

Facteurs d'émission pour les dioxines et les furannes produits par combustion dans les usines de pâtes et papiers

Préparé pour Environnement Canada

par
Vic Uloth et Ron van Heek,
PAPRICAN, Prince George, C.-B.
5 novembre 2002.



INSTITUT CANADIEN DE RECHERCHES SUR LES PÂTES ET PAPIERS • 3800 WESBROOK MALL, VANCOUVER (C.-B.), CANADA V6S 2L9

Facteurs d'émission pour les dioxines et les furannes produits par combustion dans les usines de pâtes et papiers

**par
Vic Uloth et Ron van Heek
Paprican, Prince George, C.-B.**

Résumé

L'examen des publications et des données sur les émissions compilées par le NCASI et Paprican permet de recommander les facteurs d'émission ci-après pour l'estimation des émissions de dioxines et de furannes des procédés de combustion des usines de pâtes :

- pour les chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées) – 40 ng ET/t anhydre de déchets de bois brûlés;
- pour les chaudières de production d'énergie alimentées par mélange de déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées) et des boues de désencrage – 750 ng ET/t anhydre de déchets de bois brûlés;
- pour les chaudières de récupération de produits chimiques kraft alimentées par de la liqueur noire – 15 ng ET/tonne anhydre de matières solides de liqueur noire;
- pour les fours à chaux chauffés au gaz naturel ou au mazout lourd – 9 ng ET/tonne de chaux produite;
- pour les réservoir de dissolution de salin (réservoirs de dissolution de salin (terminologie du MENV Québec) des usines kraft – 0,55 ng ET/tonne anhydre de matières solides de liqueur noire;
- pour les chaudières de récupération du bisulfite – 0,5 ng ET/tonne de matières solides de liqueur rouge.

- Les concentrations de dioxines et de furannes des cendres des chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées), estimées à partir des médianes de 76 échantillons de cendres provenant de 54 installations ont été compilées par le NCASI et Paprican. Ce sont :
 - 0,02 pg ET/g de cendres de grille ou de cendrier;
 - 0,10 pg ET/g de cendres de multicyclones;
 - 0,46 pg ET/g de cendres de PES (précipitateurs ou dépoussiéreurs électrostatiques) ou d'épurateurs de gaz humides ou de cendres volantes mixtes.

- En l'absence de données mesurées, les quantités de chaque type de cendres peuvent être estimées à partir des données compilées par Paprican pour les chaudières de production d'énergie en zone côtière alimentées par des déchets de bois chargés de sel :
- 15 – 20 kg de cendres de grille/tonne anhydre de déchets de bois brûlés;
- 12 – 16 kg de cendres de multicyclones/tonne anhydre de déchets de bois brûlés;
- 18 – 41 kg de cendres de PES ou de épurateur de gaz humide/tonne anhydre de déchets de bois brûlés.

1. Introduction

Les rejets de dioxines et de furannes (D/F) font maintenant partie de la liste des substances devant être déclarées à l'Inventaire national des rejets de polluants (INRP). Ce sont des substances coûteuses à analyser et on s'en remet beaucoup à l'utilisation de facteurs d'émission, comme ceux de la publication USEPA AP-42. Divers secteurs de l'industrie des produits forestiers ont fait état de difficultés à obtenir des facteurs d'émission exacts. Ce problème est aggravé par le fait qu'aucune autorité compétente n'a compilé de liste de facteurs d'émission pour ces substances. Les données des publications, comme la USEPA AP-42, sont largement utilisées, mais bon nombre des facteurs que l'on y trouve sont dépassés et ne reflètent pas les résultats des essais récents.

PAPRICAN a donc entrepris d'élaborer, dans le cadre d'une entente avec Environnement Canada, une série de facteurs d'émission, accompagnés de la documentation justificative, destinée aux déclarants à l'INRP des secteurs des pâtes et papiers (P et P) et des produits forestiers. Il est à souhaiter que les recommandations ainsi formulées permettent, une fois communiquées à l'industrie, d'améliorer la déclaration obligatoire des D/F à l'INRP.

L'élaboration de facteurs d'émission scientifiquement valables suppose de réaliser les tâches suivantes :

- Un examen des publications scientifiques sur la formation et l'émission des D/F au cours de divers procédés de combustion du secteur des P et P.
- Un examen de tous les résultats valables des essais à la cheminée des sources de D/F du secteur des P et P au Canada et dans d'autres pays.

À partir des résultats de cet examen, des facteurs d'émission fondés sur des critères scientifiques seront proposés pour certaines opérations des usines de pâtes et papiers, notamment celles :

- des chaudières de production d'énergie alimentées avec des déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées);

- des chaudières de production d'énergie alimentées avec un mélange de déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées) et des boues de désencrage;
- des chaudières de récupération incinérant de la liqueur noire;
- des fours à chaux chauffés au gaz naturel et/ou au mazout lourd;
- des réservoir de dissolutions de salin;
- des chaudières de récupération du bisulfite.

2. Examen des publications

2.1 Chaudières de production d'énergie alimentées avec des déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées)

2.1.1 Fondement de l'examen du facteur d'émission actuel

Au moment de l'élaboration de son facteur d'émission recommandé pour la combustion du bois d'origine industrielle, de 0,82 ng ET/kg de bois brûlé (EPA/600/P-98/002Aa, avril 1998), l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) s'est en grande partie fondée sur une série de quatre essais, portant sur cinq chaudières de combustion de bois industriel, réalisés par le Air Resources Board de la Californie (CARB, 1990a – d). Deux des chaudières étaient des chaudières de type « Quad-cell » alimentées au bois (CARB, 1990 a et d). Ces chaudières n'étaient alimentées qu'avec des déchets de bois propres et de la sciure et leurs émissions étaient inférieures (0,50 et 0,64 ng ET/kg de bois brûlé) à la moyenne tirée des essais du CARB qui était acceptée par l'EPA comme un facteur d'émission acceptable (EPA/600/P-98/002Aa, avril 1998). Les chaudières de type « Quad cell » ou à pile à combustible sont maintenant rarement utilisées dans les usines de pâtes et papiers canadiennes pour l'incinération des déchets de bois et s'avèrent relativement inefficaces comparativement aux chaudières à foyer à projection et à grille ou à celles à lit fluidisé. Des études réalisées à une usine de pâtes située sur la côte de la Colombie-Britannique ont montré que la production et les émissions de dioxines d'une chaudière à deux piles à combustible alimentée avec des déchets de bois chargés de sel étaient de huit fois environ supérieures à celles d'une plus grande chaudière à foyer à projection utilisée au même endroit.

En outre, les trois autres chaudières ayant fait l'objet d'essais du CARB étaient alimentées par des déchets mixtes. Les deux chaudières à foyer à projection testées à une centrale électrique (facteur d'émission de 0,82 ng ET/kg de bois brûlé) étaient alimentées avec un mélange à 70:30 de déchets de bois et de « déchets de bois urbains » (CARB, 1990b). La chaudière à lit fluidisé ayant fait l'objet d'essais du CARB (facteur d'émission de 1,32 ng ET/kg de bois brûlé) était aussi alimentée par des déchets de bois dont la nature et l'origine n'étaient pas précisées, du moins dans le sommaire de l'EPA, (EPA, 1998) et avec des déchets agricoles autorisés par les permis en vigueur (EPA, 1998; CARB, 1990c). Les résultats de ces essais devraient être évalués avec prudence, car plusieurs chercheurs ont

montré que la combustion de « déchets de bois urbains » et de produits à base de bois, comme le contreplaqué, les panneaux d'aggloméré et le bois traité, donnait lieu à des émissions de dioxines beaucoup plus élevées que la combustion de bois « naturel » propre ou d'écorces (voir le tableau 2.1.1 plus loin). Nakao et coll. (2002) ont montré que les quantités de dioxines formées par l'incinération à ciel ouvert de déchets de bois urbains (wood scrap = déchets non propres) étaient de 10 à 230 fois supérieures à celles formées par la combustion de bois naturel au cours d'un incendie de forêt. Schatowitz et coll. (1994) ont aussi montré que la combustion de déchets de bois en copeaux provenant de la démolition d'édifices donnait lieu à des émissions de dioxines de 82 à 216 fois supérieures à celles de la combustion de copeaux de bois naturel, ou même de celles de copeaux de panneaux d'aggloméré non revêtus, dans un four à bois. Kolenda et coll. (1994) ont montré que la combustion de contreplaqué (durci au $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, avec ou sans revêtement de PVC) ou de contreplaqué et de mélanges de bois non traité dans sept importantes installations de combustion du bois (>1 MW) donnait lieu à des émissions de dioxines de 5 à 70 fois supérieures à celles de la combustion de bois de pin non traité. Oehme et Muller (1995) ont aussi montré que la combustion de déchets de bois traité au pentachlorophénol donnait lieu à des concentrations de dioxines dans les cendres de la chambre de filtration de 10 à 100 fois supérieures à celles notées pour la combustion de bois « naturel ».

Comme les études du CARB utilisées par l'EPA pour estimer son facteur d'émission ont été réalisées à partir de piles à combustible inefficaces et âgées ou de chaudières alimentées avec des déchets mixtes, notamment des déchets de démolition, du bois traité ou des déchets agricoles humides, il est probable que ce facteur d'émission surestime de façon importante les émissions d'une chaudière relativement moderne à foyer à projection ou à lit fluidisé exclusivement alimentée avec des déchets de bois propre, comme du bois déchiqueté.

2.1.2 Émissions de la combustion du bois en milieu résidentiel

La partie 4.2 du document EPA/600/P-98/002Aa (avril 1998) résume très bien les résultats des essais des dioxines portant sur la combustion du bois en milieux résidentiel et industriel réalisés jusqu'en 1996. De larges gammes d'émissions et de facteurs d'émission ont été obtenues pour ces deux types de combustion. Dans le cas des poêles à bois résidentiels alimentés exclusivement avec du bois propre, les émissions de dioxines variaient de 0,064 ng à 0,18 ng ET/m³N (m³N = mètre cube de gaz normal, N, à l'état sec; la mention normale, N, fait référence au fait que les volumes et les débits du gaz ont été normalisés aux conditions « normales » de température, de 273 K, et de pression, de 101,325 kPA ou 1 atmosphère). Les facteurs d'émission correspondants variaient de 0,77 à 1,9 ng ET/kg de bois sec. L'EPA a ensuite recommandé un facteur d'émission relativement prudent de 2 ng ET/kg de bois sec pour la combustion du bois en milieu résidentiel en se fondant sur le fait qu'un bon pourcentage du bois utilisé dans les demeures était brûlé dans des foyers qui sont moins efficaces que les poêles à bois. Des essais effectués plus récemment par Environnement Canada (Rapport DRME 2000-01, 2000) montrent que ce facteur d'émission est environ quatre fois trop élevé pour les poêles à bois résidentiels et que les estimations des rejets de ce secteur ont ensuite été réduites de façon appréciable de par l'application d'un facteur d'émission de 0,5 ng ET/kg de bois.

2.1.3 Émissions de la combustion du bois en milieu industriel

En ce qui concerne la combustion du bois en milieu industriel (EPA/600/P-98/002Aa, avril 1998), nous avons examiné les résultats des quatre études du CARB (résumées plus haut) et d'essais portant sur cinq chaudières alimentées avec des écorces et des résidus de bois (NCASI, 1995). Le facteur d'émission moyen obtenu pour les chaudières au cours de l'étude du NCASI (0,4 ng ET/kg de combustible) étant semblable à ceux des études du CARB, l'EPA a décidé, ici aussi, d'utiliser l'estimation la plus conservatrice (0,82 ng ET/kg de bois). Mais comme certaines des unités évaluées par le NCASI se trouvaient dans des installations de traitement de produits du bois, il est probable que les résultats ont été faussés à la hausse en raison de la combustion de déchets de bois traité.

Se fondant sur des essais réalisés par l'EPA et portant sur un four hollandais à trois chambres situé à une usine de produits de bois d'oeuvre où tout le bois était stocké dans de l'eau salée, le rapport de l'EPA (1998) signale que le facteur d'émission proposé pourrait ne pas être adéquat pour les installations brûlant des déchets de bois présentant des teneurs élevées en chlorure (voir la partie 2.1.4). Il était aussi signalé que les essais de Umweltbundesamt (1996), portant sur 30 installations de conceptions diverses brûlant divers types de combustibles ligneux, faisaient état d'émissions de dioxines et de furannes élevées quand les conditions de combustion étaient mauvaises, comme l'indiquaient des émissions élevées de monoxyde de carbone et/ou lorsque le combustible présentait des concentrations élevées de chlore ou de chlorure. Il s'est avéré que les panneaux d'aggloméré, le bois traité par un agent de conservation et le bois revêtu de PVC pouvaient contenir, respectivement, jusqu'à 0,2, 1,2 et 0,3 % de chlorure en poids, comparativement à une teneur de chlorure normale de 0,001 à 0,01 % pour du bois et de l'écorce non traités (EPA, 1998). Les niveaux d'émission types signalés au cours d'études portant sur des chaudières alimentées au bois sont résumés au tableau 2.1.1. Les concentrations élevées de chlorure de plusieurs sources de déchets de bois expliquent, du moins en partie, les émissions de dioxines plus élevées notées pendant la combustion de déchets de démolition ou de bois traité comparativement à celles de déchets de bois naturels ou propres (Nakao et coll., 2002; Schatowitz et coll.; 1994, Kolenda et coll., 1994, et Oehme et Muller, 1995).

Tableau 2.1.1 : Émissions de dioxines résultant de la combustion de déchets de bois

Références	Type de foyer	Nature du combustible	Émissions de dioxines, pg ET/m ³ N (@ 11 % O ₂)	Facteurs d'émission, ng ET/kg de bois sec
Schatowitz, 1994	Chaud. automat. à copeaux Chaud. automat. à copeaux Chaud. automat. à copeaux Poêle domestique	Copeaux de bois Aggloméré non revêtu Déchets de démolition Déchets domestiques	66 - 214 24 - 76 2 700 - 14 200 114 000	0,79 - 2,57 0,29 - 0,91 26 - 173,3 3 230 000
CARB, 1990 a-d	Quad cell Quad cell Foyer à projection Chaud. à lit fluidisé	Déchets de bois Déchets de bois Déchets de bois et de bois urbains Déchets de bois et agricoles	116* 246* 246* 229*	0,50 0,64 0,82 1,32
NCASI, 1995	Deux foyers au charbon et trois foyers à projection	Déchets de bois à diverses installations de produits du bois et usines de pâtes	0,4 - 281*	0,4
Kolenda, 1994	Incinérateur de 9,6 MW Incinérateur de 9,6 MW Incinérateur de 9,6 MW Incinérateur à grille de 39 MW	Bois de pin Résidus de contreplaqué Résidus de bois traité et non traité Résidus de bois et de contreplaqué revêtu	3 - 5 2 - 210 25 110 - 150	
Zimmerman, 2001	Foyer pilote de 1 MW	Déchets de bois - bonnes conditions de combustion Déchets de bois - oxygénation insuffisante	12 - 16 51 - 94	
Valttila, 1993	Lit fluidisé (65 - 84 MW) Foyer mécanique à grille (47 MW) Lit fluidisé circulaire (59 MW)	Écorces et boues d'épuration d'eaux usées d'usine de pâtes	140 - 390 1 090 710	
Maatila, 1992	Chaudière de chauffage centralisé de 60 MW	Écorces et charbon Écorces, charbon et déchets de plastique chloré	16,4 - 23 38 - 103	
Pandompatam, 1997	Incinérateur pilote à trois chambres et alimentation en discontinu	Écorces de tremble (0,007 % de Cl) Écorces de tremble imbibées d'eau salée (0,76 % de Cl)	20 3 200	
EPA, 1998	Chaudière à four hollandais	Déchets de bois chargés de sel		17,1

* à 12 % de CO₂; voir l'annexe A

Au contraire de plusieurs des études susmentionnées, des essais de combustion réalisés à une chaudière de production d'énergie à la Northwood Pulp, à Prince George, en C.-B., et portant sur l'utilisation de déchets de bois déchiqueté contaminé par le chlorophénol, ont montré un important niveau de destruction des dioxines (LC Engineering, avril 1989). La chaudière était exploitée en régime de production de vapeur de 100 tonnes environ par heure, ou à 60 % de sa capacité maximale nominale. Huit essais ont été réalisés à la fin de septembre 1987. Deux essais ont été effectués pour obtenir une ligne de base (sans chlorophénol), trois avec un combustible sous forme de déchets de bois auxquels on avait ajouté du chlorophénol à raison de 57 ug/g et trois avec des déchets de bois dont la concentration en chlorophénol était de 436 ug/g. Tous les dioxines et furannes ont été détruits pendant les essais de détermination de la ligne de base et ceux des échantillons à faible ajout de chlorophénol. Des traces de dioxines et de furannes ont été décelées dans les gaz de cheminée pendant les essais où la teneur en chlorophénol était élevée, mais l'efficacité de destruction des dioxines variait de 99,9994 à 100 %. L'étude signalait cependant la nécessité d'évaluer l'efficacité de destruction quand la chaudière fonctionnait à un régime approchant sa capacité maximale nominale.

2.1.4 Effets des chlorures et du chlore sur les émissions de dioxines et de furannes

Pandompatam et coll. (1997) du Environmental Centre de l'Alberta ont utilisé un incinérateur à trois chambres alimenté en discontinu pour la combustion d'écorces déchiquetées avec ou sans ajout de sel. Des écorces de tremble propres, non traitées si ce n'est pour les déchiqueter, ont été utilisées comme échantillon témoin. L'échantillon utilisé pour l'essai était formé d'écorces semblables immergées dans une saumure de NaCl et ensuite séchées à l'air jusqu'à l'obtention d'un taux d'humidité comparable à celui de l'échantillon témoin. Les teneurs en chlorure des deux échantillons étaient respectivement de 0,007 et de 0,76 %, en poids sec, de combustible déchiqueté. Les émissions de dioxines et de furannes obtenues étaient de 0,02 et de 3,2 ng ET/m³N, ce qui démontre la possibilité d'utiliser des déchets de bois artificiellement chargés de sel pour étudier les effets de la teneur en chlorure des déchets sur les émissions de dioxines et de furannes. Vesterinen et Flyktman (1996), au cours d'une co-combustion de déchets et de copeaux de bois dans une chaudière à lit fluidisé bouillonnant de 4 MW ont décelé une nette relation entre la teneur en chlore du combustible et les concentrations de dioxines et de furannes dans les gaz de cheminée. Dans le cadre de travaux à l'échelle pilote, Halonen et coll. (1993 a,b) ont aussi noté que la teneur en chlore du combustible présentait une bonne corrélation avec les concentrations de dioxines et de furannes aux températures élevées des gaz, c'est-à-dire à la sortie de la chaudière, mais que cette corrélation disparaissait à mesure que la température des gaz diminuait. Maatila et coll. (1992) ont aussi trouvé que les émissions de dioxines et de furannes d'une chaudière de chauffage centralisé de 60 MW augmentaient d'un facteur de 2 à 5 lorsque des déchets de plastique chloré étaient brûlés en même temps que du charbon et de l'écorce. Dans cette étude, les concentrations de dioxines et de furannes présentaient une meilleure corrélation avec les teneurs de HCl des gaz de cheminée qu'avec les concentrations de chlore du combustible.

2.1.5 Effets de la combustion mixte avec des boues d'épuration d'eaux usées

Des études portant sur la chaudière de production d'énergie n° 5 de l'usine de pâtes et papiers d'Elk Falls de la Fletcher Challenge Canada (Bovar-Concord Environmental, mai 1994) ont montré que l'élimination de boues d'épuration d'eaux usées par leur incinération dans la chaudière alimentée aux déchets de bois n'avait pas donné lieu à une augmentation appréciable de la plupart des émissions à la cheminée, que ce soit en régime normal ou en régime de rattrapage. Cette chaudière était aussi alimentée par des déchets de bois chargés de sel et présentait alors des émissions de dioxines de beaucoup supérieures à une chaudière de production d'énergie alimentée par des déchets de bois propres (Luthe et coll., 1996). Une réduction des émissions de dioxines et de furannes à la cheminée correspondant à une augmentation de la combustion de boues a ensuite été expliquée par la présence de soufre, contenu dans les boues, et donc par la réduction du rapport chlorure/soufre de la biomasse mixte servant de combustible (Luthe et coll., 1996; Luthe et coll., 1998b). Le NCASI (1995) a aussi noté une réduction des émissions de dioxines et de furannes dans une installation où l'on brûlait des déchets de bois propres et des boues activées (0,001 ng ET/kg de combustible) comparativement aux émissions moyennes (0,82 ng ET/kg de combustible) des cinq chaudières de l'étude du CARB (1990 a – d).

Par ailleurs, Valttila (1993) a trouvé que lorsque de 5 à 14 % de boues activées étaient brûlées avec des écorces dans trois types de chaudières d'usines de pâtes, les émissions de dioxines et de furannes étaient plus élevées que celles obtenues par la combustion d'écorces seulement (voir le tableau 2.1.1). Il a aussi constaté que la combustion d'une quantité de boues pouvant atteindre 20 % dans une chaudière à lit fluidisé bouillonnant ne donnait pas lieu à des émissions supérieures à celles de la combustion de 5 à 14 % de boues lorsque de bonnes conditions de combustion étaient maintenues. Valttila a attribué l'augmentation des émissions de dioxines et de furannes dans chacune des chaudières aux plus fortes concentrations de chlore ou de chlorure des boues comparativement aux écorces.

De façon générale, l'effet des boues sur les émissions de dioxines et de furannes dépend sans doute des teneurs en chlorure, en soufre et en eau des boues par rapport à celle des déchets de bois. Si la teneur en chlorure des boues est passablement supérieure à celle des déchets de bois et qu'il n'y a pas augmentation correspondante de la teneur en soufre des boues, il y aura probablement augmentation de la formation de dioxines. De même, si les boues sont passablement humides elles auront sans doute pour effet de réduire l'efficacité de combustion de la chaudière et d'accroître les possibilités de formation de dioxines et de furannes.

2.2 Chaudières de production d'énergie alimentées avec un mélange de déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées) et de boues de désencrage

Douglas et coll. (1997) ont examiné les résultats d'essais sur le terrain portant sur la combustion de boues de désencrage de papier (BDP) dans une unité du Projet canadien de combustion de biomasse en lit fluidisé rattachée à la chaudière n° 4 à foyer mécanique à grille de l'usine de pâtes de la Avenor (maintenant la Bowater) de Thunder Bay. Le lit fluidisé breveté de la ABB comporte une chambre revêtue d'un matériau réfractaire. Afin

de récupérer la chaleur, les gaz de combustion étaient amenés par une conduite dans le cendrier de la chaudière n° 4. Les auteurs ont noté que la déshydratation mécanique permettait de réduire la teneur en eau des BDP de 40 à 60 %, mais que la forte teneur en matières inertes de ces matériaux les rendait difficiles à brûler dans un foyer mécanique à grille. Les gaz de cheminée de la chaudière numéro 4 ont fait l'objet de trois séries d'essais des émissions pendant que l'on procédait à l'incinération de jusqu'à 4 t/h de BDP dans le lit fluidisé annexe. Des émissions de dioxines et de furannes de 2,2, 70,3 et 2,7 pg ET/m³N ont été observés à une teneur en O₂ de 11 %. Les émissions correspondantes de HAP (émissions totales des 25 HAP analysés) au cours de ces trois essais étaient de 15,7, 24,1 et 5,0 ug/m³N à 11 % de O₂. Les importantes émissions de dioxines notées au cours du deuxième essai ont été attribuées à la faible température du lit fluidisé ainsi qu'à l'arrêt automatique de la chambre de combustion une heure avant le début de l'essai ainsi qu'une demi-heure avant la fin des tests des gaz à la cheminée.

2.3 Chaudières de récupération alimentées avec de la liqueur noire

McCubbin (1997) a effectué, pour l'EPA, un examen très détaillé des publications et des données disponibles sur les émissions de dioxines et de furannes des chaudières de récupération de produits chimiques des usines de pâte kraft. On y trouve des données compilées par le NCASI et Paprican ainsi que de nombreuses références faisant état d'analyses de dioxines dans les gaz de cheminée de chaudières de récupération fonctionnant à pleine échelle ou dans des échantillons de cendres provenant de précipitateurs électrostatiques. Les données compilées par le NCASI et portant sur 13 chaudières de récupération indiquaient des émissions moyennes de dioxines et de furannes de 23 pg ET/m³N, même lorsqu'une valeur d'un essai très élevée (432 pg ET/m³N) était comprise dans l'ensemble de données. Le NCASI proposait de ne pas tenir compte des résultats de ce test qui avaient été rejetés par les vérifications de contrôle de la qualité faites en laboratoire d'analyse. Le NCASI proposait aussi d'exclure les résultats de tous les essais réalisés à une usine (usine A de l'annexe D), car ils étaient aberrants du point de vue statistique (voir la note de la page D-1 de l'annexe D). Aux 12 autres usines, les émissions de dioxines et de furannes variaient de zéro à 27,2 pg ET/m³N. De même, des essais portant sur deux chaudières de récupération de la côte de la C.-B. alimentées avec de la liqueur noire à très forte teneur en chlorure (pouvant atteindre 5,4 % du poids sec des matières solides de la liqueur) ont permis de noter des émissions de dioxines et de furannes se situant entre 0,38 et 5,2 pg ET/m³N à 11 % de O₂ (Luthe et coll., 1997a).

Bostrom (1990) a fait état d'essais de dioxines portant sur la chaudière de récupération numéro 8 de l'usine de papier MoDo à Husum, en Suède. Le concentré de l'installation d'ultrafiltration de l'usine de blanchiment, qui traitait les effluents de la première étape d'extraction alcaline, était incinéré avec la liqueur noire de l'usine. Deux essais des gaz à la cheminée ont permis de noter des émissions de dioxines maximales de 9 à 15 pg ET/m³N (Bodein, 1997) qui sont des concentrations inférieures à celles obtenues pour la même chaudière en 1985 lorsqu'aucun résidu de blanchiment n'était incinéré. McCubbin (1997), se fondant sur toutes les données disponibles au moment de l'étude, a conclu que la modification de la concentration en chlorure de la liqueur noire pouvant résulter de variations prévisibles des opérations de l'usine connexes à la mise hors service d'installations, ne donnerait pas lieu à une augmentation des émissions de PCDD/F des

chaudières de récupération. Il a aussi conclu à l'absence de faits indiquant un écart systématique des émissions de PCDD/F entre les chaudières de récupération plus anciennes à évaporateur par contact direct et les chaudières plus récentes sans contact direct, ou chaudières à « faibles odeurs ».

2.4 Fours à chaux alimentés au gaz naturel et/ou au mazout lourd

Les publications ne font pas état de données sur les émissions de dioxines et de furannes des fours à chaux des usines de pâtes et papiers. Les données obtenues des fours à ciment doivent être utilisées avec prudence, car bon nombre de ces fours sont aussi alimentés avec des déchets organiques industriels et font concurrence aux incinérateurs pour l'élimination des déchets dangereux. Un grand nombre de déchets brûlés dans les fours à ciment peuvent contenir des chlorures ou des métaux, comme le cuivre, qui catalysent la formation de dioxines. La boue de chaux (CaCO_3) qui alimente les fours à chaux de l'industrie des pâtes et papiers est au contraire très exempte de tout contaminant organique car même de très petites quantités de ces contaminants dans les condensats utilisés pour le lavage de la boue peuvent en réduire la vitesse de décantation et la teneur en matières solides de la boue qui alimente le four. Une faible teneur en matières solides donne lieu à une forte consommation d'énergie par le four et la plupart des usines procèdent donc à un contrôle rigoureux de la qualité du condensat et de la teneur en matières solides de la boue. Certaines usines se sont intéressées à la possibilité d'utiliser du charbon ou du combustible tiré des pneus pour leurs fours à chaux, mais toutes les usines de pâtes et papiers canadiennes n'utilisent actuellement comme combustibles pour leurs fours à chaux que du gaz naturel, du mazout lourd ou du tallöl. Des données obtenues d'essais portant sur quatre fours à chaux d'usines américaines seront examinées dans la partie suivante du présent rapport.

2.5 Réservoir de dissolution de salin

Les publications ne font pas état de données sur les émissions de dioxines et de furannes des réservoir de dissolutions de salin. Comme les émissions de dioxines des chaudières de récupération sont généralement assez faibles, 0,5 – 10 pg ET/m³N (Luthe, 1995; McCubbin, 1997) et que le salin de ces chaudières est très rapidement refroidi de 700 – 800 °C à moins de 100 °C dans le réservoir de dissolution de salin, la formation de dioxines par nouvelle synthèse devrait être négligeable. Certaines données sur les concentrations de dioxines et de furannes des dépôts de liqueur verte (matières en suspension retirées de la liqueur à sa sortie du réservoir de dissolution) seront examinées dans la prochaine partie du présent rapport et serviront à estimer des facteurs d'émission potentiels pour cette opération.

2.6 Chaudières de récupération du bisulfite

Les publications ne font pas état de données sur les émissions de dioxines et de furannes des chaudières de récupération du bisulfite. Les concentrations de dioxyde de soufre étant extrêmement élevées dans ces chaudières et le dioxyde de soufre étant connu pour réduire la formation de dioxines dans les chaudières de production d'énergie alimentées

par des déchets de bois chargés de sel (Luthe, 1998b), dans les chaudières de récupération des produits chimiques du procédé kraft consommant de la liqueur noire contaminée par du chlorure de sodium en fortes concentrations (Luthe, 1995; McCubbin, 1997) et dans les incinérateurs de déchets municipaux (Griffin, 1994; Lindbauer, 1992 et Frankenhaeuser, 1994), les émissions de dioxines et de furannes des chaudières de récupération du bisulfite sont sans doute très faibles. Certaines données d'essais portant sur deux chaudières de récupération du bisulfite réalisés aux États-Unis et compilées par le NCASI feront l'objet d'un examen dans la partie suivante du présent rapport.

3. Examen des résultats des essais à la cheminée et élaboration de facteurs d'émission

Tant les États-Unis que le Canada appliquent des programmes de réglementation exigeant des installations industrielles qu'elles déclarent chaque année leurs rejets de certaines substances dans l'environnement. Le programme américain porte le nom de Toxic Release Inventory (TRI) et le programme canadien celui d'Inventaire national des rejets de polluants (INRP). Les deux programmes présentent beaucoup de similitudes, notamment à cause des dispositions de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA), mais on y dénote certains écarts importants. En ce qui a trait aux émissions de dioxines et de furannes, l'INRP prévoit que les rejets doivent être déclarés en équivalents toxiques conformément aux facteurs internationaux d'équivalence toxique (ET-I), dont la gamme s'échelonne de 0,001 à 1 pour les 17 congénères dont la mesure est exigée par les directives de l'INRP et du TRI (voir le tableau 3.1). Environnement Canada a précisé un niveau de dosage (NdD) de 32 pg ET/m³N pour les flux gazeux. Lorsque les valeurs mesurées sont inférieures à ce niveau, l'installation peut déclarer la valeur mesurée ou indiquer que les rejets sont inférieurs au NdD. En outre, si l'installation ne dispose d'aucune information, elle peut en faire état dans sa déclaration et ne pas présenter d'estimation de rejet ou de transfert.

Le seuil de déclaration du programme TRI est de 0,1 g/an et est fondé sur la totalité des 17 congénères analysés, et non sur les ET. Comme les rejets à déclarer à l'INRP le sont en unités ET-I et que ceux à déclarer au TRI correspondent au total des 17 congénères, les émissions déclarées pour les usines canadiennes seront beaucoup plus faibles. Se fondant sur les données des émissions de 11 chaudières de récupération de liqueur kraft, le National Council for Air and Stream Improvement (NCASI) des États-Unis a estimé (Pinkerton, 2001) que les émissions exprimées en ET-I correspondaient à moins de 3 % de celles du total des 17 congénères. Comme la plus grande partie des données disponibles sur les émissions de dioxines et de furannes des installations de pâtes et papiers ont été compilées par le NCASI, nous avons annexé ces données brutes au présent rapport afin de permettre de vérifier les émissions pour tous les congénères ou de convertir les émissions en utilisant les lignes directrices pour les équivalences de toxicité, notamment celles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Les données répertoriées dans les annexes du présent rapport ont été recueillies par des entrepreneurs indépendants, de compétence reconnue pour les essais à la cheminée, affectés à chaque installation. Les essais à la cheminée étaient réalisés conformément à la méthode 23 de l'EPA ou à la « Méthode de référence en vue d'essais aux sources :

dosage des composés organiques semi-volatils dans les émissions de sources fixes (EPS 1/RM/2, juin 1989) d'Environnement Canada. Chaque série de prélèvements durait normalement de trois à quatre heures. L'assurance et le contrôle de la qualité (AQ/CQ) des données PCDD/F étaient fondés sur trois séries d'analyses : 1) la récupération à partir de témoins sans ajout avant l'échantillonnage; 2) l'analyse d'échantillons témoins de laboratoire pour les 17 isomères de PCDD/F répertoriés dans la Méthode 23 de l'EPA et 3) l'analyse pour la présence de PCDD/F dans les échantillons prélevés sur le terrain et les échantillons témoins amenés sur place. À l'exception de ceux de l'usine RFA de l'annexe D (voir la page D-1), tous les échantillons et essais se sont avérés conformes aux critères de AQ/CQ pour les pré-essais. Dans tous les cas, la concentration des congénères non décelés a été fixée à zéro, tel que cela est recommandé par l'EPA pour les sources de très faibles émissions. Les moyennes de chaque série d'essais d'une chaudière ou d'un four donné ont été utilisées pour déterminer les moyennes et les médianes d'une unité d'exploitation donnée. Si plus d'une chaudière faisait l'objet d'essais à une usine donnée, les résultats obtenus pour chaque chaudière étaient utilisés pour la détermination de la moyenne et de la médiane des émissions. On n'accordait cependant pas une plus grande valeur de pondération aux moyennes d'une chaudière ayant fait l'objet de huit essais à la cheminée qu'à celles d'une chaudière n'ayant fait l'objet que de un ou deux essais.

3.1 Chaudières de production d'énergie alimentées avec des déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées)

Les émissions de dioxines et de furannes des chaudières de production d'énergie alimentées avec des déchets de bois propres pouvant varier de façon extrêmement importante de par la co-utilisation de résidus de produits du bois, de contreplaqué ou, même, de déchets agricoles (voir le tableau 2.1.1), seules les données d'émissions pour les déchets de bois de ces chaudières aux usines de pâtes et papiers seront utilisées pour l'estimation d'un facteur d'émission approprié. On trouve dans l'annexe A des données sur les émissions de dioxines et de furannes, compilées par le NCASI, pour quatre chaudières d'installations autres que les usines de pâtes et papiers mentionnées dans les études du CARB (1990a – d) et pour 21 essais portant sur 10 chaudières de l'industrie des pâtes et papiers réalisés aux États-Unis. Comme le NCASI ne disposait pas de données sur le taux de combustion des chaudières, mais possédait des données exactes sur le débit des gaz de cheminée, le taux de combustion de déchets de bois a été estimé en supposant un pouvoir calorifique du bois et un débit des gaz de combustion par million de BTU d'apport calorifique, corrigé à 12 % de CO₂. Les 10 chaudières étaient munies de multicyclones pour la réduction des émissions de particules. Trois des chaudières étaient aussi équipées de précipitateurs électrostatiques (PES), quatre d'épurateurs par voie humide et une d'un épurateur par voie humide suivi d'un PES par voie humide. Deux ne possédaient que des multicyclones pour l'élimination des particules. Bien que les quatre chaudières à épurateur par voie humide présentaient généralement des émissions de dioxines et de furannes plus faibles, les chercheurs du NCASI n'ont pu conclure, avec certitude, étant donné la large gamme d'émissions obtenue pour une même chaudière et entre les chaudières, que ce dispositif final de réduction des particules avait un effet sur les émissions totales de PCDD/F.

Tableau 3.1 : Congénères des dioxines et furannes répertoriés dans le groupe des dioxines/furannes de l'INRP

Composés	FET
2,3,7,8-tétrachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine	1,0
1,2,3,7,8-pentachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine	0,5
1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine	0,1
1,2,3,6,7,8-hexachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine	0,1
1,2,3,7,8,9-hexachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine	0,1
1,2,3,4,6,7,8-heptachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine	0,01
Octachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine	0,001
2,3,7,8-tétrachlorodibenzofuranne	0,1
1,2,3,7,8-pentachlorodibenzofuranne	0,05
2,3,4,7,8-pentachlorodibenzofuranne	0,5
1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzofuranne	0,1
1,2,3,6,7,8-hexachlorodibenzofuranne	0,1
1,2,3,7,8,9-hexachlorodibenzofuranne	0,1
2,3,4,6,7,8-hexachlorodibenzofuranne	0,1
1,2,3,4,6,7,8-heptachlorodibenzofuranne	0,01
1,2,3,4,7,8,9-heptachlorodibenzofuranne	0,01
Octachlorodibenzofuranne	0,001

On trouve dans l'annexe B des données sur les émissions de dioxines et de furannes compilées par Paprican pour 16 essais portant sur cinq chaudières supplémentaires de l'industrie canadienne des pâtes et papiers. Les usines représentées par cet ensemble de données ont permis à Paprican d'établir des estimations des taux de combustion des déchets de bois fondées sur la quantité de vapeur produite à partir de ces déchets au cours de chaque essai à la cheminée ou des taux de combustion moyens pour chaque chaudière. Étant donné que la plupart des essais ont été réalisés dans le cadre d'essais de vérification de la conformité et que les chaudières doivent être exploitées à 85 % ou plus de leur charge normale pendant ces essais, les taux de combustion moyens des déchets de bois devraient donc constituer une bonne approximation des taux de combustion pendant les essais à la cheminée. Les données compilées par Paprican sont normalisées à une teneur de O₂ de 8 %, soit la teneur des sources de combustion normalisée exigée par de nombreux permis provinciaux. Nous avons supposé que les émissions déterminées à 12 % de CO₂ pour la base de données du NCASI étaient comparables à celles obtenues à 8 % de O₂ pour la base de données de Paprican. Dans le cas des deux ensembles de données, les concentrations de congénères non décelés ont

été fixées à zéro, tel que cela est recommandé par l'EPA. Les deux ensembles de données sont présentés sous forme résumée dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Données sur les émissions de dioxines et de furannes des chaudières de l'industrie des pâtes et papiers alimentées avec des déchets de bois

	Ensemble de données du NCASI	Ensemble de données de Paprican	Ensembles de données réunis
Nombre de chaudières évaluées	10	5	15
Total des essais à la cheminée	21	16	37
Émissions à la cheminée, pg ET/m ³ N*			
Gamme	0,4 – 339,2	0,8 – 86,5	0,4 – 339,2
Moyenne	81,5	20,2	58,5
Médiane	3,7	5,7	4,7
Facteur d'émission estimé, ng ET/t anhydre de déchets			
Gamme	3,3– 2 799	10,2 – 247,3	3,3 – 2 799
Moyenne	672	84,2	451,6
Médiane	30,4	46,6	38,5

* à 12 % de CO₂ pour les données du NCASI et à 8 % de O₂ pour les données de Paprican

Seulement quatre des 10 chaudières de l'ensemble de données du NCASI (voir page A-17) et seulement une des cinq chaudières de l'ensemble de données de Paprican (voir la page B-7) présentaient des émissions de dioxines et de furannes supérieures au NdD d'Environnement Canada de 32 pg ET/m³N. En outre, le deuxième essai réalisé sur la chaudière G (WFBG) alimentée au bois de l'ensemble de données du NCASI a permis d'obtenir des valeurs d'émissions de dioxines et de furannes inférieures d'un facteur de 10 à celles observées au cours du premier essai, ce qui porte à croire que les conditions de combustion étaient très mauvaises pendant le premier essai ou que du bois traité ou des résidus de bois transformé (contreplaqué, aggloméré, panneaux de fibres, etc.) ont pu être brûlés pendant le premier essai. Seulement deux des 16 essais à la cheminée portant sur les cinq chaudières des usines canadiennes et représentées dans l'ensemble de données de Paprican présentaient des émissions de dioxines légèrement supérieures à la moyenne (81,5 pg ET/m³N) obtenue pour les chaudières de production d'énergie représentées dans l'ensemble des données du NCASI. Cela porte fortement à croire que du bois traité ou des déchets de produits du bois ont pu être brûlés dans plusieurs des chaudières alimentées aux déchets de bois ayant servi à l'obtention de l'ensemble des données du NCASI.

Il est à noter qu'un seul résultat d'essai élevé ou faible peut biaiser de façon appréciable la moyenne d'un petit ensemble de données, comme cela est démontré par les importants écarts entre la moyenne et la médiane des deux ensembles de données. Si l'on ne tient pas compte des résultats obtenus pour la chaudière G des données du NCASI, on obtient une baisse de 35 % de la moyenne des émissions à la cheminée, qui passe de 81,5 à 52,9 pg ET/m³N et le facteur d'émission moyen des données du NCASI chute de 672 à 435,7 ng/t anhydre de déchets de bois. De même, si le résultat le plus élevé (essai 2 à l'usine D) est exclu des données de Paprican, le facteur d'émission moyen pour les cinq chaudières des données de Paprican chute alors de 13 %, passant de 84,2 à 73,3 ng ET/t anhydre de combustible. Comme la médiane des émissions à la cheminée et celle des facteurs d'émission se rapprochent beaucoup plus que les moyennes des deux ensembles de

données, l'utilisation d'un facteur d'émission approchant le facteur d'émission moyen de 38,5 ng/t anhydre de déchets de bois consommés est recommandée pour l'estimation des émissions de dioxines et de furannes de cette source.

3.2 : Chaudières de production d'énergie alimentées avec un mélange de déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées) et de boues de désencrage

On trouvera dans l'annexe C les données sur les émissions de dioxines et de furannes compilées par Paprican, pour 21 essais portant sur l'ensemble des cinq chaudières de l'industrie canadienne des pâtes et papiers dans lesquelles on incinère des boues de désencrage. Les codes appliqués à ces chaudières dans les annexes B et C étant les mêmes, il est possible de comparer les émissions des chaudières lorsqu'elles sont alimentées avec ou sans boues de désencrage. Les usines visées par cet ensemble de données ont aussi fourni à Paprican des estimations des taux de combustion de déchets de bois fondées sur la quantité de vapeur produite à partir de ces déchets au cours de chacun des essais à la cheminée, ou des moyennes des taux de combustion pour chacune des chaudières. Comme la plupart des essais ont été réalisés dans le cadre d'essais de conformité à des permis et que les chaudières se doivent d'être exploitées à au moins 85 % de leur charge normale pendant ces essais, les taux de combustion moyens des déchets de bois devraient constituer une approximation assez fiable des taux pendant les essais à la cheminée.

Les résultats obtenus pour l'usine O (voir la page C-10) ont été exclus du tableau résumé et de l'ensemble de données, car nous n'étions pas en mesure de trouver une façon acceptable d'attribuer à la chaudière les émissions de dioxines mesurées à la cheminée. L'usine comporte quatre chaudières de production d'énergie dont les gaz sont évacués par une même cheminée. L'une d'elles (capacité maximale de production de vapeur de 30 000 lbs/h) est alimentée par des déchets de bois. Deux autres (capacité de production de 60 000 lbs/h de vapeur chacune) ne sont alimentées qu'au charbon. La quatrième et la plus importante (capacité maximale de production de vapeur de 165 000 lbs/h) est alimentée par du charbon et des boues provenant des procédés de désencrage et de traitement des eaux usées de l'usine. Les responsables de l'usine ont réalisé un essai à la cheminée en l'absence de combustion de boues de désencrage (5,6 pg ET/m³N) et deux essais lorsque des boues de désencrage étaient incinérées (émissions moyennes de 22,3 pg ET/m³N). Pendant les trois essais à la cheminée, l'usine brûlait, chaque jour, de 3,9 à 10 tonnes métriques anhydres d'écorces, de 31,1 à 33,3 tonnes métriques anhydres de boues d'épuration d'eaux usées, de 1,8 à 28,5 tonnes métriques anhydres de boues de désencrage et de 44,4 à 120,4 tonnes métriques de charbon séché à l'air. L'augmentation par un facteur supérieur à 3 des émissions de dioxines pendant l'incinération des boues de désencrage est cohérente avec les données obtenues pour les autres usines (voir les résultats des essais des usines C et E aux pages B-7 et C-9). Comme la quantité de déchets de bois alimentant les quatre chaudières à l'usine O était relativement faible et comme nous ne pouvions répartir raisonnablement les quantités de dioxines produites par la combustion des déchets de bois, des boues et du charbon, nous avons décidé de ne pas utiliser les données de cette usine pour le calcul des moyennes.

Les émissions de dioxines à la cheminée augmentaient de façon appréciable dans les chaudières de production d'énergie brûlant des boues de désencrage (voir les résultats des essais des usines C et E dans le tableau 3.3 et ceux de l'usine O à la page C-10). Cela est compatible avec les rapports signalant que bien que la déshydratation mécanique permette de réduire la teneur en eau des boues de désencrage à 40 – 60 %, la forte teneur en matières inertes de ces matériaux les rend difficiles à brûler dans les foyers mécaniques à grille conventionnels (Douglas, 1997). On a aussi trouvé que les boues de désencrage contenaient divers métaux et composés chlorés (Douglas, 1997) qui pouvaient catalyser la formation de dioxines et de furannes pendant la combustion. Les 20 essais à la cheminée réalisés pendant le co-brûlage des boues de désencrage ont permis de noter des émissions moyennes de dioxines aux quatre usines allant de 15,9 à 182 pg ET/m³N, à 8 % de O₂. Les émissions moyennes et médianes à la cheminée des quatre chaudières étaient de 87,9 et de 76,9 pg ET/m³N à 8 % de O₂. Au moment du co-brûlage des boues de désencrage, les facteurs d'émission moyens des quatre chaudières variaient de 118 à 1 576 ng ET/tonne anhydre de déchets de bois. Les émissions moyennes et médianes des quatre chaudières évaluées étaient, respectivement, de 791 et de 735 ng ET/tonne anhydre de déchets de bois. L'utilisation du facteur d'émission médian de 735 ng ET/tonne anhydre de déchets de bois est recommandée pour l'estimation des émissions de dioxines et de furannes de cette source.

3.3 Chaudières de récupération alimentées avec de la liqueur noire

On trouve dans l'annexe D les données sur les émissions de dioxines et de furannes, compilées par le NCASI, pour 36 essais à la cheminée portant sur 11 chaudières de récupération de produits chimiques situées dans 11 usines de pâte kraft aux États-Unis. Le NCASI ne disposant pas de données sur les taux de combustion des chaudières, mais disposant de données exactes sur le débit des gaz de cheminée, il a estimé le taux de combustion de la liqueur noire en supposant une valeur calorifique pour la liqueur et un débit de gaz de combustion par million de BTU de chaleur fournie (voir la page D-10). On trouve dans l'annexe E les données sur les émissions de dioxines et de furannes, compilées par Paprican, pour neuf essais portant sur deux chaudières de récupération de produits chimiques situées dans deux usines de pâtes kraft de la côte de la Colombie-Britannique. Les responsables de ces usines ont fourni à Paprican des estimations des taux de combustion de la liqueur fondées sur les données de débit de la liqueur et de sa teneur en matières solides qu'ils enregistrent normalement. Les deux ensembles de données sont résumés dans le tableau 3.3.

Les émissions moyennes de dioxines n'ont jamais dépassé le NdD d'Environnement Canada à aucune des 13 chaudières de récupération évaluées et dont les résultats sont compris dans les deux ensembles de données (voir la page D-1). Selon les données résumées dans le tableau 3.3, le facteur d'émission médian de 0,015 ng/kg anhydre de matières solides de la liqueur noire (0,0068 ng ET/lb), calculé pour les ensembles de données combinés, est recommandé pour l'estimation des émissions de dioxines et de furannes de cette source. Le facteur d'émission proposé correspond à la moitié environ du facteur d'émission de 0,028 ng ET/kg anhydre de matières solides de la liqueur noire recommandé par l'EPA (1998). Le facteur d'émission moyen pour les deux ensembles de données est même de 30 % environ inférieur à celui recommandé par l'EPA (1998).

Tableau 3.3 : Essais des émissions à la cheminée de dioxines et de furannes de chaudières de production d'énergie, avec ou sans la combustion de boues de désencrage

Usines	Types de chaudière	Mélanges de combustibles	Dispositifs anti-particules	Nombre d'essais	Gammes des émissions de particules à la cheminée (moyenne) mg/m ³ R @ 11% de O ₂	Gammes des émissions de dioxines à la cheminée (moyenne) pg ET/m ³ R @ 8% de O ₂	Facteurs d'émission ng ET/t déchets de bois et de boues (ng ET/t humide) faib./élevé/moy	Facteurs d'émission ng ET/t déchets de bois et de boues (ng ET/t humide) faib./élevé/moy	Taux de combustion t anhydre/h (teneur en eau)
C – normalement pas alimentée en boues de désencrage	Foyer Riley à grille roulante	Déchets de bois et gaz (1996) Déchets de bois, boues primaires et secondaires, boues de désencrage et gaz	PES	5 (2 chaud.) 3 (1 chaud.)	3,1 – 47,9 (moyennes pour chaque chaud.) 1,4 - 21,0	4,9 – 6,5 (5,7) (moyennes pour chaque chaud.) 10,8 – 19,1 (15,9)	40,0 / 53,1 / 46,6 (19,2 / 30,2 / 24,4) 73,8 / 132,2 / 110,0 (34,9 / 72,9 / 61,1)	40,0 / 53,1 / 46,6 (19,2 / 30,2 / 24,4) 73,8 / 132,2 / 110,0 (34,9 / 72,9 / 61,1)	10,4 – 10,8 déchets de bois (43 - 52 %) 10,2 – 10,5 déchets de bois (43 – 52 %) 0,75 désenc. (35 %)
E – n'est plus alimentée en boues de désencrage	Foyer (CR n° 1) Foyer (CR n° 2)	Déchets de bois et boues de désencrage (1997) Déchets de bois et boues d'épuration (1999)	Épurateur de gaz humide à venturi Multicyclone à deux étapes et PES	3 3	44,8 – 89,3 (74,0) 3,2 – 7,1 (4,7)	47,2 – 280,2 (182,1) 2,2 – 9,2 (6,5)	408,5 / 2 425,0 / 1 576,0 (183,8 / 1 091,3 / 709,2) 35,7 / 149,3 / 105,5 (16,1 / 74,7 / 50,2)	389,6 / 2 312,8 / 1 503,1 (177,2 / 1 053,3 / 684,6) 30,7 / 128,3 / 90,7 (13,1 / 60,5 / 40,7)	18,6 déchets de bois (55 %), 0,9 désenc. (41 %) 31,25 écorces (50 %) 3,8 boues primaires (65 %) 1,3 boues secondaires (65 %)
F	Chaudière à grille vibrante	Écorces et déchets de bois, boues primaires et secondaires et boues de désencrage	PES	5	27 – 41 (32)	23,4 – 266,4 (108,2)	204,2 / 2 325 / 944,4 (102,1 / 1 162,6 / 472,2)	139,8 / 1 589,2 / 646,5 (63,4 / 724,2 / 293,2)	13,5 écorces (50 %) 3,75 désenc. (58,1 %) 2,5 boues prim. et sec. (66,1 %)

G	3 foyers KMW dans trois chaudières Renteck (1999)	Déchets de bois, boues primaires et secondaires et boues de désencrage	Cyclones sur chaque chaudière reliés à un même PES	3	(7,6)	2,3 – 111,4 (40,4)	26,5 / 1 281,1 / 464,7 (13,0 / 630,4 / 228,7)	21,0 / 1 015,1 / 368,2 (9,8 / 474,3 / 172,0)	12,4 déchets de bois (50,8 %) 3,25 boues (60,2 %) 29 % boues désenc.
	3 piles à combustible (1997) – ne consomme plus que du gaz	Déchets de bois, boues primaires et secondaires, boues de désencrage et gaz	Multicyclo- nes	6	717 – 942	7,2 – 142,8 (50,8)	82,9 / 1 643,6 / 584,7 (39,7 / 639,6 / 227,5)	65,8 / 1 345,0 / 471,4 (28,1 / 495,0 / 90,5)	5,2 – 8,3 déchets de bois (51,9 – 61,1 %) 1,4 – 1,9 boues (70,4%) – 33 % désenc.

- Facteur d'émission moyen pour les usines incinérant des boues de désencrage (20 essais à la cheminée de 5 chaudières) = 790,7 ng ET/tonne anhydre de déchets de bois consommée.
- Facteur d'émission médian pour les usines incinérant des boues de désencrage (20 essais à la cheminée de 5 chaudières) = 734,5 ng ET/tonne anhydre de déchets de bois consommée.

Tableau 3.4 : Données* sur les émissions de dioxines et de furannes de chaudières de récupération de la liqueur kraft

	Ensemble de données du NCASI	Ensemble de données de Paprican	Ensembles de données réunis
Nombre de chaudières évaluées	11	2	13
Nombre total d'essais à la cheminée	36	9	45
Émissions à la cheminée, pg ET/m ³ N*			
Gamme	0,016 – 10	4 - 6	0,016 – 10
Moyenne	3,3	5,0	3,6
Médiane	2,3	5,0	2,6
Facteur d'émission estimé, Ng/kg de SLN			
Gamme	8,7 X 10 ⁻⁵ – 0,055	0,022 – 0,033	8,7 X 10 ⁻⁵ – 0,055
Moyenne	0,018	0,028	0,020
Médiane	0,013	0,028	0,015

* à 8 % de O₂ pour les ensembles de données du NCASI et de Paprican

3.4 Fours à chaux alimentés au gaz naturel et/ou au mazout lourd

On trouve dans l'annexe F les données sur les émissions de dioxines et de furannes, compilées par le NCASI, pour 6 essais à la cheminée portant sur 4 fours à chaux de 4 usines de pâte kraft aux États-Unis. Comme le NCASI ne disposait pas de données sur le taux de production des fours, mais qu'il disposait de données exactes sur le débit des gaz de cheminée, il a estimé le taux de production des fours en supposant un apport calorifique nécessaire de 6 millions de BTU pour la calcination d'une tonne de chaux et les débits des gaz de cheminée correspondants par million de BTU d'apport calorifique en gaz et en mazout. Les essais ont porté sur trois fours alimentés au mazout et un alimenté au gaz. Les émissions de dioxines et de furannes du four alimenté au gaz étaient de 50 % environ supérieures à celles des fours alimentés au mazout (voir la page F-4), mais une série d'essais s'avère insuffisante pour établir un facteur d'émission distinct pour les fours alimentés au gaz. Tel que prévu, tous les essais ont permis de noter des émissions de dioxines et de furannes très faibles. Les émissions à la cheminée variaient de nulle à 3,3 pg ET/m³N à 12 % de CO₂, cela dans les quatre installations et ces valeurs n'ont jamais été supérieures au NdD d'Environnement Canada. Les facteurs d'émission estimés variaient de zéro à 17,5 ng ET/tonne de chaux (CaO) produite (voir la page F-5), ce qui est de beaucoup inférieur au facteur d'émission de 290 ng/tonne de produits recommandé par l'EPA pour les fours à ciment n'incinérant pas de déchets dangereux (EPA/600/P-98/002Aa, avril 1998). Les facteurs d'émission moyens et médians ont été estimés à, respectivement, 8,9 et 9,1 ng ET/tonne de chaux produite. Un facteur d'émission de 9 ng ET/tonne de chaux produite est donc recommandé pour l'estimation des émissions de cette source.

3.3 : Réservoir de dissolutions de salin

Les publications ne font pas état de données sur les émissions de dioxines et de furannes des réservoir de dissolutions de salin. Les émissions de dioxines des chaudières de récupération sont généralement assez faibles, de 0,016 à 10 pg ET/m³N (voir le tableau

3.3 ci-dessus). Le salin des chaudières de récupération est rapidement refroidi, de 700 – 800 °C à moins de 100 °C dans un réservoir de dissolution, ce qui élimine la possibilité de formation de dioxines et de furannes par nouvelle synthèse dans la plage des 200 à 500 °C et les émissions de dioxines des réservoir de dissolutions devraient même être inférieures à celles des chaudières de récupération. Les concentrations de dioxines et de furannes de deux échantillons de liqueur verte brute (non clarifiée) et d'un échantillon de dépôt de liqueur verte (matières solides en suspension retirées de la liqueur verte à la sortie du réservoir de dissolution) sont présentées dans l'annexe G et servent à l'estimation de facteurs d'émission potentiels pour cette unité de production. Les émissions estimées à la cheminée de ventilation, à partir de cet ensemble de données très limité, variaient de 0,0072 à 1,08 pg ET/m³N, ce qui est de beaucoup inférieur au NdD d'Environnement Canada de 32 pg ET/m³N. Les facteurs d'émission estimés variaient de 3,6 à 540,6 pg ET/t de solides de liqueur noire anhydres (SLNA) incinérés. Le facteur d'émission estimé maximum de 550 pg ET/t SLNA, ou de 0,00055 ng/kg de SLNA est donc inférieur d'un facteur de 36 au facteur estimé pour les chaudières de récupération de liqueur kraft présenté dans la partie 3.3 ci-dessus.

3.5 : Chaudières de récupération du bisulfite

On trouve dans l'annexe H les données sur les émissions de dioxines et de furannes compilées par le NCASI pour cinq essais à la cheminée portant sur deux chaudières de récupération du bisulfite aux États-Unis. Le NCASI disposait, pour ces deux chaudières, de données sur le taux d'incinération de la liqueur et pouvait donc estimer des facteurs d'émission directement à partir du débit des gaz de cheminée et des concentrations en PCDD/F. Comme les concentrations de dioxyde de soufre sont extrêmement élevées dans les chaudières de récupération du bisulfite et qu'il a été montré que le dioxyde de soufre réduisait la formation de dioxines dans les chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois chargés de sel (Luthe, 1998b), dans les chaudières de récupération de la liqueur kraft incinérant de la liqueur noire contaminée par de fortes concentrations de chlorure de sodium (Luthe, 1995; McCubbin, 1997) et dans les incinérateurs de déchets municipaux (Griffin, 1994; Lindbauer, 1992 et Frankenhaeuser, 1994), les émissions de dioxines et de furannes des chaudières de récupération du bisulfite devraient être très faibles.

Tel que prévu, les émissions de dioxines et de furannes se sont avérées très faibles au cours de tous les essais. Les émissions à la cheminée variaient de 0,18 à 0,41 pg ET/m³N, à 8 % de O₂, et leur moyenne était de 0,21 pg ET/m³N, à 8 % de O₂, dans les deux installations évaluées. Les facteurs d'émission estimés variaient de 0,00043 à 0,00053 ng ET/kg de matières solides de liqueur rouge incinérée. Le facteur d'émission moyen a été estimé à 0,00049 ng ET/kg de solides de liqueur rouge et un facteur d'émission de 0,0005 ng ET/kg de solides de liqueur rouge incinérés est donc recommandé pour l'estimation des émissions de dioxines et de furannes de cette source.

4. Analyse des cendres des chaudières de production d'énergie et élaboration des facteurs d'émission

Étant donné que les émissions de dioxines et de furannes des chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois propres peuvent varier de façon extrêmement importante en raison des résidus de produits du bois, du contreplaqué ou même des déchets agricoles qui sont brûlés en même temps (voir le tableau 2.1), seules les données sur les émissions pour les déchets de bois des chaudières de production d'énergie des installations de pâtes et papiers devraient être utilisées pour l'estimation d'un facteur d'émission approprié à ces chaudières. On trouve dans l'annexe I des analyses de dioxines et de furannes, répertoriées par le NCASI, pour 63 échantillons de cendres prélevés dans 27 incinérateurs de déchets de bois. Malheureusement, plusieurs de ces incinérateurs étaient situés à des usines de transformation du bois, comme des usines de contreplaqué, et peuvent avoir été alimentés par des résidus de bois en plus de l'être par du bois propre (voir la partie 3.1 ci-dessus).

On trouve dans la première colonne sous chaque échantillon (<ppt) la limite de détection pour tous les congénères et, dans la deuxième colonne, les concentrations des congénères supérieures à la limite de détection, cela pour chaque échantillon de cendres. Les équivalents de toxicité de tous les congénères décelés dans chaque échantillon, déterminés à partir du facteur d'équivalence de la toxicité international (ET-I) et du facteur d'équivalence de la toxicité (ET) de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), sont présentés dans les deux rangées du bas pour chaque échantillon de cendres.

Deux principaux types d'échantillons de cendres ont été prélevés aux diverses installations :

Cendres volantes – ce sont les cendres de bois légères, les sels, le sable fin et les résidus partiellement brûlés qui sont entraînés par l'air de combustion, émis à partir du foyer de la chaudière et capturés par les surfaces de transfert de chaleur ou les dispositifs d'élimination des émissions de particules. Les cendres volantes ont été catégorisées en fonction du type de dispositif utilisé – précipitateur électrostatique (PES), épurateur de gaz humide ou multicyclone (cyclone). Il est arrivé que le dispositif collecteur ne permette pas d'échantillonner les particules retirées par chaque appareil et que l'analyse ait dû porter sur un échantillon mixte de cendres volantes.

Cendres de cendrier ou de grille – ce sont les matériaux grossiers, comme les graviers et les pierres se trouvant dans les déchets de bois ou le combustible déchiqueté, et les cendres résultant de la combustion qui sont recueillies au fond de la chaudière.

L'ensemble de données du NCASI contient des résultats d'analyses de cendres de grille pour 7 chambres de combustion de déchets de bois, de cendres de multicyclones pour 22 incinérateurs de déchets de bois et de cendres volantes de PES et de épurateurs de gaz humide s ou de cendres mixtes pour 16 incinérateurs de déchets de bois. Comme on peut le voir dans le tableau 4.1, les concentrations moyennes et médianes de dioxines des cendres augmentent à mesure que les gaz traversent la chaudière. Les concentrations médianes passent de 0,02 pg ET/g pour les cendres de grille à 0,10 pg ET/g pour les cendres de multicyclones et à 1,47 pg/g pour les cendres de PES, de épurateurs de gaz humide s ou les cendres mixtes. Un schéma semblable a été signalé pour les chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois chargés de sel (Luthe et coll., 1996). Malheureusement, bon nombre des incinérateurs représentés par les données du

NCASI étaient situés dans des usines de transformation du bois, comme des usines de contreplaqué, et on pu être alimentés de résidus de bois en plus de bois propre, ce qui devrait se traduire par une plus importante formation de dioxines et de furannes comparativement à une alimentation exclusive en déchets de bois propres (voir le tableau 2.1 et la partie 3.1 ci-dessus).

On trouve dans l'annexe J les résultats d'analyses de dioxines et de furannes de 23 échantillons de cendres prélevés dans neuf incinérateurs de déchets de bois d'usines de produits forestiers ou de pâtes et papiers du Canada qui ont été répertoriés par Paprican, l'APFC, l'AIFQ et l'AFPA. Aucun déchet de bois transformé n'était brûlé dans ces installations dont l'alimentation se limitait à des déchets de bois bruts propres. L'ensemble de données canadien ne comporte pas de données pour les cendres de grille et les données pour les multicyclones se limitent à celles d'une seule chaudière de production d'énergie. Les concentrations médianes et moyennes de dioxines des cendres volantes sont de beaucoup inférieures aux valeurs correspondantes des données du NCASI, mais la moyenne pour les cendres des multicyclones est de beaucoup supérieure dans les données canadiennes et il faut souligner que les cendres de multicyclones d'une seule chaudière ont été analysées.

Les deux ensembles de données sont résumés dans l'annexe K et le tableau 4.1 ci-dessous. Il est nécessaire, étant donné l'absence de données sur les cendres des multicyclones et des grilles dans l'ensemble de données canadien, d'utiliser les deux ensembles de données pour obtenir des estimations acceptables de facteurs d'émission pour chaque type de cendres. Comme cela a déjà été mentionné, ces estimations sont sans doute très prudentes et sans risque, car plusieurs des incinérateurs utilisés pour l'ensemble des données du NCASI étaient situés dans des usines de traitement du bois, comme des usines de contreplaqué, et il est possible que des résidus de bois y aient été incinérés en plus du bois propre. Il est donc recommandé d'utiliser les concentrations médianes des deux ensembles de données pour l'estimation des concentrations de dioxines et de furannes dans les cendres de chaudières destinées à l'enfouissement.

Tableau 4.1 : Résumé des analyses de dioxines et de furannes des cendres de chaudières de production d'énergie et de combustion de déchets de bois

Sources des données	Types de cendres	Nombre d'échantillons	Nombre d'installations évaluées	Minimum pg ET/g	Maximum pg ET/g	Moyenne pg ET/g	Médiane pg ET/g
NCASI	PES/SH ou mélange MC/PES - épurateur de gaz humide	24	16	0,0	29,4	7,72	1,47
	Multicyclone	29	22	0,0	11,2	1,04	0,10
	Grille (fond)	10	7	0,0	0,17	0,05	0,02
Paprican, APFC, AIFQ et AFPA	PES/SH ou mélange MC/PES - épurateur de gaz humide	19	8	0,0	3,65	0,62	0,20
	Multicyclone	4	1	0,0	3,93	1,84	1,72
Les deux ensembles de données	PES/SH ou mélange MC/PES - épurateur de gaz humide	43	24	0,0	29,4	5,35	0,46
	Multicyclone	33	23	0,0	11,2	1,07	0,10
	Grille (fond)	10	7	0,0	0,17	0,05	0,02

S'il s'avère nécessaire d'estimer les émissions totales de dioxines et de furannes d'une chaudière, on peut alors déterminer, de façon volumétrique ou gravimétrique, la quantité de chaque type de cendres produites au cours de plusieurs journées d'exploitation consécutives. En l'absence de données mesurées, les quantités de chaque type de cendres peuvent être estimées à partir des données recueillies par Paprican pour les chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois chargés de sel. Comme la teneur en cendres et en eau de ces déchets est normalement supérieure à celle des déchets de bois propres stockés à l'intérieur, ces estimations sont aussi très prudentes. Les quantités de cendres normalement produites par les chaudières de production d'énergie en zone côtière alimentées par des déchets de bois chargés de sel sont :

- 15 – 20 kg de cendres de grille/tonne anhydre de déchets de bois brûlés;
- 12 – 16 kg de cendres de multicyclone/tonne anhydre de déchets de bois brûlés;
- 18 – 41 kg de cendres de PES ou de épurateur de gaz humide /tonne anhydre de déchets de bois brûlés.

5. Conclusions

L'examen des publications et des données sur les émissions compilées par le NCASI et Paprican permet de recommander les facteurs d'émission ci-après pour l'estimation des émissions de dioxines et de furannes à la cheminée des procédés de combustion des usines de pâtes:

- pour les chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées) – 40 ng ET/t anhydre de déchets de bois brûlés;
- pour les chaudières de production d'énergie alimentées par mélange de déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées) et des boues de désencrage – 750 ng ET/t anhydre de déchets de bois brûlés;
- pour les chaudières de récupération de produits chimiques kraft alimentées par de la liqueur noire – 15 ng ET/tonne anhydre de matières solides de la liqueur noire;
- pour les fours à chaux chauffés au gaz naturel ou au mazout lourd – 9 ng ET/tonne de chaux produite;
- pour les réservoir de dissolutions de salin des usines de pâte kraft – 0,55 ng ET/tonne anhydre de matières solides de la liqueur noire;
- pour les chaudières de récupération du bisulfite – 0,5 ng ET/tonne de matières solides de la liqueur rouge.

- Les concentrations de dioxines et de furannes des cendres des chaudières de production d'énergie alimentées par des déchets de bois propres (avec ou sans boues d'épuration d'eaux usées), estimées à partir des médianes de 76 échantillons de cendres provenant de 54 installations ont été compilées par le NCASI et Paprican. Ce sont :
- 0,02 pg ET/g de cendres de grille ou de cendrier;
- 0,10 pg ET/g de cendres de multicyclone;
- 0,46 pg ET/g de cendres volantes de PES ou de épurateur de gaz humide ou de cendres mixtes.
- En l'absence de données mesurées, les quantités de chaque type de cendres peuvent être estimées à partir des données compilées par Paprican pour les chaudières de production d'énergie en zone côtière alimentées par des déchets de bois chargés de sel :
- 15 – 20 kg de cendres de grille/tonne anhydre de déchets de bois brûlés;
- 12 – 16 kg de cendres de multicyclone/tonne anhydre de déchets de bois brûlés;
- 18 – 41 kg de cendres de PES ou de épurateur de gaz humide /tonne anhydre de déchets de bois brûlés.

6. Remerciements

Les auteurs remercient toutes les usines qui ont gracieusement communiqué des données sur les essais d'émission et les paramètres d'exploitation de même que les résultats d'analyse des cendres. Nous tenons aussi à remercier Tim Whitford de ET Consulting, Louis Desilets de l'AIFQ et Lucie Veilleux de l'APFC qui nous ont aidés à trouver toutes les usines canadiennes disposant de données d'essai sur les émissions de dioxines et d'analyse des cendres de chaudières. Nous sommes aussi reconnaissants envers Arun Someshwar et John Pinkerton du NCASI qui ont bien voulu nous transmettre des données sur les émissions et les résultats d'analyses de cendres compilés par le NCASI pour les essais d'émission réalisés dans les usines de pâtes et les installations de traitement du bois au États-Unis. Enfin, nous remercions Environnement Canada dont les fonds nous ont permis de compiler et d'examiner toutes les données sur les émissions et de recommander des facteurs d'émission fondés sur des critères scientifiques pour les sources de combustion des usines de pâtes et papiers.

7. Bibliographie

Bodein, D., "Report concerning measurements in flue gas from recovery boiler 8 in Husum". Traduit du suédois et complété par certains calculs. Rapport préparé par IVL (Bostrom, C., 1990) pour la MoDo, propriétaire de l'usine Husum (1997).

Bostrom, C., "Report concerning measurements in flue gas from recovery boiler 8 in Husum." Rapport préparé par IVL, Goteburg, Suède. Original en suédois, (1990) – voir la traduction de Bodein.

Bovar-Concord Environmental, "Evaluation of Stack Emissions and Waste Streams from the Combined Burning of Pulp Mill Waste Residues and Hog Fuel in a Power Boiler", préparé pour la Fletcher Challenge Canada Ltd. et Environnement Canada (mai 1994).

CARB (California Air Resources Board), Evaluation of a woodwaste fired incinerator at Koopers Company, Oroville, California. Test Report No. C-88-065. Engineering Evaluation Branch, Monitoring and Laboratory Division. (29 mai, 1990a).

CARB (California Air Resources Board), Evaluation of a wood waste fired incinerator at Pacific Oroville Power Inc. Test Report No. C-88-050. Engineering Evaluation Branch, Monitoring and Laboratory Division. (29 mai, 1990b).

CARB (California Air Resources Board), Evaluation test on twin fluidized bed wood waste fueled combustors located in Central California. Test Report No. C-87-042. Engineering Evaluation Branch, Monitoring and Laboratory Division. (7 février, 1990c).

CARB (California Air Resources Board), Evaluation of a wood waste fired incinerator at Louisiana Pacific Hardboard Plant, Oroville, CA. Test Report No. C-88-066. Engineering Evaluation Branch, Monitoring and Laboratory Division. (29 mai, 1990d) – tel que relaté dans NCASI, 1995.

Douglas, M., Friedrich, F., Mortzavi, R. et Razbin, V., "Field Trials and Emission Testing of Paper De-Inking Solids (PDS)". Compte rendu de la 83^e réunion annuelle de la section technique de l'Association des produits forestiers de l'Association canadienne des pâtes et papiers, p. B393 – 400. (janvier 1997).

Environnement Canada, "Characterization of Organic Compounds from Selected Residential Wood Stoves and Fuels", Division de la recherche et de la mesure des émissions, Environnement Canada, rapport n° ERMD 2000-01 (décembre 2000).

EPA/600/P-98/002Aa, "The Inventory of Sources of Dioxin in the United States", Examen externe, ébauche (avril 1998).

Frankenhaeuser, M., Hiltunen, M., Manninen, H., Palonen, J., Ruuskanen, J. et Vartiainen, T., "Emissions from Co-combustion of Used Packaging with Peat and Coal", Chemosphere, 29(9 – 11): 2057 – 2066 (1994).

Griffin, R.D., "A New Theory of Dioxin Formation in Municipal Solid Waste Combustion", *Chemosphere*, 15(9 – 12): 1987 - 1990 (1986).

Halonen, I., Tarhanen, J., Kopsa, T. Palonen, J., Vilokki, H. et Ruuskanen, J., "Formation of Polychlorinated Dioxins and Dibenzofurans in Incineration of Refuse Derived Fuel and Biosludge", *Chemosphere*, 26(10): 1869 – 1880 (1993a).

Halonen, I., Tarhanen, J., Oksanen, J., Vilokki, H., Vartiainen, T. et Ruuskanen, J., "Formation of Organic Chlorinated Compounds in Incineration of Pulp and Paper Mill Biosludges", *Chemosphere*, 27(7): 1253 – 1268 (1993b).

Kolenda, J., Gass, H., Jager, J. et Zeschmar-Lahr, B., "Determination of PCDD/F Emissions From Wood Burning Facilities", *Chemosphere* 29(9-11): 1927 – 1938 (1994).

LC Engineering. "Detailed Report for Test Burns of Chlorophenol Contaminated Wood Wastes at Northwood Pulp Mill, Prince George, B.C.", préparé pour Environnement Canada et le ministère de l'Environnement, province de la Colombie-Britannique (avril 1989).

Lindbauer, R., Wurst, F. et Prey, T., "Combustion dioxin suppression in municipal solid waste incineration with sulphur additives", *Chemosphere*, 25 (7 – 10): 1409 - 1414 (1992).

Luthe, C.E., Karidio, I. et Uloth, V.C., "Controlling Dioxin Emissions in Coastal Power Boilers: A Status Report", *Pulp and Paper Canada*, 97(9): T320-T326 (1996).

Luthe, C.E., Karidio, I., Uloth, V.C. et Wearing, J. T., "Are Salt-Laden Recovery Boilers a Significant Source of Dioxins?", *Tappi Journal*, 80(2): 165- 169 (1997a).

Luthe, C.E., Karidio, I. et Uloth, V.C., "Towards Controlling Dioxins Emissions From Power Boilers Fueled with Salt-laden Wood Waste. Part I.", *Chemosphere*, 35(3): 557-574 (1997b).

Luthe, C.E., Karidio, I. et Uloth, V.C., "Dioxins Formation in Salt-laden Power Boilers: a Mass Balance", *Chemosphere*, 36(2): 231-250 (1998a).

Luthe, C.E., Strang, A., Uloth, V.C., Karidio, I., Prescott, B. et Wearing, J., "Sulphur Addition to Control Dioxins Formation in Salt-Laden Power Boilers", *Pulp and Paper Canada*, 99(11): T391-T395 (1998b).

Luthe, C., Uloth, V. et Karidio, I., "Characterizing Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions from Hog Fuel Boilers", *Pulp and Paper Canada*, 99(12): T423-T429 (1998c).

Maatila, H., Virtanen, T., Vartiainen, T. et Ruuskanen, J., "Emissions of Polychlorinated Dibenzop-Dioxins and Dibenzofurans in Flue Gas from Co-Combustion of Mixed Plastics with Coal and Bark", *Chemosphere*, 25(11): 1599 – 1609 (1992).

McCubbin, N., Preliminary Report on the Relationship Between Dioxin Emissions from Kraft Recovery Boilers and the Chloride Content of the Fuel”, préparé pour le U. S. Environmental Protection Agency Office of Science and Technology. (Novembre 1997).

Nakao, T., Aozasa, O., Ohta, S. et Miyata, H., “Formation of Dioxin Analogs by Open-air Incineration of Waste Wood and by Fire of Buildings and Houses Concerning Hanshin Great Earthquake in Japan”, *Chemosphere*, 46:429 – 437 (2002).

NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), “NCASI summary of PCDD/F emission from wood residue and black liquor combustion. Attachment 2 to comments submitted on January 13, 1995, to EPA’s Office of Health and Environmental Assessment concerning the draft document entitled “Estimating Exposure to Dioxin-Like Compounds”. (1995).

Oehme, M. et Mueller, M., “Levels and Congener Patterns of Polychlorinated Dibenzo-P-Dioxins and Dibenzofurans in Solid Residues from Wood-fired Boilers. Influence of Combustion Conditions and Fuel Type”, *Chemosphere*, 30 (8): 1527 – 1539 (1995).

Pandompatam, B., Kumar, Y., Guo, I. et Liem, A. J., “Comparison of PCDD and PCDF Emissions from Hog Fuel Boilers and Hospital Waste Incinerators”, *Chemosphere*, 34(5 – 7): 1065 – 1073 (1997).

Pinkerton, J. “Differences in the Reporting of Persistent Bioaccumulative Toxics Under the TRI and NPRI Programs”, NCASI National Meeting, Charlotte, NC (2001).

Schatowitz, B., Brandt, G., Gafner, F., Schlumpf, E., Buhler, R., Hasler, P. et Nussbaumer, T., “Dioxin Emissions from Wood Combustion”, *Chemosphere*, 29 (9-11): 2005 – 2013 (1994).

Umweltbundesamt, “Determination of requirements to limit emissions of dioxins and furans”. Report from the Working Group of the Subcommittee on Air/Technology of the Federal Government/Federal States Emission Control Committee. Berlin, Allemagne (1996).

Valttila, O., “Combustion of Biosludge” in the Leikki Combustion Research Program Technical Review, 1988 – 1992. Abo Akademi. (1993).

Vesterinen, R. et Flyktman, M., “Organic Emissions from Co-Combustion of RDF with Wood Chips and Milled Peat in a Bubbling Fluid Bed Boiler”, *Chemosphere*, 32(4): 681 – 689 (1996).

Zimmerman, R., Blumenstock, M., Heger, H., Schramm, K. et Kettrup, A., “Emission of Nonchlorinated and Chlorinated Aromatics in the Flue Gas of Incineration Plants During and After Disturbances of Combustion Conditions: Delayed Emission Effects”, *Environmental Science and Technology*, 35: 1019 – 1030 (2001).

Pour obtenir les appendices de A à K, il vous suffit de contacter le bureau régional de l'INRP le plus près de chez vous.