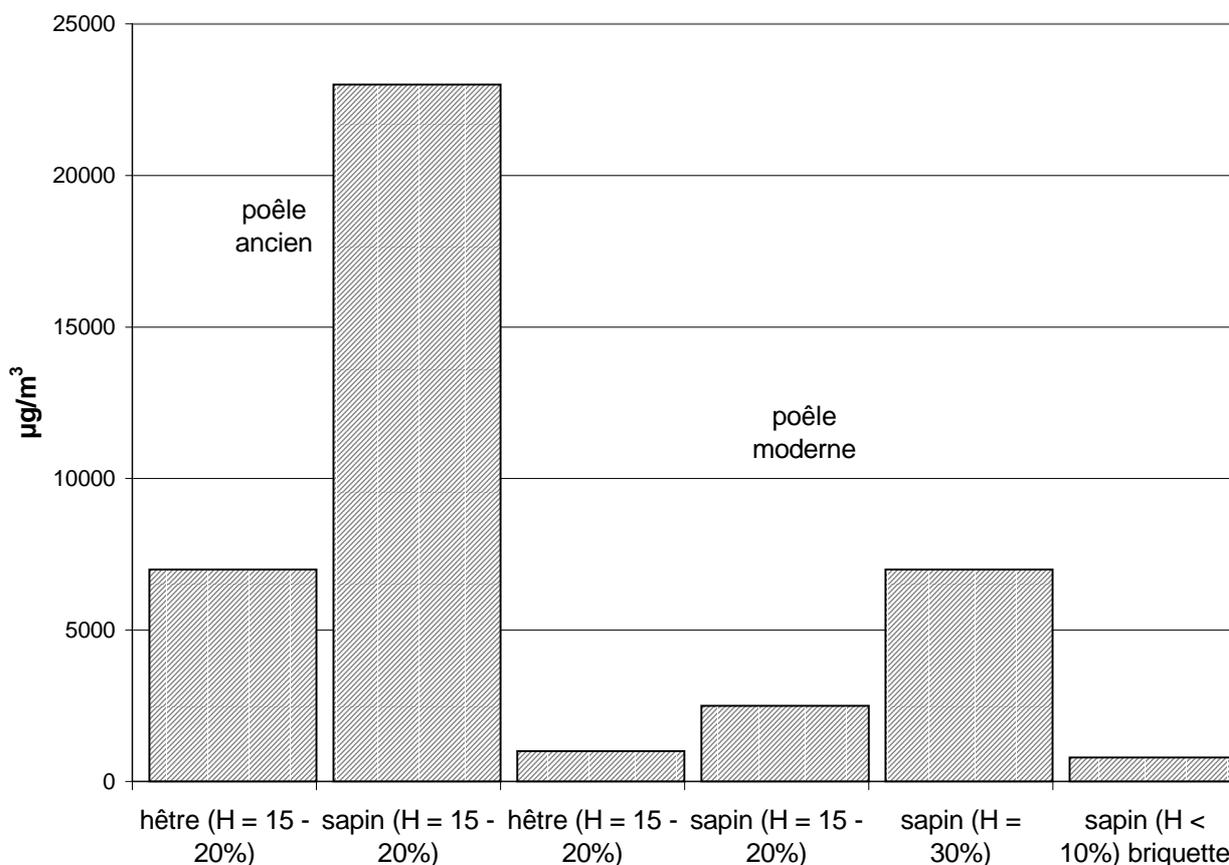


Figure n°12 : émissions de HAP (somme de 16 composés – liste EPA) en fonction de l'essence et de l'humidité du bois

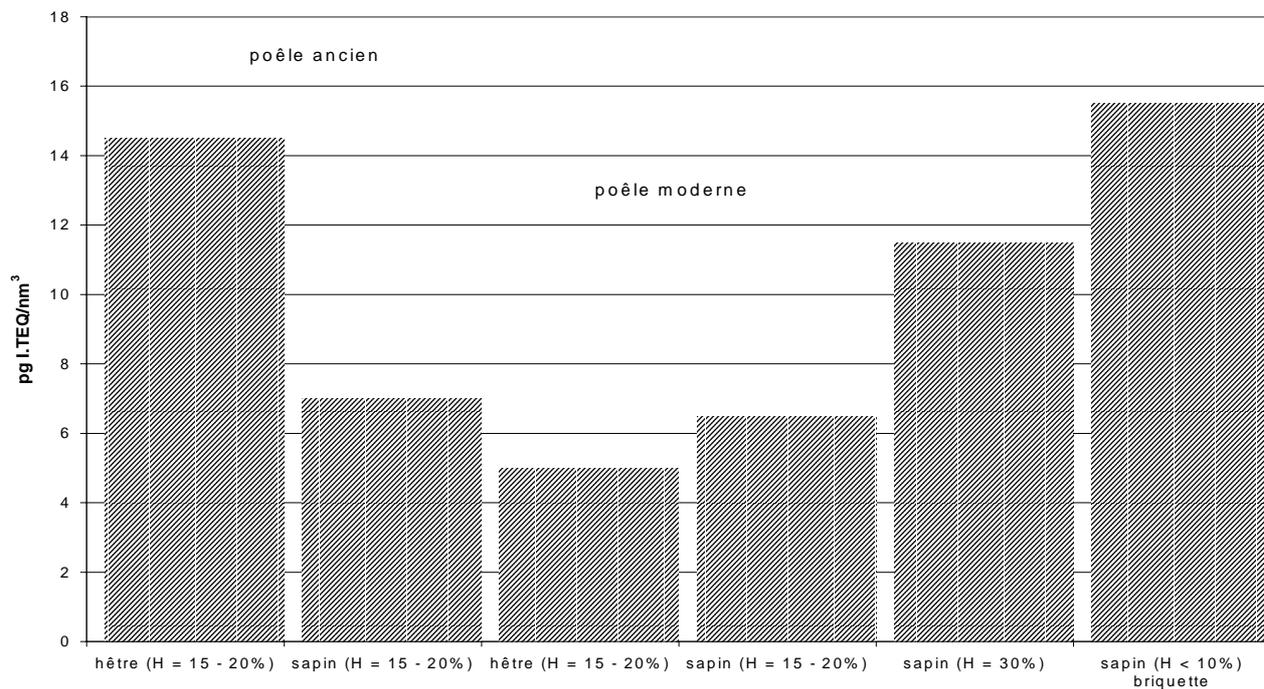


Figure n°13 : émissions de PCDD/F en fonction de l'essence et de l'humidité du bois

6 SYNTHÈSE DES DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

De nombreuses essais ont été réalisés afin de déterminer les polluants émis par les chaudières à bois, mais tous ne sont pas représentatifs des conditions réelles de marche des installations industrielles car ces tests ont été réalisés sur des unités pilotes de faibles tailles dans des conditions optimales de marche qui permettent seulement de hiérarchiser les problèmes en comparant les résultats obtenus entre-eux.

Les facteurs d'émissions tirés de la littérature internationale ne sont pas toujours transposables en France, en particulier lors de la combustion de bois traité, du fait de la diversité des produits de traitement employés d'un pays à l'autre et de la représentativité des installations faisant l'objet d'essais. En effet, les unités pilotes permettent la réalisation d'essais dans des conditions assez différentes des conditions réelles de marche des installations industrielles, et les grosses unités de combustion pouvant être équipées de systèmes d'épuration performants ou les installations dédiées à brûler certains déchets que l'on rencontre notamment aux Etats Unis, s'apparentent souvent davantage à nos unités d'incinération de déchets industriels.

6.1 CHAUDIERES A BOIS INDUSTRIELLES

Un tableau récapitulatif (n°22) relatif aux émissions de dioxines et furanes liées à la combustion de bois naturel, rassemblant les données de la littérature internationale, est présenté ci-après.

Au vu de ces données, un facteur d'émission moyen de **0.77 ng ITEQ/kg** peut être retenu pour **la combustion du bois naturel** en chaudière industrielle en prenant en compte l'ensemble des données recueillies à l'exception des données de l'EPA. Ces dernières sont soit exprimées en valeur brutes et leur expression en équivalent toxique est délicate à estimer, soit liées à la combustion de bois stockés dans l'eau de mer, elles sont alors peu représentatives. Ce facteur d'émission est légèrement inférieur à celui retenu par l'EPA qui s'élève à 0.82 ng I.TEQ/kg.

Ce facteur d'émission est peu influencé par la taille des installations, les équipements de dépollution installés ou la charge des unités.

En prenant comme hypothèse que l'ensemble des chaudières françaises consomme du bois naturel (1 900 000 tonnes par an⁽¹⁾), le flux annuel de dioxines et furanes émis par les chaudières industrielles serait de **1.5 g ITEQ**, ce qui représente une source quasiment négligeable au plan français.

En ce qui concerne les unités alimentées avec du bois traité, les rejets sont encore mal connus, étant donné le faible nombre de données, la variété des installations et des dispositifs d'épuration des fumées installés ayant fait l'objet d'essais, la diversité des conditions opératoires et des déchets brûlés. Tous ces paramètres jouent un rôle important sur les émissions de dioxines et furanes.

En ce qui concerne les bois traités, imprégnés, les résidus de fabrication des industries du panneau et de l'ameublement et les déchets de démolition, il paraît difficile de fournir des facteurs d'émission moyens de polluants pour les raisons évoquées ci-dessus. Pour ces déchets, on se reportera utilement aux tableaux récapitulatifs n°23 à 25.

Au sujet des bois traité au PCP les émissions de dioxines sont sensiblement plus élevées que celle liées à la combustion de bois naturel, le facteur d'émission est environ 10 fois supérieur (2.4 à 21 ng I.TEQ/kg correspondant à des teneurs comprises entre 0.20 et 2.33 ng I.TEQ/m³). Cette fourchette de facteur d'émission est relativement étroite compte tenu de la grande disparité des installations ayant fait l'objet d'essais et des teneurs en PCP testées.

Pour les bois imprégnés, un faible nombre d'étude a été réalisée ; on note une grande fourchette de facteurs d'émission qui dépendaient de la nature et de la quantité des produits de traitement utilisées.

Tous les essais effectuées sur des panneaux mettent en évidence des teneurs sensiblement plus élevées à celles du bois naturel : de 1 à 20 fois supérieure environ (0.018 à 12 ng I.TEQ/kg correspondant à des teneurs comprises entre 0.002 et 1 ng I.TEQ/m³).

Quant au résidus de l'industrie de l'ameublement et aux déchets de démolition, sur lesquels un faible nombre de mesures a été réalisées, les facteurs d'émission déterminés sont très dispersés. Pour ces derniers déchets, ils peuvent atteindre des valeurs 300 fois supérieures (170 ng I.TEQ/kg) au facteur d'émission moyen retenu pour le bois naturel.

Dans l'hypothèse où les chaudières industrielles consomment 50% de déchets de bois de types : palettes, panneaux de particules ou résidus de l'industrie de l'ameublement, et en retenant un facteur d'émission pour ces déchets, 20 fois supérieur à celui du bois naturel, on obtient des émissions annuelles françaises d'environ **13.7 g ITEQ**, valeur qui reste relativement faible au vu des émissions globales françaises.

6.2 FOYERS DOMESTIQUES

Les études les plus récentes mettent en évidence des teneurs en dioxines et furanes dans les cendres comprises entre 30 et 720 ng I.TEQ/kg de bois naturel brûlé. Comme dans le cas des émissions, la teneur en dioxines et furanes dans les cendres augmente avec le contenu en chlore du combustible. Pour les bois adjuvantés (bois peints, bois contenant des emballages ou des matières plastiques en PVC, bois chargé en sels lié à un stockage dans l'eau de mer), les valeurs mesurées sont environ 20 à 250 fois supérieures à celle du bois non traité.

Les principales données d'émission obtenues dans la littérature sont résumées dans le tableau n°26. Les concentrations en dioxines et furanes liées à la combustion du bois naturel sont comprises entre 0.019 et 1.2 ng I.TEQ/m³ pour des conditions d'essais dites « normales ».

Ces données permettent de mettre en évidence les points suivants :

- une comparaison des résultats obtenus sur une même installation dans des conditions de marche optimisés et normales, montre que les teneurs mesurées dans des conditions optimisés sont trois fois plus faibles que celles mesurées dans des conditions normales. Ce résultat obtenu sur une unité donnée, doit être gardé à l'esprit afin d'estimer de façon correcte les rejets réels des unités de combustion du bois,
- l'essence de bois joue un rôle sur les émissions de dioxines, par exemple les rejets liés à la combustion de hêtre ou de bouleau se traduit par des émissions 42% plus faibles que celles liées à la combustion de sapin,

- les émissions de dioxines augmentent de façon significative avec des conditions défavorables de combustion ainsi qu'avec la teneur en chlore du combustible et donc notamment avec l'ajout de bois traités, imprégnés, peints, revêtus de plastiques (PVC), de papiers, d'emballages, de déchets ménagers, etc. au combustible naturel,
- aucune variation notable des émissions de dioxines n'a été constatée en fonction des variations de charge de ces unités.

La combustion de bois naturel en foyer domestique conduit à la formation de faibles concentrations en dioxines et furanes qui sont relativement peu significatives sur le total des émissions de dioxines et furanes annuelles françaises actuelles. La quantité de bois consommé en foyer domestique en France est estimée à 23.4 millions de tonnes⁽²⁶⁾, représentant 4% de la consommation énergétique nationale, ce qui conduit à une émission annuelle par les foyers domestiques de **28 g I.TEQ/an** en retenant un facteur d'émission moyen de **1.2 ng I.TEQ/kg**. Ce facteur d'émission est obtenue en moyennant l'ensemble des essais effectués dans des conditions normales et en retenant une seule valeur par référence bibliographique compte tenu que le nombre d'essais n'est pas toujours précisé. Notons que l'EPA et le LUA-NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westalen) retiennent un facteur d'émission de 2 ng I.TEQ/kg pour représenter ce secteur d'activité.

Cette valeur est toutefois assortie d'une incertitude importante, liée à la méconnaissance de la quantité de bois souillés brûlée en foyer domestique.

En effet, la combustion de bois adjuvantés peut être à l'origine de fortes émissions, des facteurs d'émissions 50 à 60 fois supérieurs à ceux obtenus pour le bois naturel ont par exemple été déterminés dans le cas de bois peints ou contenant du PVC. Certains déchets de bois nécessitent donc d'être brûlés sur des unités spécialisées équipés de systèmes d'épuration des fumées adaptés.

Dans l'hypothèse où 5% des déchets brûlés en foyer domestique sont de ce type, on obtient des émissions annuelles françaises pour ce secteur d'activité de 104 g. I.TEQ.

La remarque précédente s'applique également aux déchets ménagers dont la combustion en foyer domestique génère de fortes émissions de polluants.

Année	Etude / référence	Nombre d'unités	Concentration moyenne (ng I.TEQ/m ³ n)	Facteur d'émission (ng I.TEQ/kg)	Système d'épuration	Commentaires
1987	EPA ⁽⁸⁾	1		17.1	C + FM	stockage des billes dans l'eau de mer
1988	CARB ⁽⁴⁾	3		1.32	C + EF	
				0.64	MC	
				0.50	C + EF	
1992	EPA ⁽⁵⁾	20	0.15*	1.35*		
1994	⁽²⁹⁾	1	< 0.1	< 1.2*		petites unités (40 à 800kW)
1994	⁽⁷⁾	3	0.066 à 0.214	0.79 à 2.57		petites chaudières (100 à 150 kW)
1995	NCASI ⁽⁶⁾	5		0.40	MC ou EF	5 unités du secteur papetier
1996	INERIS ⁽¹²⁾	2	0.019	0.32	MC	3 MW
			0.011	0.05	MC	2.4 MW
1996	NRW ⁽⁹⁾	1	0.018	0.16*		

C : cyclone, MC : multicyclone, EF : électrofiltre, FM : filtre à manches

*valeur estimée

Tableau n°22 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées en bois naturel (tableau récapitulatif)

Bois traité avec du PCP					
Année	Etude / référence	Concentration moyenne (ng I.TEQ/m ³ n)	Facteur d'émission (ng I.TEQ/kg)	Puissance chaudière / Système d'épuration	Commentaires
1990	Canada Environment ⁽¹⁰⁾	0.64 (valeur moyenne)	5.8*	127 MW/MC	bois dopé avec des teneurs en PCP comprises entre 50 et 400 mg/kg
		0.2	2.4*	400 kW	bois contenant 0.1% de PCP, essai effectué dans des conditions optimisées
1997	ADEME/CTBA/ INERIS ⁽¹³⁾	1.276 2.329	11.5 21.0	2 MW/MC	bois non dopé : 0.6 ppm de PCP bois dopé : 20 à 36 ppm de PCP
1998	EPA ⁽¹¹⁾	0.274 1.19	3.29* 14.3*	2 MW/MC	conditions optimisées, 6.7 mg de PCP/kg 4100 mg de PCP/kg
Bois imprégné avec divers produits					
	WKI ⁽¹⁴⁾	0.020 à 0.075 0.485 à 1.451	0.24 à 0.90* 5.82 à 17.4*	35 kW 50 kW	conditions optimisées
1994	⁽⁹⁾	4.5 (valeur moyenne) (fourchette : 0.5 à 16)	54*	40 à 800 kW	conditions normales

MC : multicyclone, FM : filtre à manches, LV : laveur

* valeur estimée

Tableau n°23 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées avec des bois traités (tableau récapitulatif)

Copeaux de panneaux					
Années	Etude / référence	Concentration moyenne (ng I.TEQ/m ³ n)	Facteur d'émission (ng I.TEQ/kg)	Puissance chaudière / Système d'épuration	Commentaires
1994	(7)	0.024 et 0.076	0.29 et 0.91	150 kW / MC	
1994	(29)	0.5 à 1	6 à 12*	40 800 kW	conditions normales
1995	(17)	0.063 à 0.186	0.76 à 2.23*	400 kW	conditions optimisées
1995	INERIS ⁽¹⁶⁾	0.011	0.066	3 MW /MC	conditions normales
1996	NRW ⁽⁹⁾	0.002	0.18*	11 MW / C + EF	conditions normales
		0.007	0.06*	40 à 800 kW	lors du démarrage de l'unité
1996	NRW ⁽⁹⁾	0.25 0.0059			mesures effectuées sur le procédé : unité de séchage des copeaux presse

MC : multicyclone, FM : filtre à manche

* valeur estimée

Tableau n°24 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées avec des résidus provenant de l'industrie de fabrication de panneaux (tableau récapitulatif)

Résidus de l'industrie de l'ameublement					
Année	Etude / référence	Concentration moyenne (ng I.TEQ/m ³ n)	Facteur d'émission (ng I.TEQ/kg)	Puissance chaudière / Système d'épuration	Commentaires
1994	⁽²⁹⁾	<0.1	< 1.2		bois encollés, conditions normales
1994	TNO ⁽³¹⁾	0.4	3.5	3.5 MW / MC	conditions normales
		1.0	6.7	0.3 MW / C	
1996	NRW ⁽⁹⁾	5.77	52*	1 MW/C+FM	conditions normales
Déchets de démolition					
1988	CARB ⁽⁴⁾		0.82	94 MW/EF	conditions normales
1994	TNO ⁽³¹⁾	0.7	6.0	2.3 MW/MC	conditions normales
1996	NRW ⁽⁹⁾	14.2	170.7	150 kW	conditions normales
		14.4	173.3	410 kW/C	
		2.7	26	850 kW/C	
		9.6	92	1800 kW/C+EF	

C : cyclone, MC : multicyclone, FM : filtre à manche

* valeur estimée

Tableau n°25 : données d'émission relatives aux chaudières alimentées en déchets de bois provenant de l'industrie de l'ameublement et de démolition de bâtiment (tableau récapitulatif)

Année	Conditions opératoires	Concentration moyenne (ng I.TEQ/m ³ n)	Facteur d'émission (ng I.TEQ/kg)	Installations	Combustibles
1990-1994 ⁽²⁷⁾	normales et optimales	0.18	1.9	poêle	hêtre, bouleau et sapin
1992 ⁽⁹⁾	normales		0.7 à 1.2 0.7 à 1.2	poêle cheminée	hêtre
1994 ⁽⁷⁾	normales	0.019 à 0.034 0.064 à 0.104 2.70 à 14.42 0.028 114.4	0.23 à 0.41 0.77 à 1.25 32.4 à 173 0.04 3230	poêles cheminées barbecues cheminée	hêtre hêtre déchets de bois charbon de bois partie combustible de déchets 2/3 papiers, 1/3 plastiques
1994 ⁽³¹⁾	normales	0.12 à 0.36 0.5 à 1.2	1.0 à 3.3 13.0 à 28.5	poêles cheminées	
1998 ⁽²⁸⁾	optimales	0.004 et 0.021 0.57 et 0.90 0.46 et 0.95 0.038 et 0.075	0.05 et 0.25* 6.84 et 10.8* 5.52 et 11.4 * 0.41 et 0.90*	poêles et petites chaudières	bois naturel 2 et 5% de PVC bois peints bois + papiers + prospectus

* valeur estimée

Tableau n°26 : données d'émission relatives aux foyers domestiques (tableau récapitulatif)

7 COMMENTAIRES GENERAUX RELATIFS

7.1 A LA COMBUSTION DU BOIS NATUREL

La compilation effectuée en 1992 par l'US EPA, basée sur l'ensemble des mesures à l'émission effectuées aux Etats Unis à cette date, sur les chaudières alimentées en bois non souillés, améliore considérablement la connaissance des polluants rejetés par ces unités. Le tableau n°27 présente ces résultats qui s'applique à la combustion de bois naturel à l'exception de quelques valeurs maximales qui pourraient provenir de la combustion de déchets de bois.

Cette compilation des données permet notamment de mettre en évidence :

- un très faible niveau d'émission de composés organiques chlorés,
- l'efficacité des systèmes d'épuration des poussières sur les rejets en métaux lourds. Une réduction de 90% des émissions de poussières conduit à réduire les émissions de métaux lourds de plus de 90%,
- la concentration de presque tous les composés organiques recherchés augmente avec la concentration en CO de l'effluent gazeux bien qu'aucune corrélation claire n'ait pu être établie entre ces polluants,
- il en va de même pour la concentration en HAP et la teneur en particules de l'effluent gazeux.

7.2 A LA COMBUSTION DE DECHETS DE BOIS

7.2.1 Approche générale

L'extrême diversité des composés de traitement employés ne permet de raisonner qu'au cas par cas ou à brûler ces déchets en mélange dans des unités de tailles suffisantes équipées de systèmes d'épuration des fumées adaptés.

En raisonnant au cas par cas, il est nécessaire que la source soit suffisamment homogène et régulière. Il est également important de connaître ses caractéristiques (PCI, humidité, etc.) afin de prédire son comportement lors de la combustion, les traitements effectués sur ces déchets, sa composition par prise et analyse d'un échantillon représentatif (métaux, composés organiques) et la composition de ses cendres (produits minéraux) afin d'estimer les émissions potentielles de polluants à l'atmosphère (au moyen d'un bilan par exemple pour les métaux qui permettra d'estimer les rejets en les maximalisant) afin d'orienter le devenir de ces déchets (nécessité de les brûler en incinérateur, équipement de système d'épuration des fumées à mettre en place pour réduire les rejets en métaux lourds, etc.).

Cette première approche pourrait être réalisée dans le cadre d'un test « normalisé » qui pourrait aider également au classement des déchets à base de bois en DIS, DIB ou en 2910B, rapidement et sans recours à des mesures coûteuses sur site.

Polluants	Nombre de mesures	Valeur moyenne	Valeur minimum	Valeur maximum
CO (ppm)	154	570	3	5000
COVTNM ⁽¹⁾ (ppm)	170	24	0.4	525
NO _x (ppm)	116	91	28	208
SO ₂ (ppm)	89	8	0.5	190
Arsenic (µg/m ³)	45	6.6	0.1	36.2
Cadmium (µg/m ³)	44	1.1	0.15	9.2
Chrome (µg/m ³)	65	14.6	0.25	70.4
Cuivre (µg/m ³)	23	28.9	1.0	185
Plomb (µg/m ³)	45	66.2	1.0	444
Manganèse (µg/m ³)	42	580	1.5	3136
Mercure (µg/m ³)	24	0.56	0.18	1.8
Nickel (µg/m ³)	45	13.0	1.5	101
Zinc (µg/m ³)	24	181	2.0	472
Formaldéhyde (µg/m ³)	69	1485	12	14600
Benzène (µg/m ³)	40	639	3	6010
Phénol (ng/m ³)	9	8188	10	36200
Chlorophénols (ng/m ³)	25	759	0.1	1989
HAP cancérigènes ⁽²⁾ (ng/m ³)	59	1685	5	17350
PCBs (ng/m ³)	11	6255	0.1	64920
Chlorobenzènes (ng/m ³)	11	1243	2.5	3760

⁽¹⁾composés organiques volatils totaux non méthaniques exprimés en équivalent CH₄

⁽²⁾ benzo (a) anthracène , benzo (a) pyrène, benzo (b) fluoranthène, benzo (k) fluoranthène, chrysène, dibenzo (a, h) anthracène, indeno (1, 2, 3) pyrène (g, h, i) perylène

Tableau n°27 : données d'émission de divers polluants – résultats obtenus sur divers types de foyers aux Etats Unis

7.2.2 Approche en fonction du type de déchets de bois

Dans des conditions normales de marche des installations et sur la base des connaissances actuelles :

- les cagettes, très faiblement adjuvantés dont 5% seulement des bois sont en contreplaqués, contiennent, en moyenne, moins de 500 ppm de colles. La combustion de cagettes n'est donc pas a priori significativement distincte de la combustion de bois naturel,
- les palettes tout venant dont moins de 30 % sont traités à l'heure actuelle, sont susceptibles du fait du produit anti-bleu employé de générer des dioxines et furanes ainsi que d'autres composés organiques chlorés.

Rappelons que ces déchets sont également susceptibles d’être contaminés durant leur cycle de vie du fait de l’utilisateur, lors de leur fabrication sur des sites ayant par le passé employé du PCP ou encore par l’entrée sur le territoire français de lots de palettes étrangères souillées.

Bien qu’en constante diminution, la teneur en PCP est à surveiller. L’Allemagne impose une valeur limite de 5 mg/kg pour le réemploi de ces déchets. Une telle valeur présente l’intérêt de minimiser le nombre de mesures à l’émission tout en garantissant des rejets limités et en facilitant la prise de décision quant à l’autorisation ou non de la valorisation énergétique des palettes. Il est également important d’éliminer complètement et le plus rapidement possible ce composé.

La politique actuelle de l’ADEME dans le cadre du plan Bois Energie visant à effectuer des mesures de dioxines sur l’ensemble des sites utilisant des palettes en tant que combustible n’est viable que tant qu’un faible nombre de site ne sera concerné. Il serait intéressant de réaliser, en complément, des mesures de la teneur en PCP du combustible, ce qui pourrait permettre de définir une valeur limite permettant ce réemploi.

Le bois faiblement adjuvanté en PCP brûlé dans une chaudière bien équipée dans de bonnes conditions de combustion génère une teneur en dioxines et furanes faible (0.274 ng I.TEQ/nm³) à peine supérieure à celle du bois naturelle (0.066 à 0.214 ng I.TEQ/nm³), mais ces conditions semblent toutefois difficiles à atteindre sur des unités industrielles où des valeurs comprises entre 1 et 3 ng I.TEQ/nm³ ont été mesurées,

- les panneaux se distinguent, par rapport au bois massif, par l’emploi de colles, d’additifs (catalyseurs, produits hydrofuges, etc.) et de revêtements (papiers, PVC, etc.). Une multitude de panneaux est commercialisée. Une approche au cas par cas est donc souhaitable étant donné qu’une source peut être aisément caractérisée, la nature et la composition des adjuvants présents dans les panneaux étant connus.

La combustion de ces matériaux est susceptible d’intervenir principalement sur les émissions de polluants suivants :

- les oxydes d’azote : les colles principalement les urée-formol ou mélamine-urée-formol apportent d’importante quantité d’azote au bois. Pour les panneaux fortement encollés (10 - 12% de colles, en poids du panneaux), des teneurs en oxydes d’azote de 560 et de 1080 mg/m³n ont été mesurés respectivement sur unité industrielle et sur unité pilote,
- l’acide chlorhydrique : le chlorure d’ammonium employé comme catalyseur (en cours de remplacement par des nitrates ou sulfates chez les fabricants de panneaux sur recommandation du CTBA), les revêtements PVC peuvent apporter du chlore en quantité au combustible. Des teneurs en HCl comprises entre 57 et 74 mg/m³n ont été mesurées sur une unité industrielle alimentée avec des panneaux contenant ce catalyseur (les teneurs en HCl lors de la combustion de bois naturel sont inférieures à 10 mg/m³n).

- les composés organiques chlorés : tels que les dioxines, les furanes, les polychlorobiphényles (PCB), les chlorophénols et les chlorobenzènes qui se forment lorsqu'il y a présence de chlore dans le combustible. Le bois naturel contient peu de chlore mais les bois adjuvantés sont susceptibles d'en contenir en quantité importantes. Rappelons que les émissions de l'ensemble de ces composés sont favorisées par une mauvaise qualité de combustion et faibles lors de la combustion de bois naturel rapport (EPA). Peu de tests ont été réalisés à l'émission d'installations industrielles sur ces polluants. Des teneurs en dioxines 10 à 20 fois supérieures à celles mesurées lors de la combustion de bois naturel ont déjà été mesurées⁽²⁹⁾. En France, compte tenu que ces déchets sont brûlés sur de petites installations industrielles, la combustion des panneaux contenant du chlore est susceptible d'émettre ces polluants,
 - les aldéhydes présents à de faibles teneurs dans le bois naturel et à de très fortes teneurs dans la plupart des bois encollés, ces composés sont susceptibles d'être émis lorsque les conditions de combustion sont défavorables,
 - les métaux lourds : divers additifs contenant des métaux lourds peuvent également être employés lors de la fabrication de panneaux, et engendrer des émissions de métaux lourds largement supérieures à celles mesurées dans le cas du bois naturel.
- Les mêmes remarques s'appliquent à l'industrie de l'ameublement qui utilise les matériaux fabriqués par l'industrie des panneaux d'autant plus que des adjuvants supplémentaires sont également employés : colles d'assemblage, produits de finition et de préservation (utilisés notamment en menuiserie, charpente, etc.).
 - Le bois de démolition est une source importante de pollution lorsqu'il est employé en tant que combustible, du fait de la diversité des traitements effectués et de la présence de composés anciens parfois très toxiques. Ces bois fortement adjuvantés nécessiteraient d'être incinérés sur des unités adaptées. Actuellement, une partie de ces déchets sont éliminés sur les feux de chantiers et en foyer domestique ce qui pourrait engendrer des pollutions locales.

Les bois stockés dans l'eau de mer peuvent contenir jusqu'à 1% de sels et avoir une humidité de 60%⁽³²⁾. La combustion du bois stocké de cette manière génère d'importantes émissions de dioxines (un facteur d'émission de 17.1 ng.I.TEQ/kg a été déterminé sur une unité aux Etats Unis⁽⁸⁾, elle est donc à proscrire. A priori, en France, ce procédé est peu ou pas utilisé. Toutefois les déchets échoués sur les plages peuvent être collectés, ceux-ci sont constitués de 60 à 70 % de bois, éliminé en général en chaudière (cas du département des Landes⁽³³⁾).

Il ne faut également pas perdre de vue que, pour l'ensemble de ces déchets, ainsi que pour le bois naturel, d'autres polluants ayant un impact sur la santé et/ou l'environnement sont émis :

- les composés organiques volatils totaux ou spécifique tels que benzène et phénol en particulier,
- le monoxyde de carbone et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- les poussières.

Les émissions de ces polluants dépendent de la composition du combustible, mais également et surtout des caractéristiques et des conditions de marche des installations de combustion. Des teneurs fortes en polluants peuvent être atteintes dans des conditions défavorables de combustion.

7.2.3 Perspectives

Globalement la préservation du milieu environnemental prise en compte ces dernières années (réduction de l'emploi du PCP lors de la fabrication de palettes et du chlorure d'ammonium lors de la fabrication de panneaux, emploi de colles à base aqueuse, etc.) devrait participer à la réduction des rejets en polluants dans les prochaines années. D'autres mesures (utilisation de composés qui se fixent mieux dans le bois et qui ne sont pas relargués durant leur vie), en cas d'emploi de ces déchets de bois en tant que combustible, sont moins favorables.

Par ailleurs, l'emploi de déchets de bois en tant que combustible en foyer domestique, mais également sur les feux de chantier, est susceptible de générer des pollutions locales notables. Une information pourrait être délivrée au public et aux entreprises concernées afin d'éviter ces pratiques.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) La lettre ADEME, n°80, septembre 1999
- (2) E. Uhde T. Salthammer, R. Marutzky, Toxicological and Environmental Chemistry, Vol.53, pp. 25-31, 1996
- (3) K. pohlandt, C. Bockelmann, R. Marutzky, Chemosphere, Vol.31 No.9, pp.4025-4031, 1995
- (4) California Air Resources Board (CARB) 1990, Rapports d'essais : C-88-066, C-87-042, C-88-050
- (5) U.S Environmental Protection Agency « Wood products in the waste stream : characterization and combustion emissions » Vol.1 Nov.92
- (6) National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement (NCASI) 1995, NCASI Summary of PCDD/F emission from wood residue and black liquor combustion
- (7) Schatowitz B., Brandt G., Gafner F., Schlumpf E., Bühler R., Hasler P., Nussbaumer T., « Dioxin emission from wood combustion » Chemosphere, Vol.29, pp 2005-2013, 1994
- (8) rapport EPA-450/4-84-014
- (9) G. Bröker, H. Gliwa « Result of measurements of the emissions of dioxins by industrial plants in North Rhine-Westphalia » Materialien n°30, 1996
- (10) Environment Canada, « Summary report for a test burn of chlorophenol contaminated wood wastes »
- (11) rapport EPA-600/R-98-013
- (12) S. Collet, rapport INERIS, « Mesure à l'émission de chaudières à bois utilisant comme combustible du bois naturel » 1995
- (13) S. Collet, rapport INERIS, « Essais de combustion de broyat de palettes » 1997
- (14) T. Salthammer, H. Klipp, R.-D. Peek, R. Marutzky, « Formation of PCDD/F during the combustion of impregnated wood », Chemosphere, Vol.30, pp 2051-2060, 1995
- (15) CTBA Info n°48 pp. 13-15
- (16) S. Collet, rapport INERIS, « Mesure à l'émission d'un chaudière à bois » 1996
- (17) ADEME « Valorisation énergétique des bois faiblement adjuvantés » propositions du groupe de travail ADEME, CTBA, SGFPBB, UNIFA
- (18) Aittola Organohalogen compounds, 3, pp. 21-26
- (19) R. R. Bumb, L. L Lamparski, T. J. Nestruck « Trace chemistries of fire : a source of chlorinated dioxins » Science, 210, pp. 385-390, 1980
- (20) T. J. Nestruck, L. L Lamparski « Isomer-specific determination of chlorinated dioxins for assessment of formation and potential environmental emission from wood combustion » Anal. Chem., 54, pp. 2292-2299, 1982

- (21) T. J. Nestruck, L. L. Lamparski « Assessment of chlorinated dibenzo-p-dioxins formation and potential emission to the environment from wood combustion » Chemosphere, 12, pp. 617-626, 1983
- (22) R. E. Clement, H. M. Tosine, B. Ali « Levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in wood burning stoves and fireplaces » Chemosphere, 14, pp. 815- 819
- (23) R. Bacher, M. Swerev, K. Ballschmiter « Profile and pattern of monochloro-through octachlorodibenzodioxins and –dibenzofurans in chimney deposits from wood burning » Environment Science and Technology, 26, pp. 1649-1655, 1992
- (24) R. Dumler-Gradl, H. Thoma, O. Vierle « Research program on dioxin / furan concentration in chimney soot from house heating systems in the Bavarian area » Organohalogen Compunds, 24, pp. 115-118, 1995
- (25) J. C. Van Oostdam, J. E. H. Ward, « Dioxins and furans in the british Columbia environment » British Columbia Environment
- (26) Eurostat 1988
- (27) Vikelsee J., Madsen H., Hansen K. « Emission of dioxins from danish wood-stoves » Chemosphere, Vol.29, pp 2019-2027, 1994
- (28) T. Launhardt, A. Strehler, R. Dumler-gradl, H. Thoma, O. Vierle, « PCDD/F and PAH-Emission from House Heating Systems » Chemosphere, Vol.37, pp 2013-2020, 1998
- (29) Zuberbühler, Angerer, Baumbach, Vatter, Hagenmaier, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft (1996) 415-418
- (30) Thoma « PCDD/F concentrations en chimmey soot from house heating systems » Chemosphere, 17, p 1369, 1988
- (31) H. J. Bremmer, L. M. Troost, G. Kuipers, J. de Koning, A. A. Sein « Emissions of dioxins in the netherlands » TNO-RIVM, pp 56-67, 1994
- (32) EPA, AP 42
- (33) Décision Environnement n°81, novembre 1999

Autres références bibliographiques :

- Rapport d'étude CTBA, septembre 1995, détails sur la nature et la composition des adjuvants et leur proportion dans les matériaux
- Document ADEME « La pollution des sols liée aux activités de préservation du bois »
- Roger Dumon, « Valorisation énergétique du bois et de la bionasse », 1982, éd. Masson
- Rapport INERIS, « Les biocides en France : état actuel de leur réglementation et étude du marché français », 1999
- Techniques de l'ingénieur, bois et matériaux dérivés
- Rapport INERIS « Guide de la sécurité contre l'incendie et l'explosion », 1997
- Colloque technique sur la mise en conformité et la sécurité des chaufferies bois, 15 et 16 janvier 1997, Forêt-Energie-France