

**Partie III Catégories de source (d) :**  
**La combustion de combustibles fossiles dans les**  
**chaudières de centrales et les chaudières industrielles**

## Table des matières

VI.D	Chaudières industrielles et de production d'électricité à combustibles fossiles.....	3
1.	Introduction .....	3
1.1	Principe de base des chaudières.....	3
1.2	Types de chaudière .....	4
2.	Génération de PCDD/PCDF, de PCB et du HCB dans la combustion.....	5
2.1	PCDD et PCDF.....	6
2.2	PCB et HCB.....	7
3.	Effet du type de combustible sur la génération des émissions .....	7
3.1	Carburant légers et gaz naturel .....	8
3.2	Fioul lourd.....	8
3.3	Charbon.....	8
3.4	Lignite.....	8
3.5	Co-combustion avec d'autres types de combustibles .....	8
4	Estimation des émissions de polluants organiques persistants des chaudières .....	9
5.	Les meilleures mesures environnementales .....	10
6	Meilleures techniques disponibles.....	11
6.1	Mesures primaires.....	11
6.2	Mesures secondaires ; dispositifs de contrôle de la pollution de l'air : .....	12
6.3	Autres considérations.....	12
7	Niveaux de performances possibles en associant les meilleures solutions techniques .....	15

## Tableaux

Tableau 1.	Facteurs d'émission pour des unités de production industrielle d'électricité et de chaleur, brûlant des combustibles fossiles .....	9
Tableau 2 :	Concentration de traces de substances organiques (ng/Sm <sup>3</sup> à 12% O <sub>2</sub> ) <sup>a</sup> avec des combustibles dérivés des déchets.....	11
Tableau 3.	Résumé des mesures recommandées pour les centrales et les chaudières industrielles à combustible fossile.....	14

## Figures

Figure 1.	Lieu de formation possible de PCDD et PCDF dans une chaudière.....	6
-----------	--	---

## **VI.D La combustion de combustibles fossiles dans les chaudières de centrales et les chaudières industrielles**

### **Résumé**

Les chaudières de centrales et les chaudières industrielles sont conçues pour chauffer de l'eau, de la vapeur d'eau ou pour produire de l'électricité à partir de la combustion de carburants fossiles. Les concentrations volumétriques des substances chimiques inscrites à l'Annexe C de la Convention de Stockholm dans les émissions des chaudières brûlant des combustibles fossiles sont généralement très faibles. Cependant la multiplicité des chaudières fait que les émissions totales en termes de tonnage et de distribution sont loin d'être insignifiantes pour la génération d'électricité et la production de chaleur ou de vapeur.

Les mesures concrètes envisageables pour réduire la formation et le rejet de substances chimiques inscrites à l'Annexe C sont : entretenir une combustion totale, s'assurer que le combustible n'est pas contaminé par des PCB, du HCB ou du chlore et que les concentrations des composants catalyseurs pour la formation des PCDD et PCDF sont faibles, utiliser des méthodes de lavage des émissions gazeuses et des rejets appropriées, et enfin adopter des stratégies concernant l'élimination, le stockage ou la réutilisation des cendres obtenues.

Les niveaux d'émission des PCDD/PCDF associés aux meilleures techniques disponibles peuvent être notablement inférieurs à  $0,1 \text{ ng I-TEQ/Nm}^3$  (contenu d'oxygène : 6% pour les combustibles solides, et 3% pour les combustibles liquides)

## **1. Introduction**

### **1.1 Principes de base des chaudières**

Les chaudières sont des équipements conçus pour brûler un carburant afin de chauffer l'eau ou de produire de la vapeur. La majorité des chaudières emploient des combustibles fossiles pour fournir la source d'énergie, bien que des chaudières puissent également être conçues pour brûler la biomasse et les déchets. La vapeur produite par la chaudière peut être employée pour la production d'électricité ou être utilisée dans des procédés industriels; de même, l'eau chaude peut être employée dans des procédés industriels, ou pour le chauffage domestique et industriel. Il y a des différences significatives entre les chaudières de production d'électricité et les chaudières industrielles ; les différences principales peuvent se trouver dans trois secteurs principaux :

- Les dimensions des chaudières
- Les applications pour la vapeur et l'eau chaude produites par les chaudières
- La conception des chaudières

#### **1.1.1 Dimensions des chaudières**

Les chaudières pour la production d'électricité sont très grandes par rapport aux chaudières industrielles modernes (parfois connues sous le nom de chaudières industrielles/commerciales/institutionnelles). Une grande chaudière typique pour la production

d'électricité produit environ 1'600 tonnes de vapeur par heure comparée à environ 45 tonnes de vapeur pour la chaudière industrielle moyenne, bien que les chaudières industrielles puissent être dix fois plus petites ou dix fois plus grandes (CIBO 2002).<sup>1</sup>

### **1.1.2 Utilisation de la vapeur produite**

Les chaudières d'électricité sont conçues pour générer la vapeur à un débit constant pour des turbines de puissance produisant l'électricité. En raison de cette demande régulière de vapeur, elles fonctionnent généralement en continu en régime stationnaire, bien que des fluctuations des besoins énergétiques fassent que certaines installations font varier leurs conditions opératoires sur une base journalière.

En revanche, les chaudières industrielles ont des objectifs assez différents selon leur utilisation et la demande pour la vapeur peut varier selon l'activité industrielle et les procédés fonctionnant à un moment donné, ainsi que les besoins en vapeur ; on peut comparer, par exemple, la production et l'utilisation d'eau chaude et de vapeur pour le conditionnement des aliments, aux demandes fluctuantes d'une grande chaudière d'hôpital. Les besoins très changeants signifient que la chaudière industrielle ne fonctionnera pas généralement au maximum de ses capacités, ce qui n'empêche pas que sa conception soit optimisée pour tenir compte de l'unité industrielle et de son opération. En général, ce type de chaudière aura une capacité et une charge opérationnelle annuelles bien plus faibles qu'une chaudière destinée à produire de l'électricité.

### **1.1.3 Conception des chaudières**

Les chaudières dans les centrales sont de très grandes unités utilisant surtout du charbon pulvérisé, du fioul, ou du gaz naturel à haute pression et haute température. Ces chaudières ont des techniques de combustion similaires. Les chaudières industrielles quant à elles, peuvent être équipées d'une large gamme de systèmes de combustion bien qu'elles soient prévues généralement pour un seul combustible. Les centrales électriques sont implantées et conçues autour des chaudières et des turbines, et leurs dimensions permettent des économies importantes en ce qui concerne le contrôle des émissions. Cependant, la conception des chaudières industrielles peut être limitée par la nécessité de s'adapter aux demandes énergétiques variables et aux exigences d'espace disponible. Tout ceci peut mener à plus de difficultés pour la mise en œuvre des contrôles efficaces des émissions venant des chaudières industrielles.

## **1.2 Types de chaudières**

### **1.2.1 Chaudières pour la production d'électricité**

Ces chaudières sont généralement conçues suivant la configuration du four de combustion :

- Allumage tangentiel : Utilisé normalement pour le charbon pulvérisé mais peut aussi être utilisé pour le fuel ou le gaz ; une seule flamme parallèle à l'axe central du four avec le mélange combustible projeté des quatre coins du four.
- Allumage par les parois : Plusieurs brûleurs placés sur une ou plusieurs parois opposées, allumant du charbon pulvérisé ou du gaz naturel.
- Allumage à cyclone : typiquement pour la combustion du charbon broyé, ou le mélange air fuel est brûlé dans des cylindres horizontaux.
- Allumage mécanique : Pour les unités anciennes brûlant tous type de combustible solide ; alimentation mécanique alimentant le foyer à grille avec enlèvement des résidus de cendre.

---

<sup>1</sup> En première approximation, on peut utiliser un facteur de conversion de 0.8-0.9 (MWh par tonne de vapeur)

- Combustion à lit fluidisé : Combustion efficace à température plus faible grâce à un mélange turbulent dans la zone de combustion et à un apport en charbon broyé et d'éventuels absorbants afin d'éliminer des polluants, en particulier le dioxyde de soufre.
- Combustion à lit fluidisé pressurisé : similaire à la combustion en lit fluidisé où la zone de combustion est à une pression supérieure à la pression ambiante.

### 1.2.2 Chaudières industrielles/commerciales/institutionnelles.

Les chaudières industrielles/commerciales/institutionnelles, se reconnaissent normalement au mode de transfert de chaleur et au système de combustion utilisé. Une étude détaillée des divers types de chaudière se trouve à Oland 2002. En résumé, les systèmes de transfert de chaleur sont :

- Chaudières à tubes d'eau : des tubes contenant de l'eau sont en contact direct avec les gaz chauds de combustion. Elles sont couramment utilisées dans des installations fonctionnant au charbon mais elles acceptent presque tout type de combustible, y compris le fuel, le gaz, la biomasse, les déchets solides municipaux et les combustibles dérivés des pneus.
- Chaudières à tubes de gaz chaud : L'eau passe autour des tubes de gaz ou circulent les gaz issus de la combustion. L'utilisation du procédé est assez courante pour les chaudières brûlant le charbon pulvérisé, le gaz, le fioul mais aussi la biomasse. Elles sont utilisées généralement pour les applications de plus faible pression.
- Chaudières en fonte : les sections en fonte de la chaudière sont munies de passages pour à la fois l'eau et le gaz de combustion. Elles sont utilisées pour la production d'eau chaude et de vapeur à faible pression et sont normalement alimentées au fuel ou au gaz et parfois au charbon.

Les systèmes de combustion sont principalement :

- Foyers mécaniques : il en existe une grande variété. Ceux alimentés par le bas où le combustible et l'air sont entrent par en dessous de la grille, envoyant les cendres sur un coté ou vers l'arrière, et ceux alimentés par le haut, soit en vrac soit par épandage du combustible, l'air arrivant en dessous de la grille. Les foyers mécaniques avec épandage et grille fixe sont très utilisés dans l'industrie du sucre pour brûler la bagasse.
- Brûleurs : Ces ensembles gèrent l'arrivée du mélange air/fuel dans le four dans des conditions de vitesse, de turbulence et de concentration appropriées afin d'assurer l'allumage et d'entretenir la combustion.

## 2. Génération des PCDD/PCDF, des PCB et de l'HCB dans la combustion

Dans un système de combustion bien géré, les produits volatiles devraient passer suffisamment de temps à haute température, et avoir aussi suffisamment d'oxygène et de turbulence pour permettre une combustion régulière et complète. Lorsque ces conditions ne sont pas remplies, les émissions dans l'air de produits potentiellement toxiques tels que les dibenzo-*p*-dioxines polychlorés (PCDD), les dibenzofuranes polychlorés (PCDF), les polychlorobiphényles (PCB) et l'hexachlorobenzène (HCB) peuvent être produites pendant la combustion et peuvent en sortir (Van Remmen 1998 ; UNEP 2005).

Dans de grandes centrales bien contrôlées brûlant des combustibles fossiles, la formation de PCDD et de PCDF (et d'autres polluants organiques persistants) est faible car l'efficacité de combustion est généralement élevée, le procédé est stable et les combustibles utilisés sont homogènes. Il est cependant encore possible que des émissions assez importantes puissent avoir lieu car de grands volumes de gaz sont émis avec des teneurs en PCDC et PCDF faibles (UNEP 2005). Dans des installations plus petites, moins bien contrôlées, il existe une possibilité de formation et d'émissions de polluants

organiques persistants à des concentrations plus élevées mais avec des productions globales plus faibles, et donc une émission globale plus faible de tels polluants.

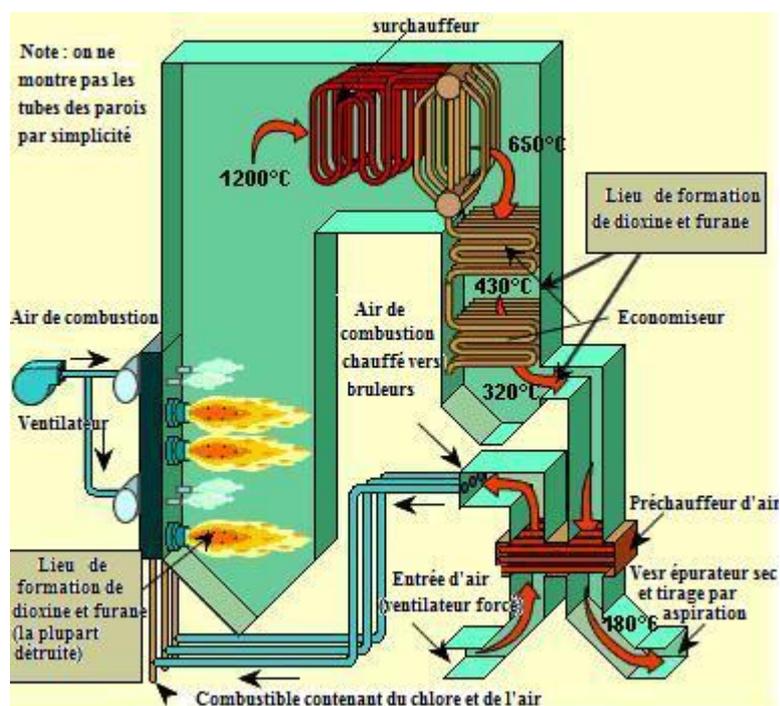
## 2.1 Les PCDD et PCDF

### 2.1.1 Génération de PCDD/PCDF

Il est connu que l'utilisation de combustibles fossiles dans des chaudières industrielles ou de production d'électricité, génère beaucoup moins de PCDD/PCDF que la combustion de combustibles dérivés des déchets (Sloss and Smith 1993 ; Sloss 2001 ; Dyke 2004). Griffin, en 1986, a proposé une hypothèse pour expliquer la formation de PCDD et de PCDF comme étant le résultat du rapport soufre/chlore du combustible utilisé (Griffin 1986). L'hypothèse précise que dans le charbon, le rapport soufre/chlore est de 5, rapport bien supérieur à celui des déchets municipaux solides. L'excès de soufre dans les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz, permet de capturer le chlore moléculaire, empêchant ainsi la formation d'aromatiques chlorés, ce qui n'est pas le cas lors de l'utilisation de combustibles dérivés de déchets, pour lesquels le chlore est excédentaire par rapport au soufre.

Les PCDD/PCDF sont produits par une grande variété de mécanismes. La figure 1 est une représentation schématique des lieux possibles de formation des PCDD/PCDF dans une chaudière. D'autres détails sur la formation des PCDD/PCDF paraissent à la section III.C (i) de ce document.

**Figure 1. Lieux de formation possible de PCDD et PCDF dans une chaudière**



Source : Richards 2004, mais modifié

### 2.1.2 Mécanisme de contrôle des PCDD et PCDF

Les conditions de combustion, la qualité du combustible et la configuration de l'installation, ainsi que les conditions opératoires peuvent avoir une influence majeure sur la formation des PCDD/PCDF. Il a été démontré (Williams 1994 ; Eduljee and Cains 1996) que les conditions de combustion peuvent être

améliorées pour réduire les émissions de PCDD. Lemieux (1998) résume le travail fait à l'Environmental Protection Agency (EPA) aux Etats-Unis qui montre, en ordre décroissant d'importance, les principaux paramètres qui peuvent être contrôlés pour réduire les émissions des PCDD et PCDF.

1. Qualité de la combustion indiquée par :
  - Le monoxyde de carbone (CO), masse totale d'hydrocarbures, formation de suie ;
  - Entraînement de particules, et degré de combustion.
2. Températures des systèmes de contrôle de la pollution des gaz ;
3. Composition des combustibles déchets :
  - Soufre
  - Métaux
  - Chlore

L'objectif du contrôle de ces paramètres peut être atteint dans les conditions suivantes (Lemieux 1998) :

- Une température élevée uniforme dans la chambre de combustion
- Un bon mélange air/combustible
- Un minimum d'émanations gazeuses et de particules non brûlées
- Un débit d'alimentation constant
- Un contrôle en temps réel du CO et du total des hydrocarbures

Finalement, certains paramètres opérationnels réduisant les émissions de PCDD et PCDF ont été identifiés ; ceux sont :

- Température faible à l'entrée du dispositif de contrôle des particules
- Minimisation du temps de résidence des gaz ou des particules, dans la fenêtre de température 200-400° C.

Comme mentionné précédemment, la présence de soufre peut inhiber la formation de PCDD, hypothèse fondée sur les émissions généralement faibles des centrales au charbon, et sur les résultats obtenus sur la co-incinération des charbons à haute teneur en soufre avec des combustibles dérivés de déchets (Tsai *et al.* 2002). Ainsi il y aurait un avantage à maintenir un ratio élevé soufre/chlore. (Luthe, Karidio and Uloth 1997). Cependant il faut reconnaître que l'utilisation de combustible à teneur élevée en soufre pourrait mener à d'autres pollutions de l'air.

## **2.2 PCB et HCB**

Les émissions de PCB peuvent provenir de l'utilisation d'huiles de récupération, et d'autres combustibles dérivés de déchets. La combustion du charbon est la troisième source globale d'émissions de HCB (Bailey 2001). D'autres détails sur la formation de ces composés se trouvent à la section III.C (i) de ce guide. Les approches utilisées pour le contrôle des émissions des PCB et du HCB peuvent être similaires à celles mises en place pour les émissions des PCDD et PCDF.

## **3. Effet du type de combustible sur la génération des émissions**

Les combustibles fossiles - charbon, mazout et gaz - sont utilisés pour la génération de vapeur dans les chaudières, soit seuls, soit en combinaison avec des combustibles énergétiques provenant d'autres procédés. Le type de combustible utilisé dépendra de sa disponibilité et de l'économie du procédé.

### 3.1 Carburant léger et gaz naturel

Les carburants légers et le gaz naturel sont toujours utilisés dans des brûleurs spéciaux et ils génèrent peu de PCDD et PCDF, puisque ces combustibles ont un haut pouvoir calorifique et brûlent proprement et sans cendres. En utilisant plus de gaz pour la génération d'électricité (en tant que remplacement du charbon et de produits pétrochimiques) il y aura une réduction des PCDD/PCDF dans le secteur de la génération d'électricité (UNECE 1998).

### 3.2 Fioul lourd

Le fioul lourd est utilisé pour la génération de vapeur et d'électricité et est normalement utilisé dans des brûleurs spéciaux, intégrés aux parois de la chaudière. Le fioul lourd, exempt de contaminants, donnera généralement de niveaux faibles d'émissions organiques.

### 3.3 Charbon

La combustion efficace du charbon dans de grandes centrales mène à des niveaux très faibles d'émissions (Rentz, Gütling and Karl 2002). L'utilisation du charbon dans des secteurs moins performants pourrait devenir source importante d'émissions locales (Sloss 2001). UNECE 1998 recommande que l'on améliore la performance énergétique et la conservation d'énergie de toutes les chaudières ayant une puissance supérieure à 50MW, comme stratégie de réduction des émissions résultant de besoins en carburant plus faibles. Cependant, il est reconnu que bien que les techniques pour la réduction des molécules, oxydes de soufre SO<sub>x</sub> et oxydes d'azote NO<sub>x</sub>, puissent mener à des réductions voire l'élimination des PCDD/PCDF (et probablement aussi les PCB et HCB), les efficacités d'élimination seront variables (voir aussi la Section III.C (iii) sur les effets bénéfiques additionnels). L'élimination du chlore dans les combustibles fossiles n'est pas considérée comme une mesure ayant un bon rapport coût/efficacité pour la réduction des PCDD et PCDF (UNECE 1998).

### 3.4 Lignite

Les centrales au lignite sont implantées typiquement proches des régions minières. A cause de la capacité calorifique bien plus faible que celle du charbon, le lignite est plutôt acheminé au moyen de tapis roulant depuis l'aire de stockage de la mine jusqu'à la centrale. Les techniques appropriées à la génération d'électricité à partir du lignite sont la combustion de lignite pulvérisé et la combustion en lit fluidisé. Avec des températures de combustion plus faibles, les chaudières au lignite pulvérisé peuvent atteindre les normes d'émission actuelles pour les NO<sub>x</sub> en utilisant des mesures primaires. Donc elles ne nécessitent pas l'utilisation d'une réduction catalytique sélective.

Les émissions produites par la combustion du lignite se situent dans un intervalle de 0,0002 à 0,04 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup> (DETZEL *et al.* 1998).<sup>2</sup>

### 3.5 La co-combustion avec d'autres types de combustibles

La plupart des centrales électriques utilise un seul combustible, mais il est possible de modifier la chaudière et l'équipement de traitement du combustible pour introduire d'autres matériaux dans le mélange qui alimente la chaudière, par exemple des déchets. Ce procédé de co-combustion veut dire que l'on utilise plus d'un combustible à la fois.

Les chaudières sont cependant souvent limitées dans leurs possibilités d'utiliser des combustibles alternatifs, ou dérivés de déchets, à cause de l'absence de systèmes de contrôle des émissions d'acide chlorhydrique, et parfois aussi à cause de limitations dans les conditions de combustion, et de problèmes dus à la corrosion des chaudières. Potentiellement, le risque d'émissions de polluants

---

<sup>2</sup> 1 ng (nano gramme) = 1 x 10<sup>-12</sup> kilogramme = 1 x 10<sup>-9</sup> gramme; Nm<sup>3</sup> = mètre cube normal, volume de gaz sec mesuré à 0°C et 101,3 kPa. Concernant les mesures de toxicité, voir la section I.C paragraphe 3 de ce guide

organiques persistants est plus grand si l'efficacité de combustion de la chaudière travaillant en co-combustion n'est pas optimisée par une reconfiguration et un bon contrôle du système.

Les déchets (connus aussi comme combustibles dérivés des déchets) sont des matériaux riches en énergie, comme les huiles usagées, les pneus, les déchets de bois, et les solvants usagés et peuvent être substitués au combustible fossile comme source d'énergie thermique. Cependant un grand nombre de ces dérivés de déchets, qui ont de faibles capacités calorifiques (tels que les boues d'épuration), sont également incinérés. La contamination possible de déchets par des matériaux ou polluants indésirables peut être un problème avec ce type de combustible. Plus précisément, la présence de PCB, HCB et de chlore dans ces déchets devrait être à la fois soit évitée, soit contrôlée. Pour des conseils supplémentaires sur les facteurs liés à l'utilisation de ce type de combustible alternatif, et les implications, se référer aux sections sur les incinérateurs de déchets, le brûlage de déchets dangereux dans les fours à ciment, les installations de brûlage de bois et autres combustibles issus de la biomasse, et les raffineries d'huiles usées (sections V.A, V.B, VI.E et VI.M du présent guide).

Le contrôle de la qualité du combustible et de bonnes conditions de combustion, en combinaison avec un bon dispositif de collecte, semblent offrir la meilleure stratégie de contrôle si l'on veut minimiser les polluants organiques persistants, lorsque des déchets sont ajoutés aux combustibles normaux. Pour un fonctionnement optimisé, ces déchets devraient être exclus du procédé lors du démarrage et de l'arrêt de l'installation, et en régime stationnaire, quand les conditions de combustion risquent de n'être ni stabilisées ni contrôlées.

La co-incinération de déchets devrait être effectuée de telle manière à ce que les options pour l'élimination des déchets (par ex. cendres volantes, cendres grossières, résidus de traitement des gaz) ne soient pas affectées de manière négative (voir section V.A (les incinérateurs de déchets) de ces directives).

Si on n'atteint pas une valeur de 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> pour les émissions, d'autres mesures secondaires existent et doivent être mises en place.

#### **4 Estimation des émissions de polluants organiques persistants des chaudières**

La mesure de concentrations faibles de PCDD, de PCDF, de PCB et d'HCB résultant de la combustion de combustibles fossiles dans les chaudières, représente un défi technique et coûteux par rapport aux mesures nécessaires pour les polluants de référence tels que le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, et les matières particulaires. Bien que l'on privilégie la mesure directe des polluants organiques persistants afin d'enrichir la base de connaissance sur ces émissions, il est vrai que dans certaines circonstances cela ne sera pas possible excepté pour les grandes unités bien équipées techniquement.

Dans un procédé de combustion efficace, les niveaux de concentration peuvent être largement inférieurs aux normes en vigueur (Brain *et al.*, cité dans Sloss 2001). Il en résulte que les PCDD, PCDF, PCB et HCB peuvent être présents mais à des niveaux indétectables par les méthodes analytiques courantes.

Une alternative à la mesure directe est le calcul d'émissions supposées, connaissant le type de combustible, le débit de combustion ainsi que les conditions opératoires. On donne au Tableau 1 quelques facteurs d'émissions pour des PCDD/PCDF (I-TEQ) dans le cas de différents procédés de chaudières, avec des informations supplémentaires sur des congénères cités à l'annexe I de la présente section (UNEP 2005).

#### **Tableau 1. Facteurs d'émission pour des unités de production industrielle d'électricité et de chaleur, brûlant des combustibles fossiles**

Classification	Facteurs d'émission en µg TEQ/TJ de combustibles fossile consommés		
	Air	Eau	Résidus
1 Chaudières associant combustibles fossiles et dérivés de déchets	35	n.d.	n.d.
2 Chaudières au charbon	10	n.d.	14
3 Chaudières au fioul lourd	2,5	n.d.	n.d.
4 Centrales à l'huile de schiste	1,5	n.d.	*
5 Chaudières au mazout et gaz naturel	0,5	n.d.	n

\* Les rejets avec résidus peuvent être calculés sur la base de la masse  
Sources : UNEP 2005

ND : Non déterminé

a. Ces facteurs d'émission par défaut sont basés sur la supposition que les carburants brûlés mènent à des rejets de PCDD/PCDF associés à l'élimination des cendres volantes. Les émissions liées aux cendres résiduelles sont négligeables. L'efficacité de récupération des particules augmente aussi avec la qualité du système de contrôle de pollution de l'air, en place dans la chambre de combustion. (UNEP 2003).

b. Unité de débit d'énergie : µg TEQ/TJ de combustible consommé

Les informations sur les émissions de PCDD/PCDF sont plus facilement disponibles que pour les PCB et l'HCB. Lorsque des combustibles dérivés de déchets représentent une partie importante des combustibles, il est approprié de chercher les facteurs d'émission dans le secteur de l'incinération des déchets (UNEP 2003). En ce qui concerne les PCB et HCB, il n'existe que très peu, voire aucune donnée concernant le secteur de la combustion en chaudières.

## 5. Meilleures pratiques environnementales

Les meilleures pratiques environnementales décrites dans ce paragraphe font partie des directives applicables à toute sorte de chaudière, quelques soient leur taille et leur type :

- Identifier les paramètres clés des procédés, soit à partir d'études sur le site même du procédé, soit à partir d'études faites sur installations similaires ;
- Mettre en place des mesures qui permettent de contrôler les paramètres clés du procédé ;
- Mettre en place des protocoles de suivi et de reportage pour les paramètres clés ;
- Mettre en place, et suivre, des cycles de planification ; mettre en œuvre des cycles appropriés d'inspection et de maintenance ;
- Installer un système de gestion environnemental qui définit clairement les responsabilités à tous les niveaux ;
- S'assurer que des ressources adéquates sont disponibles en vue de l'application de ces mesures environnementales ;
- Mettre en place des améliorations au procédé pour réduire les goulots d'étranglement et les délais techniques ;
- S'assurer que le personnel soit bien formé à l'application de des mesures environnementales appliquées à leurs postes ;
- Définir une spécification concernant les paramètres clés des combustibles, et introduire un protocole pour le suivi et la présentation des résultats ;
- S'assurer de la gestion écologiquement rationnelle des cendres volantes, cendres lourdes et des divers résidus gazeux ;
- S'assurer que lorsqu'il y a co-combustion avec de biomasse et de déchets, ces combustibles ne seront introduits que lorsque les conditions de combustion seront stables avec une température minimale de fonctionnement atteinte.

## 6. Meilleures techniques disponibles

Afin de réduire les émissions de polluants organiques persistants venant de centrales électriques et de chaudières industrielles, les étapes du procédé produisant et rejetant de tels polluants doivent être optimisées lors de la conception et pendant le fonctionnement du procédé. Ces objectifs seront atteints si l'on considère :

- La qualité du combustible ;
- Les conditions de combustion ;
- L'installation de l'équipement le mieux adapté pour contrôler la pollution de l'air.

### 6.1 Mesures primaires

#### 6.1.1 Spécifications pour le combustible, et suivi

Bien que des niveaux assez faibles de précurseurs nécessaires à la formation de substances chimiques inscrites à l'Annexe C de la Convention de Stockholm par la formation de gaz au dessus de 500° C, soient présents dans la plupart des combustibles, il faut faire attention de réduire autant que possible l'introduction involontaire de combustibles contaminés qui pourraient contribuer à la formation de polluants organiques persistants. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'on procède à une co-incinération de combustible fossile avec d'autres types de combustibles. Il faudrait introduire des contrôles (c'est-à-dire, mesurer le taux de chlore des combustibles pour éviter l'introduction d'huiles usées contaminées aux PCB, par exemple) pour s'assurer que les combustibles respectent les spécifications requises.

#### 6.1.2 Conditions de combustion

Afin d'assurer une combustion complète des polluants organiques persistants dans le combustible, il faut être particulièrement attentif aux quatre paramètres clés pour assurer une efficacité totale de destruction : température, durée, turbulence et excès d'oxygène (McKay 2002). Ceci permettra aussi la destruction de précurseurs, et réduira la formation de suie, réduisant ainsi le nombre de sites possibles pour une catalyse solide, dans l'effluent des gaz de refroidissement. Le Tableau 2 illustre l'influence des conditions de combustion sur les émissions de polluants à partir de combustibles dérivés des déchets. Bien que les valeurs du Tableau 2 soient plus élevées par rapport aux combustibles fossiles, elles démontrent bien l'influence significative des conditions de combustion (Environment Canada, cité par Dyke 2004).

**Tableau 2 : Concentration de traces de substances organiques (ng/Sm<sup>3</sup> à 12% O<sub>2</sub>)<sup>a</sup> pour la de déchets dérivés des déchets**

Produit	Bonne combustion	Mauvaise Combustion
PCDD (total)	70-230	200-600
PCDF (total)	220-600	700-1300
Cl <sub>3-6</sub> benzenes <sup>b</sup>	4000-6000	7000-16000

a. Sm<sup>3</sup> = mètre cube standard, volume de gaz sec mesuré à 15°C et 101.3 kPa (comparé au Nm<sup>3</sup>, mètre cube normal, volume de gaz sec mesuré à 0°C et 101.3 kPa).

b. y compris tous les isomères tri-, tétra- et penta- aussi bien que l'hexa-chlorobenzène, complètement substitué.

Il est généralement accepté qu'une température au dessus de 900° C (McKay 2002), et un temps de résidence des gaz de 2 secondes sont suffisants pour une oxydation complète des PCDD, à condition toutefois que le débit de gaz soit suffisamment turbulent, et que l'oxygène soit en excès. McKay (2002) suggère que la température de la chambre de combustion doit être au dessus de 1000° C afin de s'assurer que tous les polluants organiques persistants sont oxydés.

D'autres facteurs importants sont l'excès d'air et les conditions de turbulence dans le four. Une forte turbulence évitera la formation de poches froides où la température d'oxydation ne serait pas atteinte. Elle permet aussi une distribution uniforme d'oxygène pour assurer une combustion totale, en évitant des zones sous-stoechiométriques si toutefois l'air est en excès. Pour évaluer l'efficacité de la combustion, un suivi du CO en temps réel peut être utile. Une combustion efficace s'accompagne d'un faible taux de CO (par exemple, 30 - 50 mg/Nm<sup>3</sup>, 6% d'oxygène pour du charbon pulvérisé ; < 100 mg/Nm<sup>3</sup> pour la combustion en lit fluidisé) (European Commission 2003). Un taux élevé de CO indique une combustion incomplète et des conditions favorables à la création de polluants organiques persistants.

Lorsqu'on utilise un combustible solide on préférera des combustibles pulvérulents à faible humidité plutôt que des combustibles broyés ou granuleux, ceci pour optimiser le mélange et les conditions de combustion. L'évaporation est une réaction endothermique et lorsqu'on introduit de l'humidité dans un four, la température de combustion décroît. L'utilisation de combustibles pulvérulents permettra d'assurer des conditions isothermes à travers tout le four et un mélange optimal avec l'oxygène dans de bonnes conditions de turbulence.

## **6.2 Mesures secondaires ; dispositifs de contrôle de la pollution de l'air**

Des dispositifs de contrôle de la pollution de l'air peuvent être installés pour limiter encore plus les émissions, bien que dans le cas de centrales à combustibles fossiles et de chaudières industrielles, ces équipements représentent des mesures additionnelles ou secondaires. Pour de plus amples détails sur les dispositifs de contrôle de la pollution de l'air, on se référera à la section III.C (iv) de ce guide.

## **6.3 Autres considérations**

Il faut préciser que la formation des PCDD, PCDF, PCB et HCB est complexe et que le fait d'éliminer les particules dans les gaz de combustion ne veut pas dire que des polluants organiques persistants ne seront pas émis. Ces techniques d'extraction, bien que très importantes pour notre environnement, ne représentent pas la seule solution. Comme il a déjà été mentionné, le contrôle de la qualité du combustible et de la combustion sont les étapes les plus importantes pour minimiser les émissions de ces polluants.

L'extraction de particules dans les gaz de combustion pourrait produire une certaine quantité de déchets poudreux contaminés qui doit être manipulée avec précaution comme un matériau pouvant contenir des polluants organiques persistants (UNECE 1998). Habituellement, les produits de combustion, comme les cendres volantes et résiduelles provenant de la combustion du charbon pulvérisé, contiennent des teneurs résiduelles très faibles de polluants organiques persistants, avec les PCDD à moins de 1 pg I-TEQ/g (Meij and te Winkel 2001). Les méthodes d'élimination seront choisies préférentiellement sur la base de la prévention du rejet d'autres contaminants, plutôt que sur la base de polluants organiques persistants qui pourraient être présents. Pour les résidus contenant des niveaux de contamination plus élevés, d'autres techniques sont conseillées pour la réduction de ces polluants organiques avant élimination. Parmi ces techniques, on trouve le traitement catalytique à basse température et à des teneurs en oxygène plus faibles, l'extraction des métaux lourds suivi d'une combustion pour détruire les matières organiques, la vitrification et la technologie au plasma. (UNECE 1998).

Un résumé des mesures représentant les meilleures solutions environnementales et les meilleures techniques disponibles est présenté au Tableau 3.

**Tableau 3. Résumé des mesures recommandées pour les centrales et les chaudières industrielles à combustible fossile**

	<b>Meilleures solutions environnementales</b>	<b>Meilleures techniques disponibles</b>	<b>Bénéfice pour l'environnement</b>
Combustible	Recherche du combustible Suivi du combustible Spécifications du combustible	Contrôle de l'alimentation en combustible pour respecter les spécifications par substitution, par purification ou par mélange	Minimisation des polluants organiques persistants introduits dans le système de combustion
Conditions de combustion	Conception appropriée pour le combustible choisi, <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température (&gt; 900° C),</li> <li>• Durée (&gt; 1 seconde),</li> <li>• Turbulence élevée,</li> <li>• Excès d'oxygène</li> </ul> Faire fonctionner et entretenir pour atteindre les conditions de combustion prévues  Développer des conditions et procédures de fonctionnement adaptées à la co-combustion, en particulier pendant le démarrage et l'arrêt du four	Systèmes de contrôle de combustion automatisés, ou sur ordinateur, pour assurer les conditions idéales de combustion  Optimiser l'oxydation en maintenant le mélange idéal combustible/oxygène	Destruction des polluants organiques persistants présents dans le combustible,  Minimisation de ces polluants pendant la combustion
Captage des gaz	Mise en place et entretien des équipements existants de contrôle de la pollution de l'air	Evaluer la possibilité de réduire l'impact sur l'environnement en installant un dispositif de contrôle de la pollution de l'air  Installer ce dispositif de contrôle si cet impact sur l'environnement est démontré	Minimiser la teneur en polluants organiques persistant dans les gaz
Elimination de déchets	Recueillir les déchets solides et liquides provenant du procédé de combustion, ainsi que du dispositif de contrôle de la pollution de l'air  Manipuler et stocker de manière appropriée pour minimiser les rejets vers l'environnement	Evaluer le potentiel d'une réduction et du recyclage des déchets  Elimination sans risque	Minimiser et contrôler les rejets vers l'environnement

## **7. Niveaux de performances associés aux meilleures techniques disponibles**

Les données disponibles suggèrent que pour une chaudière efficace ne brûlant que du charbon, de l'huile, ou du gaz, le niveau de performance atteignable en termes d'émissions volumétriques de PCDD/PCDF pour les centrales électriques et les chaudières industrielles utilisant des combustibles fossiles sera bien inférieur à 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>. (Contenu d'oxygène : 6% pour les combustibles solides et 3% pour les combustibles liquides)

**Annexe I. Facteurs d'émission <sup>a</sup> pour les PCDD/PCDF provenant de la combustion contrôlée de charbons bitumineux et sous-bitumineux (ng/kg <sup>b</sup>)**

Congénère	Absorbeur à pulvérisation pour la désulfuration de gaz de combustion et filtres à tissu <sup>c</sup>	Electrofiltre ou filtre en tissu <sup>d</sup>
2,3,7,8-TCDD	n.d.	0,0072
TCDD total	0,197	0,046
PeCDD total	0,353	0,022
HxCDD total	1,50	0,014
HpCDD total	5,00	0,042
OCDD total	14,4	0,208
<b>PCDD<sup>e</sup> total</b>	<b>21,4</b>	<b>0,333</b>
2,3,7,8-TCDF	n.d.	0,026
TCDF total	1,25	0,202
PeCDF total	2,42	0,177
HxCDF total	6,35	0,096
HpCDF total	22,0	0,038
OCDF total	68,5	0,033
<b>PCDF<sup>e</sup> total</b>	<b>101</b>	<b>0,545</b>
<b>PCDD/PCDF TOTAL</b>	<b>122</b>	<b>0,880</b>

n.d. Non déterminé

a. Données EPA (1998) converties à partir de lb/tonne de charbon brûlé, en ng/kg.

b. Les facteurs d'émission devraient être appliqués au charbon tel qu'il est brûlé. Les émissions sont exprimées en ng de polluant par kg de charbon brûlé.

c. Les facteurs s'appliquent aux chaudières équipées d'absorbeurs à pulvérisation, ou de filtres en tissu, pour désulfurer les gaz de combustion. SCC = charbon pulvérisé brûlé, chaudières à fond sec, 1-01-002-02/22, 1-02-002-02/22, et 1-03-002-06/22.

d. Les facteurs s'appliquent aux chaudières équipées d'électrofiltre ou filtre en tissu. SCC = charbon pulvérisé brûlé, chaudières à fond sec, 1-01-002-02/22, 1-02-002-02/22, et 1-03-002-06/22 et chaudières à cyclones, 1-01-002-03/23, 1-02-002-03/23 et 1-03-002-03/23.

e. Le total PCDD est la somme de TCDD total à OCDD total. Le total PCDF est la somme de TCDF total jusqu'à OCDF total.

## Références

- Bailey R.E. 2001. "Global Hexachlorobenzene Emissions." *Chemosphere* 43:2.
- CIBO (Council of Industrial Boiler Owners). 2002. *Submission to USEPA by Council of Industrial Boiler Owners*. [www.epa.gov/airmarkets/fednox/mar99/bessette.pdf](http://www.epa.gov/airmarkets/fednox/mar99/bessette.pdf).
- Detzel A., Patyk A., Fehrenbach H., Franke B., Gingrich J., Lell M. and Vogt R. 1998. *Investigation of Emissions and Abatement Measures for Persistent Organic Pollutants in the Federal Republic of Germany*. UBA-Texte 75/98. IFEU, Heidelberg.
- Dyke P. 2004. *PCB and PAH Releases from Incineration and Power Generation Processes*. R&D Technical Report P4-052. Environment Agency, Bristol, UK.  
[www.pops.int/documents/implementation/nips/guidance/en/techrep.pdf](http://www.pops.int/documents/implementation/nips/guidance/en/techrep.pdf) .
- Eduljee G.H. and Cains P. 1996. "Control of PCDD and PCDF Emissions from Waste Combustors." In: *Chlorinated Organic Micropollutants* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Environment Canada. 2004. *Controlling PCBs: The Options Available*. Canadian Council of Resource and Environment Ministers. [www.ec.gc.ca/pcb/ccme\\_fs4/eng/pcb33\\_e.htm](http://www.ec.gc.ca/pcb/ccme_fs4/eng/pcb33_e.htm).
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998. *External Combustion Sources: Bituminous and Subbituminous Coal Combustion*. Background Report AP-42, 5<sup>th</sup> Edition, Vol. I.
- European Commission. 2003. *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. Draft BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.
- Griffin R.D. 1986. "A New Theory of Dioxin Formation in Municipal Solid Waste Combustion." *Chemosphere* 15:1987–1990.
- Lemieux P.M. 1998. *Polychlorinated Dioxins and Furans: Sources, Emissions, Formation and Control*. Presented at UNEP Regional Awareness Raising Workshop on POPs, Puerto Iguazu, Argentina, 1–3 April 1998.
- Luthe C., Karidio I. and Uloth V. 1997. "Towards Controlling Dioxins Emissions from Power Boilers Fuelled with Salt-Laden Wood Waste." *Chemosphere* 35:3.
- McKay G. 2002. "Dioxin Characterization, Formation and Minimization during Municipal Solid Waste (MSW) Incineration: Review." *Chemical Engineering Journal* 86:343–368.
- Meij R. and te Winkel H. 2001. *Health Aspects of Coal Fly Ash*. Paper No. 21, 2001 International Ash Utilization Symposium, Kentucky, USA.
- Oland C.B. 2002. *Guide to Low-Emission Boiler and Combustion Equipment Selection*. Report No. ORNL/TM-2002/19. United States Department of Energy, Office of Industrial Technologies.  
[www.oit.doe.gov/cfm/fullarticle.cfm/id=653](http://www.oit.doe.gov/cfm/fullarticle.cfm/id=653).
- Rentz O., Gütling K. and Karl U. 2002. *Exemplary Investigation into the State of Practical Realization of Integrated Environmental Protection with Regard to Large Combustion Plants in Germany*. Project 200 46 317. German Federal Environment Agency. [www.umweltdaten.de/nfp-bat-e/feuerungsanlagen-e.pdf](http://www.umweltdaten.de/nfp-bat-e/feuerungsanlagen-e.pdf).
- Richards J. 2004. *Basic Concepts in Environmental Sciences*.  
[www.epin.ncsu.edu/apti/ol\\_2000/module6/dioxins/control/contfram1.htm](http://www.epin.ncsu.edu/apti/ol_2000/module6/dioxins/control/contfram1.htm).
- Sloss L.L. 2001. *Organic Compounds from Coal Utilisation*. International Energy Agency Coal Research, London. [www.enel.it/ambiente/directory/iea\\_VOC\\_pf01-08.pdf](http://www.enel.it/ambiente/directory/iea_VOC_pf01-08.pdf).
- Sloss L.L. and Smith I.M. 1993. *Organic Compounds from Coal Utilization*. International Energy Agency Coal Resources Report IEACR/63. London.

Tsai M.-Y., Wu K.-T., Huang C.-C. and Lee H.-T. 2002. "Co-firing of Paper Mill Sludge and Coal in an Industrial Circulating Fluidized Bed Boiler." *Waste Management* 22:4.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). 1998. *Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Persistent Organic Pollutants*. New York and Geneva. [www.unece.org/env/lrtap/full%20text/1998.POPs.e.pdf](http://www.unece.org/env/lrtap/full%20text/1998.POPs.e.pdf).

UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Guidelines on BAT and BEP for Municipal Waste Incineration*. Draft. UNEP, Geneva. [www.pops.int/documents/meetings/bat\\_bep/2nd\\_session/inf10/EGB2\\_INF10\\_munwaste\\_incineration.pdf](http://www.pops.int/documents/meetings/bat_bep/2nd_session/inf10/EGB2_INF10_munwaste_incineration.pdf).

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases Edition 2.1*. UNEP, Geneva. [www.chem.unep.ch/pops/pcdd\\_activities/toolkit/Toolkit%20-%20version/Toolkit-2005\\_2-1\\_en.pdf](http://www.chem.unep.ch/pops/pcdd_activities/toolkit/Toolkit%20-%20version/Toolkit-2005_2-1_en.pdf).

Van Remmen T. 1998. "Evaluation of the Available Air Pollution Control Technologies for the Achievement of the MACT Requirements in the Newly Implemented New Source Performance Standards (NSPS) and Emission Guidelines (EG) for Hospital and Medical/Infectious Waste Incinerators." *Waste Management* 18:393–402.

Williams P.T. 1994. "Pollutants from Incineration: An Overview." In: *Waste Incineration and the Environment* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.

## Autres sources

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2004. [www.atsdr.cdc.gov/](http://www.atsdr.cdc.gov/).

BREDL (Blue Ridge Environmental Defence League). 2000. *Clean Air Campaign*. [www.bredl.org/air/riverbend-danriver.htm](http://www.bredl.org/air/riverbend-danriver.htm).

Buekens A. and Huang H. 1998. "Comparative Evaluation of Techniques for Controlling the Formation and Emission of Chlorinated Dioxins/Furans in Municipal Waste Incineration." *Journal of Hazardous Materials* 62:1–33.

Eduljee G.H. 1994. "Organic Micropollutant Emissions from Waste." In: *Waste Incineration and the Environment* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Egyptian Environmental Affairs Agency. 2004. *National Implementation Plan Project of POPs Convention*. [www.eeaa.gov.eg/English/NIPP/NIPP\\_conv.asp](http://www.eeaa.gov.eg/English/NIPP/NIPP_conv.asp).

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1997. *Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Dioxins and Furans*. EPA-454/R-97-003. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, Washington, D.C.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998. *The Inventory of Sources of Dioxin in the United States*. EPA, Washington, D.C. [www.epa.gov/ttnchie1/le/dioxin.pdf](http://www.epa.gov/ttnchie1/le/dioxin.pdf).

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. *Exposure and Health Assessment for 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and Related Compounds*. Draft. EPA, Washington, D.C. [www.epa.gov/ncea/pdfs/dioxin/part2/fm-chap9.pdf](http://www.epa.gov/ncea/pdfs/dioxin/part2/fm-chap9.pdf).

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2003. *PCDD and PCDF: Sources and Regulations Addendum*. EPA, Washington, D.C. [epa.gov/bns/dioxin/PCDD\\_DF\\_regs.PDF](http://epa.gov/bns/dioxin/PCDD_DF_regs.PDF).

EPRI (Electric Power Research Institute). 1994. *Electric Utility Trace Substances Synthesis Report*. TR-104614. EPRI, Palo Alto, California.

Hagenmaier H., Kraft M., Haag R. and Brunner H. 1988. In: *Energy Recovery through Waste Combustion* (eds. Brown A., Evemy P. and Ferrero G.L.) Elsevier Applied Science.

- Harrad S. 1996. "Sources and Fates of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins, Dibenzofurans and Biphenyls: The Budget and Source Inventory Approach." In: *Chlorinated Organic Micropollutants* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- IPEN (International POPs Elimination Network). 2003. *Information Relevant to the Basel Convention's Hazardous Characteristic H11*. [www.ciel.org/Publications/POPs\\_Basel\\_Sep03.pdf](http://www.ciel.org/Publications/POPs_Basel_Sep03.pdf).
- Kreisz S., Hunsinger H. and Seifert H. 2000. "Polypropylene as Regenerable Absorber for PCDD/F Emission Control." *Chemosphere* 40:1029–1031.
- Lohmann R. and Jones K.C. 1998. "Dioxins and Furans in Air and Deposition: A Review of Levels, Behaviour and Processes." *The Science of the Total Environment* 219:53–81.
- Magasiner N. 1996. "Bagasse-Fired Boiler Design with Reference to Co-generation." *International Sugar Journal* 98:100.
- Magasiner N., van Alphen C., Inkson M.B. et al. 2002. "Characterising Fuels for Biomass: Coal-Fired Cogeneration." *International Sugar Journal* 104:251.
- Manno J., Riedel D. and Trembley N. 1995. *Effects of Great Lakes Basin Environmental Contaminants on Human Health*. SOLEC Working Paper presented at State of the Great Lakes Ecosystem Conference. EPA, Washington, D.C. [www.epa.gov/grtlakes/solec/94/health](http://www.epa.gov/grtlakes/solec/94/health).
- New Zealand Ministry for the Environment. 2000. *New Zealand Inventory of Dioxin Emissions to Air, Land and Water, and Reservoir Sources*. [www.mfe.govt.nz/publications/hazardous/dioxin-emissions-inventory-mar00.pdf](http://www.mfe.govt.nz/publications/hazardous/dioxin-emissions-inventory-mar00.pdf).
- Oberg T. and Bergstrom J. 1985. "Hexachlorobenzene as an Indicator of Dioxin Production from Combustion." *Chemosphere* 14:1081–1086.
- Olsen A. 2001. *Co-burning Biomass Opportunities in Wisconsin: A Strategic Assessment*. Final Report. Contract No. 80081, Division of Energy. [www.doa.state.wi.us/docs\\_view2.asp?docid=56](http://www.doa.state.wi.us/docs_view2.asp?docid=56).
- Rigo H.G., Chandler A.J. and Lanier W.S. 1995. *The Relationship between Chlorine in Waste Streams and Dioxin Emissions from Waste Combustor Stacks*. American Society of Mechanical Engineers. [www.heartland.org/pdf/23143b.pdf](http://www.heartland.org/pdf/23143b.pdf).
- Ruuskanen J., Vartiainen T. et al. 1994. "Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Co-combustion of Mixed Plastics with Coal: Exploratory Principal Component Analysis." *Chemosphere* 28:11.
- Tillman D.A. 2000. "Biomass Co-firing: The Technology, the Experience, the Combustion Consequences." *Biomass and Bioenergy* 19:6.
- Van den Berg M., Birnbaum L., Bosveld B.T.C., Brunstrom B., Cook P., Feeley M., Giesy J.P., Hanberg A., Hasegawa R., Kennedy S.W., Kubiak T., Larsen J.C., van Leeuwen F.X.R., Liem A.K.D., Nolt C., Peterson R.E., Poellinger L., Safe S., Schrenk D., Tillitt D., Tysklind M., Younes M., Waern F. and Zacharewski T. 1998. "Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for Humans and Wildlife." *Environmental Health Perspectives* 106:775–792.
- WHO (World Health Organization). 1998. *Assessment of the Health Risks of Dioxins: Re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI)*. Executive Summary of the WHO Consultation, 25–29 May 1998. WHO, Geneva.
- Yan J.Y., Alvfors P., Eidensten L. and Svedberg G. 1997. "A Future for Biomass." *Mechanical Engineering* 119:10.
- Zevehoven R. and Kilpinen P. 2001. *Control of Pollutants in Flue Gases and Fuel Gases*. [www.hut.fi/~rzevenho/gasbook](http://www.hut.fi/~rzevenho/gasbook).

---