

**Partie III: Catégorie de source (e):
Les installations de brûlage de bois et de
combustibles issus de la biomasse**

Table des matières

| | |
|---|----|
| VI.E Les installations pour le brûlage de bois et de combustibles issus de la biomasse. | 4 |
| 1. Introduction..... | 4 |
| 2. Technologies de combustion de la biomasse..... | 5 |
| 2.1 Sélection de technologies et types de fours..... | 5 |
| 2.2 Fours à grille | 6 |
| 2.3 Combustion à lit fluidisé..... | 7 |
| 2.4 D'autres technologies de combustion de bois | 7 |
| 2.5 Techniques de conversion énergétiques..... | 8 |
| 2.6 La co-combustion de bois (non traité) et de biomasse apparentée au bois..... | 9 |
| 2.7 La gazéification du bois..... | 9 |
| 2.8 La combustion d'autres biomasse | 10 |
| 2.9 Chaudières de récupération dans l'industrie de la pâte et du papier | 10 |
| 2.10 La combustion de la tourbe..... | 11 |
| 3. Mesures de contrôle des émissions | 10 |
| 3.1 Mesures primaires et secondaires applicables | 11 |
| 3.2 Caractéristiques du combustible..... | 12 |
| 4. Produits des procédés..... | 12 |
| 4.1 Formation de PCDD et de PCDF dans les procédés de combustion..... | 12 |
| 4.2 Emissions de PCDD/PCDF..... | 13 |
| 5. Meilleures techniques disponibles et meilleures pratiques environnementales..... | 15 |
| 5.1 Mesures primaires, et optimisation du procédé pour réduire les émissions de PCDD/PCDF | 15 |
| 5.2 Mesures secondaires..... | 16 |
| 6. Niveaux de performance associés aux meilleures techniques disponibles | 16 |
| 7. Suivi des performances et communication des résultats | 16 |
| Références | 16 |

Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Types de combustibles utilisés, issus de la biomasse | 5 |
| Tableau 2. Types de fours à biomasse avec applications et combustibles typiques | 5 |
| Tableau 3. Mesures des contrôles d'émissions de PCDD/PCDF pour installations de brûlage de la biomasse | 11 |
| Tableau 4. Concentrations de PCDD/PCDF pour différents types de combustible bois | 13 |
| Tableau 5. Emissions de PCDD/PCDF venant de différents types de biomasse | 13 |

Tableau 6. Emissions de PCDD/PCDF venant de chaudières de récupération de liqueurs noires

Kraft 14

Figure 1. Schéma général d'un four à grille vibrant 7

Figure 2. Schéma général d'un four utilisant la combustion en lit fluidisé à circulation 8

VI.E Les installations de brûlage de bois et de combustibles issus de la biomasse

Résumé

Le but principal des installations de brûlage de bois et de combustibles issus de la biomasse est la conversion d'énergie. Les grandes installations de brûlage de bois et de combustibles issus de la biomasse utilisent généralement la combustion en lit fluidisé et les fours à grille. Les installations plus petites comprennent des fours alimentés par le bas et des fours à suspension cyclonique. Les chaudières à récupération dans l'industrie de la pâte et papier appliquent des conditions spécifiques pour la combustion. La sélection de la technologie se fait sur la base des caractéristiques du combustible et de la capacité thermique requise.

Les substances inscrites à l'Annexe C de la Convention de Stockholm peuvent être produites pendant la combustion de bois et de combustibles issus de la biomasse, en particulier lorsque ces matières sont contaminées. Pour les unités brûlant de la biomasse, en particulier les installations au bois, les niveaux d'émission associés aux meilleures techniques disponibles sont normalement en dessous de 0,1 ng I-TEQ/Nm³. Parmi les mesures primaires, le contrôle de la qualité du combustible est primordial (y compris l'exclusion de tout bois traité). Les mesures de contrôle pour la biomasse non contaminée comprennent l'optimisation des techniques de combustion et l'élimination des poussières. La combustion de la paille provoque des salissures plus importantes des surfaces et nécessite des techniques de combustion qui ne soient pas sensibles à la scorification des cendres.

On devrait éviter de brûler de la biomasse contaminée, comme des déchets de bois, dans ces installations. Les cendres volantes (en particulier les fractions les plus fines) provenant du brûlage de la biomasse doivent être mises en décharge à cause de leur teneur élevée en métaux. Dans beaucoup de pays (y compris dans l'Union Européenne), on estime que le bois traité avec des composés chlorés ou des métaux lourds est un déchet, et doit être traité en respectant les directives ou réglementations sur l'incinération des déchets.

D'autres avantages bénéfiques résultant de l'application des meilleures techniques disponibles et des meilleures pratiques environnementales comprennent la conservation de ressources et la réduction des émissions de dioxyde de carbone provenant de combustibles fossiles (dans le cas de substitution).

1. Introduction

A présent, environ 12% des besoins énergétiques du monde sont générés par le brûlage de combustibles à base de biomasse, qui vont du bois et des déchets de bois à des produits agricoles et des liqueurs noires des usines de pâte à papier. On utilise une grande gamme de dispositifs pour convertir cette biomasse en énergie utile. Dans les pays en développement, environ 35% de l'énergie utilisée provient de la biomasse, mais la grande majorité est destinée à des applications non commerciales dans des équipements traditionnels comme ceux pour faire la cuisine (voir section VI.C des présentes directives). Dans un pays comme le Népal, plus de 90% de l'énergie primaire est produit à partir de combustibles traditionnels à base de biomasse, surtout le bois venant des forêts.

Dans cette section, on considère les meilleures techniques disponibles pour des applications à grande échelle, comme par exemple, l'industrie, la génération d'électricité, et le chauffage local qui utilisent des combustibles à base de biomasse comme source d'énergie.

Tableau 1. Types de combustibles utilisés, issus de la biomasse

| |
|--|
| Bois : sciure, écorce, copeaux, rabotures |
| Bois et bûches |
| Paille |
| Boulettes d'origine agrumes |
| Cosses de noix de coco |
| Brou de noix (par ex., amandes, arachides) |
| Coques de grains de café |
| Vannures de riz |
| Tourbe |
| Bagasse de canne à sucre |
| Crottes d'animaux |
| Liqueurs noires d'usine à pâte |

Dans les pays industrialisés, la contribution totale de la biomasse aux énergies primaires n'est que de 3%. Ceci concerne surtout l'utilisation de combustibles commerciaux à base de biomasse dans des installations modernes (par exemple, les centrales de co-génération utilisant des copeaux de bois pour la chaleur et l'électricité). Parmi les autres applications on trouve le chauffage domestique, la fourniture de chaleur industrielle, et les grandes centrales brûlant du charbon (IEA Bioenergy 2004).

2. Technologies de combustion de la biomasse

2.1. Sélection de technologies et types de fours

Pour faire une sélection de technologies, la quantité de chaleur à l'entrée et la quantité de bois nécessaire sont primordiales. Pour les grandes installations, la combustion en lit fluidisé et dans des fours à grille est la plus appropriée. Pour des unités plus petites on utilisera des fours à alimentation par le bas et des fours à suspension cyclonique. Le tableau 2 montre les capacités thermiques typiques qui sont nécessaires pour différents types de techniques de brûlage du bois.

Tableau 2. Types de fours à biomasse avec des applications et combustibles typiques

| Application | Type | Gamme de dimension typique ^a | Combustibles | Cendres | Teneur en eau |
|-------------|--|---|--|---------|---------------|
| Manuel | Chaudières à bûches | 5 kW–50 kW | Bûches, résidus collants de bois | < 2% | 5–30% |
| Automatique | Four mécanique à alimentation par le bas | 20 kW–2.5 MW | Copeaux et résidus de bois | < 2% | 5–50% |
| | Four à foyer oscillant | 150 kW–15 MW | Tous les combustibles bois, et presque toute la biomasse | < 50% | 5–60% |
| | Four préliminaire | 20 kW–1.5 MW | Bois sec (résidus) | < 5% | 5–35% |

| Application | Type | Gamme de dimension typique ^a | Combustibles | Cendres | Teneur en eau |
|----------------------------|---|---|--|---------|---------------|
| | avec foyer | | | | |
| | Four mécanique à foyer tournant | 2 MW–5 MW | Copeaux de bois à haute teneur en humidité | < 50% | 40–65% |
| | Brûleur à cigare | 3 MW–5 MW | Balles de paille | < 5% | 20% |
| | Fours à balles entières | 3 MW–5 MW | Balles entières | < 5% | 20% |
| | Four à paille | 100 kW–5 MW | Balles de paille avec coupeur de balles | < 5% | 20% |
| | Lit fluidisé stationnaire | 5 MW–15 MW | Biomasse diverse diam. < 10 mm | < 50% | 5–60% |
| | Lit fluidisé à circulation | 15 MW–100 MW | Biomasse diverse diam. < 10 mm | < 50% | 5–60% |
| | Brûleur de poussière, flux entraîné | 5 MW–10 MW | Biomasse diverse diam. < 5 mm | < 5% | < 20% |
| Co-combustion ^b | Lit fluidisé stationnaire | Total 50 MW–150 MW | Biomasse diverse diam. < 10 mm | < 50% | 5–60% |
| | Lit fluidisé à circulation | Total 100 MW–300 MW | Biomasse diverse diam. < 10 mm | < 50% | 5–60% |
| | Brûleur à cigares | Paille 5 MW–20 MW | Balles de paille | < 5% | 20% |
| | Brûleur de poussière dans une chaudière à charbon | Total 100 MW–1 GW | Biomasse diverse diam. < 2–5 mm | < 5% | < 20% |

a. kW = kilowatt; MW = mégawatt; GW = gigawatt.

b. La biomasse couvre normalement moins de 10% de l'apport total de combustible.

Source: Nussbaumer 2003.

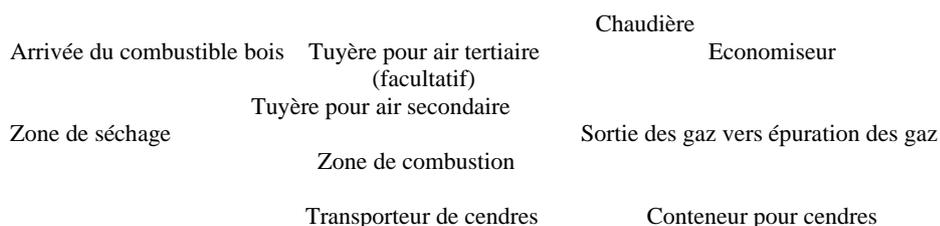
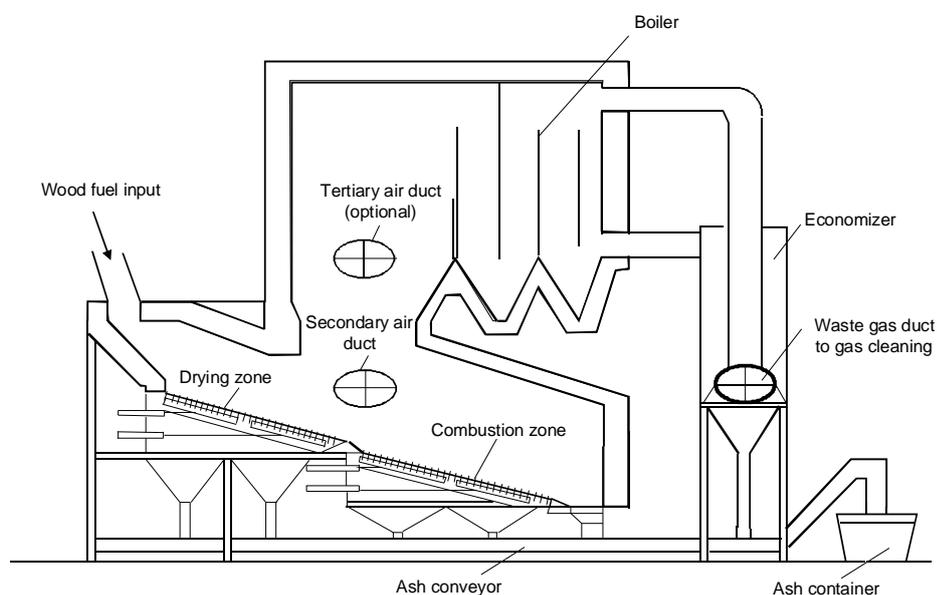
La biomasse typique à base de bois présente une teneur en cendre de moins de 5% ; des teneurs en cendre plus élevées se trouvent dans la biomasse telle que les boues de stations d'épuration. Une question importante concerne l'élimination des cendres car celles-ci peuvent contenir des polluants organiques persistants non intentionnels et d'autres produits toxiques, suivant les matières brûlées (pour de plus amples informations, se référer à la section III.C, iv, sous-section 2.1 de ces directives).

2.2 Fours à grille

Les fours à grille représentent aujourd'hui la technologie la plus utilisée pour la combustion de déchets et de résidus de bois. En fonction de la technique, le combustible bois passe à travers la chambre de combustion grâce à des grilles en pente, des grilles en mouvement, des grilles vibrantes (Figure 1) ou des grilles mobiles. Des systèmes de combustion sur grilles conviennent pour tous les types de résidus et de déchets de bois ayant des particules entre 20 et 300 mm de diamètre. Cependant, des particules fines, comme le bois pulvérisé, peuvent être injectées à travers des lances de combustion supplémentaires. Un facteur très important pour l'efficacité de la combustion, pour les grilles mobiles et vibrantes, est le contrôle du combustible et de l'air. En ce qui concerne la génération de vapeur, la conception du système de combustion du four permet de choisir différentes options pour la réduction d'émissions primaires, y compris d'effectuer la combustion par étapes et de recycler les gaz de combustion. L'investissement pour les systèmes de grilles de combustion dépend beaucoup de la technologie de la grille et du système de lavage des gaz de combustion. Par rapport aux unités de

combustion en lit fluidisé, en particulier pour les capacités les plus faibles, l'investissement spécifique relatif à l'apport total de chaleur est considérablement réduit (CSTB 2000).

Figure 1. Schéma général d'un four à grille vibrant



2.3. Combustion à lit fluidisé

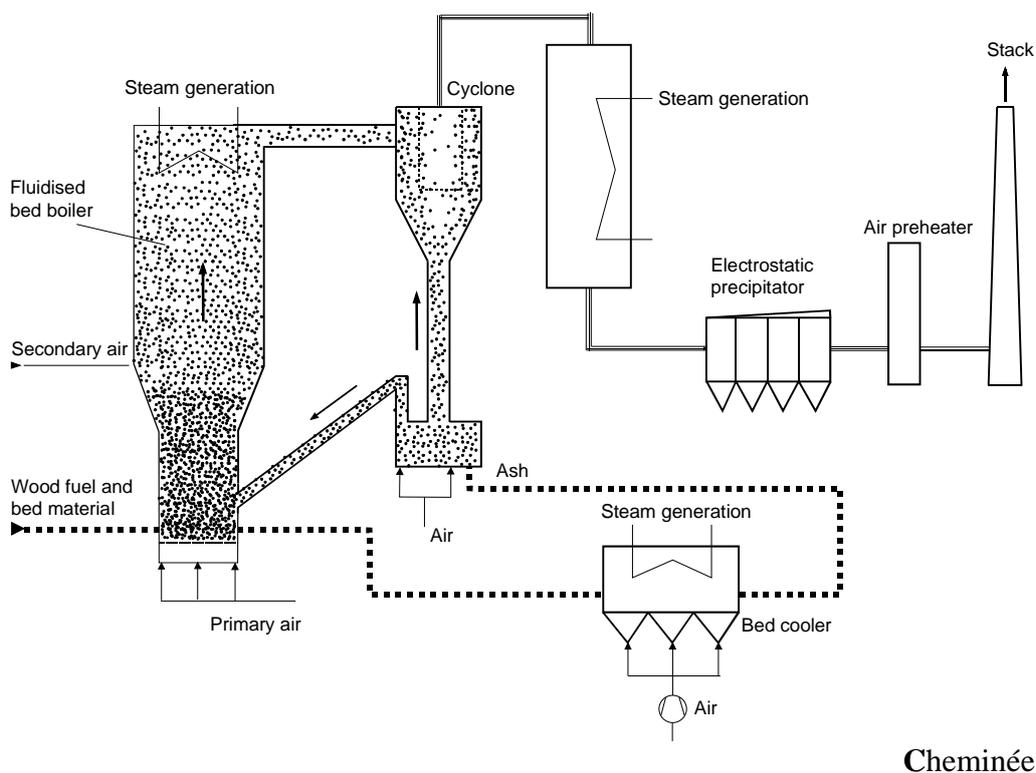
La combustion à lit fluidisé est utilisée pour divers types de combustibles solides. Dans une unité typique de combustion à lit fluidisé, on maintient le combustible à l'état fluidisé en injectant de l'air en même temps qu'un matériau inerte formé principalement de calcaire ou de sable, avec les cendres du combustible. Pour la combustion du bois on utilise surtout deux technologies de combustion en lit fluidisé. Celles-ci sont la combustion en lit fluidisé à insufflation d'air, et le lit fluidisé avec circulation d'air (Figure 2). La combustion en lit fluidisée est convenable même pour les combustibles de plus faible qualité, et pour une grande variété de combustibles. Pour la combustion du bois, on peut utiliser presque tout type de résidu et de déchet de bois. On peut admettre des humidités allant jusqu'à 60%. Les systèmes à lit fluidisé sont adaptables même pour des faibles charges. Il est possible d'utiliser des cycles avec des charges faibles ou élevées, sans le besoin de combustible d'appoint et à une vitesse supérieure par rapport à d'autres technologies de combustion.

Une corrosion due au chlore à haute température peut être supprimée en plaçant la dernière unité de surchauffe dans le lit. Par rapport à d'autres technologies de combustion, le fait d'utiliser une température de combustion plus faible dans les systèmes à lit fluidisé présente plusieurs avantages opérationnels pour le contrôle des émissions. L'investissement nécessaire pour des unités de combustion à lit fluidisé est influencé principalement par la technologie utilisée et par le type de système adopté pour le lavage des gaz de combustion. La combustion à lit fluidisé à circulation nécessite un investissement particulier, nettement supérieur à celui nécessaire pour la combustion à lit fluidisé à insufflation d'air pour des unités de moins de 30 MW th (CSTB 2000).

2.4. D'autres technologies de combustion du bois

D'autres technologies de combustion pour le bois comprennent les fours mécaniques à alimentation par le bas, les fours à suspension cyclonique (four à moufle en suspension), les fours rotatifs, les fours à sole turbulent, les fours à ventilation, et les brûleurs de poussières. Les fours à alimentation par le bas et les fours à foyer mécanique à alimentation par le bas, sont particulièrement adaptés à la combustion de copeaux de bois qui sont secs et pas trop gros avec une faible teneur en cendres. Cette technique est utilisée pour des chaleurs d'entrée totaux allant jusqu'à 5 MW th. Par rapport à des fours à foyer normaux, l'investissement spécifique est généralement plus faible. Puisque les fours à suspension cyclonique nécessitent une teneur en poussière d'au moins 50% leur application est limitée principalement à l'industrie du traitement du bois. Des brûleurs à poussière sont utilisés pour des poussières de bois ayant des dimensions de particules jusqu'à 1 mm. Parmi les applications de ce type de brûleur on peut citer les sécheurs de copeaux de bois et l'injection de poussières de bois dans les fours à ciment (CSTB 2000).

Figure 2. Schéma général d'un four utilisant la combustion en lit fluidisé à circulation



| | | | |
|--------------------------|----------------------|----------------------|--|
| Génération de vapeur | Cyclone | Génération de vapeur | |
| Chaudière à lit fluidisé | | Préchauffeur d'air | |
| | | Electrofiltre | |
| Air secondaire | Cendres | | |
| Combustible bois et | Génération de vapeur | | |
| matériau du lit | | | |
| Air primaire | Refroidisseur du lit | | |
| | Air | | |

Cheminée

2.5 Techniques de conversion énergétique

Pour la conversion d'énergie en aval des fours de combustion du bois, on doit faire une distinction entre les systèmes d'échange de chaleur (chaudières) et les systèmes d'autres systèmes pour la production combiné de chaleur et d'électricité (par exemple, turbines à gaz, moteurs à vapeur). Le type de chaudière dépendra du milieu utilisé pour le refroidissement, la dimension de l'unité et la

qualité d'énergie recherchée. Les chaudières à tube de fumée sont utilisées pour la production d'eau chaude ou de vapeur, en aval des fours à bois de petite ou moyenne taille. Le transfert de chaleur ne se fait que par convection. Les chaudières à tube d'eau sont utilisées pour les unités de combustion de déchets de bois de grande ou moyenne taille. L'eau à évaporer circule dans des tubes entourés des gaz de combustion chauds. Le transfert de chaleur a lieu surtout par radiation. Par comparaison aux chaudières à tube de cheminée, on peut utiliser des pressions opératoires considérablement plus élevées – jusqu'à 100 bars. En aval des fours à bois, on ne produit généralement que la chaleur, ou la chaleur plus l'électricité ensemble. Pour cette raison, la génération d'électricité à condensation peut être négligée. Cependant les unités de chaleur et à électricité combinées pourraient aussi nécessiter des capacités de condensation dans le cas où la chaleur générée n'est pas utilisée (CSTB 2000).

2.6 La co-combustion de bois (non traité) et de biomasse apparentée au bois

Par co-combustion on entend le brûlage de déchets et de résidus de bois ensemble avec d'autres matériaux, ou bien avec des combustibles fossiles. Le but est de créer des effets de synergie entre deux procédés de combustion. On obtient des avantages au niveau des coûts opératoires en utilisant des combustibles secondaires qui sont moins coûteux, et aussi au niveau de l'efficacité de combustion qui est plus élevée par rapport aux deux procédés exploités séparément. Il est possible, pour les déchets et résidus de bois, de faire une co-combustion dans les fours à ciment ou les centrales au charbon, et une co-gazéification dans les incinérateurs de déchets (CSTB 2000). Pour de plus amples informations, voir les sections V.A, V.B, et VI.D des présentes directives.

2.7 La gazéification du bois

La gazéification de bois, et de déchets de bois, consiste en la conversion à haute température de résidus solides et liquides dérivés de la décomposition thermochimique de la matière organique contenue dans le bois, pour donner un combustible gazeux avec addition d'agents oxydants. Le but principal de la gazéification du bois est de convertir autant de l'énergie chimique contenue dans la matière première (le bois) que possible, en une fraction gazeuse (gaz de gazogène) consistant surtout de produits gazeux combustibles à faible masse moléculaire.

Les techniques de gazéification disponibles sont en général liées au type de chaudière. Les techniques de gazéification disponibles sont la gazéification en lit fixe et la gazéification en lit fluidisé. Pour la gazéification du bois on préfère généralement les gazéificateurs à lit fixe dans le cas d'apports totaux de chaleur en dessous de 5 MW. Pour des capacités plus grandes on utilise plutôt les systèmes à lit fluidisé.

Le contenu énergétique du gaz produit par un procédé de gazéification peut être utilisé soit de manière thermique pour alimenter une chaudière ou pour un autre procédé thermique (seul, ou en co-combustion, par exemple dans une chaudière existante produisant de l'électricité, ou dans un four à ciment), soit de manière mécanique pour la génération d'électricité dans des moteurs à gaz ou des turbines à gaz. D'autres possibilités sont l'utilisation du gaz de gazogène pour la synthèse du méthanol ou dans des piles à combustible.

Le système nécessaire pour le nettoyage du gaz ainsi produit sera déterminé par la concentration d'impuretés et par exigences de la technique adoptée pour l'utilisation du gaz. En fonction de cette technique, le nettoyage du gaz est nécessaire pour éviter l'érosion, la corrosion et des dépôts indésirables, aussi pour assurer que les normes d'émission soient respectées. On peut distinguer deux approches différentes pour le nettoyage des gaz : le nettoyage à froid (ou humide) et le nettoyage à chaud. On considère que le nettoyage à chaud est plus avantageux pour les systèmes avancés à plus haute performance à cause de la possibilité d'atteindre des efficacités électriques et globales plus élevées, et du fait qu'il n'y a pas de génération d'effluents aqueux ni de condensât contaminé. Bien que l'on puisse considérer la gazéification comme une technique bien établie et fiable, pour toutes les unités avec génération d'électricité (turbines à gaz ou moteurs à gaz), le nettoyage des gaz est toujours une contrainte critique. Parmi les problèmes associés au procédé de nettoyage on trouve le contrôle du procédé, le coût d'élimination de résidus de la gazéification, et l'investissement et coûts opératoires élevés de l'unité de nettoyage des gaz elle-même (CSTB 2000).

2.8 La combustion d'autres biomasses

Parmi les autres combustibles à base de biomasse se trouvent des biocombustibles solides tels que la paille et autres produits végétaux, et les combustibles liquides tels que l'huile de canola. La combustion de la paille demande des techniques de combustion qui ne sont pas sensibles à la scorification des cendres. A cause de l'apport plus important des matières minérales et de chlore comparé à la combustion du bois, il se produit plus d'émissions de poussières, d'acide chlorhydrique (HCl), de dibenzo-*p*-dioxines polychlorés (PCDD) et de dibenzofuranes polychlorés (PCDF) (LfU 2002). Quelques résultats type de mesure d'émissions sont donnés dans la sous-section 4 ci-dessous.

2.9 Chaudières de récupération dans l'industrie de la pâte et du papier

Pour la fabrication de pâtes à papier on utilise des méthodes mécaniques, thermomécaniques, mécano-chimiques et chimiques (voir la section V.C des présentes directives). Dans la fabrication de pâte chimique, les fibres sont désintégrées de manière chimique. Les produits chimiques sont utilisés dans un procédé de cuisson pour pénétrer à l'intérieur de la fibre et dissoudre la lignine des parois cellulaires afin d'atteindre les lamelles complexes du centre. La lignine doit être enlevée des lamelles pour libérer les fibres. La lignine et beaucoup d'autres substances organiques sont ainsi mises en solution. Les produits chimiques utilisés dans les procédés au sulfate (Kraft) et sulfite sont récupérés de cette solution par une combustion en chaudière, ce qui permet aussi une récupération énergétique.

Les chaudières de récupération dans le cas du procédé au sulfate (Kraft) fonctionnent initialement dans des conditions réductrices, ce qui mène à la formation de sulfure de sodium. Le résidu fondu est composé de sulfure de sodium et de carbonate de sodium. Dans la deuxième et la troisième étape de combustion, on assure un flux d'air de combustion progressif afin d'obtenir une combustion complète. Ici, il est possible de récupérer les gaz odoriférants.

Les chaudières de récupération dans les procédés de fabrication au sulfite ne fonctionnent pas avec une combustion progressive. La lie est brûlée dans des conditions oxydantes avec très peu d'excès d'air.

2.10 La combustion de la tourbe

Dans l'Union Européenne, la tourbe représente un combustible important (considérée comme un combustible fossile) en Irlande et en Finlande. Les technologies de combustion appliquées à la tourbe sont similaires à celles utilisées pour la combustion du charbon (section VI.D des présentes directives). Aujourd'hui on brûle la tourbe surtout dans des chaudières à lit fluidisé (combustion en lit fluidisé en bouillonnement et à circulation). Ces chaudières ont typiquement des apports en fuel de moins de 200 MW, et elles produisent soit de l'électricité, soit de l'électricité plus de la chaleur pour l'industrie locale et aussi pour des circuits de chauffage local. Les chaudières à tourbe sont conçues aussi pour brûler d'autres combustibles à faible pouvoir calorifique et parfois aussi du charbon. L'huile lourde est couramment utilisée comme combustible auxiliaire pour le démarrage.

Grâce à ses propriétés la tourbe peut aussi être utilisée en co-combustion avec le bois. Du point de vue technique, il serait plus difficile de n'utiliser que le bois dans des unités existantes à cause de problèmes de corrosion et d'encrassement. La possibilité d'utiliser la tourbe permet d'assurer une source de combustible en continu dans des zones où le bois n'est pas disponible en quantité suffisante pour répondre à la demande de combustible (European Commission 2006).

3. Mesures de contrôles des émissions

3.1 Mesures primaires et secondaires applicables

La réduction des émissions de PCDD/PCDF comprend les mesures primaires et secondaires résumées au Tableau 3 (Baumbach and Zuberbühler 2002; CSTB 2000; LfU 2002).

Les mesures primaires applicables ressemblent à celles utilisées dans le secteur de l'incinération des déchets. Dans le cas de la biomasse non traitée, les mesures secondaires se limitent au traitement de la fumée. Des fours plus petits peuvent utiliser des multicyclones pour atteindre des concentrations de poussières dans les gaz de combustion lavés de 100–150 mg/Nm³. Les filtres en tissus ou les électrofiltres permettent d'atteindre des concentrations en poussières dans la gamme de < 5 à 25 mg/Nm³ (voir section III.C (iv) des présentes directives pour des conseils généraux sur le lavage des gaz de combustion).

En aval de la combustion de déchets de bois, il est possible d'effectuer un lavage supplémentaire des gaz de combustion à l'aide de procédés d'absorption ou d'adsorption. Généralement on n'utilise que des procédés d'adsorption à cause de leur coût plus faible. L'injection d'agents de sorption secs (réacteur à flux entraîné) devient plus importante en aval de la combustion du bois à cause de sa relative simplicité et de ses coûts faibles. On utilise généralement un mélange de substances calcifères et du charbon actif, ou bien du charbon actif venant du lignite comme agent d'adsorption. Des agents calcifères possibles sont le calcaire (CaCO₃), la chaux (CaO) et la chaux hydratée (Ca(OH)₂). Tandis que les agents calcifères enlèvent le dioxyde de soufre (SO₂), l'acide chlorhydrique (HCl) et l'acide fluorhydrique (HF), les divers types de charbons actifs minimisent les émissions de métaux lourds (mercure, cadmium et arsenic), les émissions de PCDD/PCDF et les émissions d'hydrocarbures polycycliques aromatiques. Un mélange typique utilisé dans un réacteur à flux entraîné comprend 85–95% d'agents calcifères et 5–15% de charbon actif. Comme mesure de réduction des émissions secondaires d'oxydes d'azote (NO_x), en particulier en aval de grandes installations de combustion de déchets de bois, on peut utiliser une réduction non catalytique mais une réduction par catalyse sélective est peut-être aussi indiquée. La réduction sélective sur catalyseur a été appliquée à des brûleurs de biomasse à lits fluidisés. Un des problèmes rencontrés avec cette technique est que la désactivation du catalyseur est plus rapide quand on brûle de la biomasse, par rapport au charbon, en particulier dans le cas des fours à grille et pour la combustion de la paille.

Tableau 3. Mesures des contrôles d'émissions de PCDD/PCDF pour installations de brûlage de la biomasse

| Options de gestion | Niveaux d'émission (%) | Coûts estimés | Risques liés à la gestion |
|---|--------------------------------------|---|--|
| <i>Mesures primaires</i> | | | |
| Contrôle de la qualité du combustible (par ex.: valeur calorifique, humidité, contaminants) | Niveaux des émissions pas quantifiés | Coûts de combustibles plus élevés | Teneur en eau plus élevée augmente la formation de PCDD/PCDF |
| Combustion optimisée (par ex., réduction d'air en excès) | | Pas de coûts additionnels pour de nouvelles installations | |
| Temps de résidence suffisant des gaz de combustion dans la zone chaude du four | | | |
| <i>Mesures secondaires</i> | | | |
| Traitement efficace des poussières | Efficacité moyenne | | Température du filtre < 200° C |
| Injection de sorbants secs Réduction catalytique | Efficacité élevée | Investissement additionnel: ^a réduction catalytique | Élimination nécessaire des sorbants, pas courant dans des |

| Options de gestion | Niveaux d'émission (%) | Coûts estimés | Risques liés à la gestion |
|--------------------|------------------------|---------------------|---|
| sélective | | sélective 110–180 % | installations brûlant de la biomasse vierge |

- a. Pourcentage relatif à l'investissement pour le four, la chaudière et le collecteur de poussières dans des unités de combustion du bois avec une capacité thermique de 1 - 10 MW.

3.2 Caractéristiques du combustible

La qualité du combustible joue un rôle majeur dans la formation de PCDD/PCDF pendant la combustion de la biomasse. Les PCDD/PCDF sont toujours formés pendant la combustion du bois à travers des précurseurs tels que les phénols et la lignine, ou par des réactions *de novo* en présence de particules de carbone et de chlore. On peut s'attendre à des concentrations élevées de PCDD/PCDF en brûlant du bois traité (déchets de bois). Les résidus de bois (déchets et industriel) contiennent souvent divers types de contaminants (arsenate de cuivre chromé, pentachlorophénol, créosote, adhésifs, résines, peintures et autres revêtements de surface). Une autre source majeure de PCDD peut être du bois chargé de sel qui est brûlé dans des chaudières de puissance dans des usines à pâte à papier (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

La combustion de bois contaminé, tels que des déchets de bois urbain et de bois de démolition, devra être strictement limitée aux installations munies de systèmes d'épuration des gaz comme les incinérateurs de déchets (voir section V.A des ces directives) (Nussbaumer 2003).

La teneur en humidité de la biomasse peut être élevée. On utilisera parfois donc des sècheurs avant l'étape de combustion. On considère que les sècheurs à vapeur ne présentent pas de problèmes de sécurité, avec un impact environnemental faible. Une autre méthode est basée sur le séchage à l'aide de gaz de combustion, qui est ensuite renvoyé à la cheminée. Dans ce cas il existe la possibilité d'émissions de produits organiques, tels que des cires ou substances aromatiques (European Commission 2006).

4. Production des procédés

4.1 Formation de PCDD et de PCD dans les procédés de combustion

La réaction principale menant à la formation de PCDD/PCDF dans les procédés de combustion est la synthèse *de novo*. La Section III.C (i) de ces directives fournit des informations générales sur les mécanismes de formation des PCDD/PCDF. Quelques considérations spécifiques touchant à la combustion de la biomasse sont énumérées ci-dessous.

Les PCDD peuvent être formés en l'absence de composés chlorés organiques. Il suffit qu'il y ait présence de particules de carbone et une source de chlore. Des investigations sur un foyer stationnaire d'un four ont montré que la quantité totale de PCDD/PCDF et de polychlorobiphényles coplanaires (PCB) formée était proportionnelle à la teneur en chlore des échantillons brûlés quand la température de la chambre de combustion était en dessous de 700° C. Par contre, quand la température du foyer était supérieure à 800° C, il n'y avait qu'une formation faible de PCDD/PCDF et de PCB coplanaires, quelque soit la teneur en chlore du combustible (Yasuhara, Katami and Shibamoto 2003).

Les meilleures conditions de combustion dans les installations plus grandes peuvent avoir un impact favorable sur les concentrations des PCDD/PCDF. Des essais ont montré que même quand les matériaux traités contenaient de fortes concentrations d'halogènes, les concentrations se maintenaient en dessous de celles obtenues dans le cas de petites installations utilisant du bois naturel. Lorsqu'on ajoutait des matériaux contenant des halogènes, on a observé une relation très nette entre les

concentrations en monoxyde de carbone (CO) et en PCDD/PCDF. L'influence dominante de la qualité de la combustion sur les émissions de PCDD/PCDF se voyait à travers l'augmentation des teneurs en CO, et la décroissance simultanée de la température des gaz de combustion (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

4.2 Emissions de PCDD/PCDF

4.2.1 La combustion de bois ou de déchets de bois

L'influence de la qualité du combustible et des conditions de combustion sur les émissions des PCDD/PCDF est illustrée dans le Tableau 4.

Tableau 4. Concentrations de PCDD/PCDF pour différents types de combustible bois

| Type de bois | PCDD/PCDF min. ng I-TEQ/m ³ (à 11% O ₂) ^a | PCDD/PCDF max. ng I-TEQ/m ³ (à 11% O ₂) |
|--|--|---|
| Morceaux de bois (naturel) | 0,02 | 0,13 |
| Copeaux de bois (naturel) | 0,004 | 0,88 |
| Déchets de bois | 0,03 | 18,0 |
| Panneaux agglomérés sans chlore ni métaux lourds | 0,03 | 0,10 |
| Panneaux agglomérés avec PVC ou chlorure d'ammonium (NH ₄ Cl) | 0,05 | 12,28 |
| Panneaux d'agglomérés avec pentachlorophénol | 0,21 | 5,14 |

a. 1 ng (nanogram) = 1×10^{-12} kilogram (1×10^{-9} gram). Pour des informations sur les mesures de toxicité voir la section I.C, paragraphe 3 des présentes directives.

Source: Nussbaumer 2004.

Une revue complète des résultats des tests sur les PCDD/PCDF produits par des installations brûlant du bois se trouve dans Lavric, Konnov and De Ruyck 2004.

4.2.2 La combustion d'autres biomasses

Launhardt et Thoma ont testé divers biocombustibles à base de plantes herbacées (paille, plants de céréales entiers et foin de rebut) ainsi que du bois d'épicéa, en vue d'examiner leur potentiel pour former des PCDD/PCDF, des phénols polychlorés, des benzènes polychlorés, et des hydrocarbures polycycliques aromatiques pendant la combustion. Les essais ont été faits dans un four à chargement automatique à multi-combustible destiné aux applications domestiques de 50 kW. D'après les mesures des émissions de CO, il semblait que les conditions de combustion étaient constantes. Des analyses ont été faites sur les gaz de combustion et sur différentes fractions des cendres. Les concentrations de PCDD étaient dans la fourchette de 0,052–0,891 ng I-TEQ/Nm³ à 13% O₂ (Tableau 5). Toutes les émissions venant du bois étaient à des niveaux relativement bas. On a mesuré des émissions entre 10 et 25 fois plus élevées de PCDD/PCDF, de phénols polychlorés et de benzènes polychlorés dans le cas des plantes herbacées (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

Tableau 5. Emissions de PCDD/PCDF venant de différents types de biomasse

| Type de combustible | PCDD/PCDF ng I-TEQ/m ³ |
|---------------------|--------------------------------------|
| Bois (épicéa) | 0,052 |
| Paille (blé) | 0,656 |

| | |
|---------------------|-------|
| Foin | 0,891 |
| Triticale | 0,052 |
| Boulettes de canola | 0,245 |

Source: LfU 2002.

Des données pour les émissions de PCDD/PCDF dans la combustion de biomasse liquide sont rares. Des tests sur un moteur à huile de canola pour la production combinée de chaleur et d'électricité (90 kW) ont donné des concentrations de PCDD/PCDF de 4–7 pg TEQ/m³. Les concentrations de PCB ont atteint 40–81 ng/m³ (LfU 2002).

4.2.3. La combustion de liqueurs noires

Le Tableau 6 montre des facteurs d'émission sélectionnés venant de chaudières de récupération des liqueurs noires Kraft.

Tableau 6. Emissions de PCDD/PCDF venant de chaudières de récupération de liqueurs noires Kraft

| Combustible | Facteur d'émission (I-TEQ) | Facteur d'émission (TEQ-OMS) | Référence |
|--------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------|
| Solides de liqueur noire | 0,10–0,15 ng/kg | 0,10–0,16 ng/kg | EPA 2000 |
| | 0,029–0,065 ng/kg | 0,028–0,072 ng/kg | EPA 2000 |
| | 0,07 ng/kg | | UNEP 2005 |

a. En général 1 kg de liqueur noire (teneur en eau 70%) correspond à un volume de gaz de cheminée de 5-8 m³ (teneur en oxygène entre 5 et 8%)

4.2.4 La combustion de tourbe

Dans le document European Commission 2006, des émissions de PCDD sont présentées dans le cas d'une chaudière atmosphérique à lit fluidisé équipée d'un filtre à manche, brûlant 50% de tourbe et 50% d'écorce. Les émissions de PCDD/PCDF s'élevaient à 0,008 ng TEQ/Nm³ (niveau des émissions de poussières: 10 mg/Nm³).

4.2.5 Autres rejets de PCDD/PCDF provenant de la combustion de la biomasse

Les PCDD/PCDF sont rejetés avec les résidus solides tels que les cendres résiduelles et les cendres volantes. En générale, les concentrations de PCDD/PCDF augmentent lorsque les particules deviennent plus petites (LfU 2002). Les concentrations de polluants dans les cendres volantes ont donc tendance à être plus élevées que dans les cendres résiduelles.

Pohlandt et Marutzky ont analysé les cendres de four, de chaudière et les cendres volantes. Ils ont recueilli les cendres dans différentes installations de l'industrie du bois, d'un atelier de fumage, et de la combustion de bois imprégné d'agents préservatifs contenant du bore, du chrome et du cuivre dans un four de laboratoire à deux étages. Ils ont trouvé que les teneurs les plus élevées en PCDD/PCDF se trouvaient dans les cendres volantes. Les concentrations de PCDD/PCDF dans les cendres provenant du bois imprégné étaient plus élevées que dans celles provenant de la combustion du bois à imprégnation diluée, mais plus faibles que les concentrations dans les cendres volantes des installations industrielles brûlant du bois. Les concentrations de PCDD dans les cendres volantes étaient plus élevées que dans les cendres résiduelles. Cette observation a été confirmée par Wunderli *et al.* et par Yamamura *et al.* (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

Les cendres volantes qui sont récupérées doivent être éliminées d'une manière écologiquement rationnelle, en particulier dans le cas de la combustion de déchets de bois (voir section III.C (iv), section 2.1 des présentes directives).

On élimine les cendres volantes provenant des installations de combustion de la paille dans des décharges sanitaires, surtout à cause de la teneur élevée en cadmium. On élimine normalement les

endres résiduelles dans les champs, mais elles peuvent aussi être utilisées comme matériaux de construction pour les routes lorsqu'on respecte certaines caractéristiques physiques et chimiques (European Commission 2006).

Les fractions les plus fines des cendres volantes doivent être mises en décharge à cause de leur teneur élevée en métaux lourds et en polluants organiques persistants. Des restes de sorbant usé doivent également être mis en décharge.

5. Meilleures techniques disponibles et meilleures pratiques environnementales

5.1 Mesures primaires et optimisation du procédé pour réduire les émissions de PCDD/PCDF

(Nussbaumer and Hasler 1998)

1. Empêcher l'incinération illégale de déchets;
2. La combustion de bois contaminé tel que les déchets urbains et le bois de démolition, doit être strictement limitée aux installations équipées de systèmes de nettoyage des gaz efficaces; il est préférable que de tels matériaux ne soient pas utilisés dans des chaudières et soient plutôt considérés comme déchets.
3. Contrôle de la qualité du combustible (par exemple, valeur calorifique, teneur en eau, contaminants);
4. Technologie de combustion optimisée: amélioration du taux de combustion des gaz et des cendres, et réduction de la teneur en poussières:
 - Optimiser le rapport d'air en excès à $< 1,5-2$, mais il faut faire attention car tout changement apporté aux rapports d'air peut aussi affecter la quantité des autres émissions;
 - Bon mélange du gaz et de l'air (turbulence élevée);
 - Temps de résidence suffisant dans la zone chaude;
 - Perturbations minimales dans le lit de combustion et distribution homogène de l'air primaire;
 - Intégration facultative de la réduction catalytique sélective pour diminuer les NO_x ;
5. Mesures dans la chaudière:
 - Temps de résidence minimale dans la gamme de température entre 180° et 500°C et minimisation des dépôts de poussières;
6. Optimisation des conditions opératoires de l'unité:
 - Application de technologies de contrôle avancées pour la combustion pour assurer une combustion optimisée;
 - Fonctionnement dans des conditions stables, sans arrêts ni redémarrages et empêchement de changements rapides dans la production de chaleur et de la demande;
 - Nettoyage de la zone chaude des gaz de combustion à intervalles réguliers.

5.2 Mesures secondaires

1. Nettoyage optimisé des gaz

- Trempe rapide des gaz de combustion (< 200° C) avant le passage dans les filtres pour éviter la fenêtre de reformation (ou synthèse) *de novo*
- Séparation des PCDD/PCDF dans des séparateurs de poussières (électrofiltres, filtres à tissus) en combinaison avec l'injection de sorbants (si nécessaire).

2. Destruction facultative des PCDD/PCDF par oxydation catalytique, c'est à dire en combinaison avec une réduction catalytique sélective pour la réduction des NO_x

6. Niveaux de performance associés aux meilleures techniques disponibles

Pour les installations de comutilisant la biomasse, en particulier les unités brûlant du bois, on estime que l'on peut atteindre des niveaux d'émission en dessous de 0,1 ng I-TEQ/m³

7. Suivi des performances et communication des résultats

Les émissions de PCDD/PCDF devront être mesurées régulièrement en conformité avec les normes internationales.

Afin d'assurer une combustion complète, les fours devront être équipés d'instruments de mesure qui suivent en continu les concentrations massiques des émissions de monoxyde de carbone.

Dans le but d'assurer la bonne marche des équipements de contrôle des émissions, les fours devront être équipés d'instruments de mesure qui suivent en continu les concentrations massiques des émissions de poussières, de manière qualitative et quantitative (en fonction des besoins des unités de tailles différentes). Pour de plus amples informations sur le suivi, voir la Section III (vi) de ces directives.

En plus, des procédures de contrôle de qualité devront être mises en œuvre pour le suivi de la composition du combustible.

Références

Baumbach G. and Zuberbühler U. 2002. *Entwicklung eines Feuerungskonzeptes zur Verbesserung des Ausbrandes bei gleichzeitiger NO_x-Minderung bei der Holzverbrennung im gewerblichen Bereich*. Report BWPLUS 3 96 007. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, University of Stuttgart.

CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). 2000. *Energy-Efficient Technologies from Demolition, Packaging and Industrial Wood Waste*. Final Report. Programme THERMIE, Type B Action (STR-1965-98-FR), Phase I. CSTB with Quasco, CTBA, La Calade and DFIU/IFARE.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. *Exposure and Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and Related Compounds, Part I: Estimating Exposure to Dioxin-Like Compounds Vol. 2: Sources of Dioxin-Like Compounds in the United States*. Draft Final Report. EPA, Washington, D.C.
www.epa.gov/ncea/pdfs/dioxin/part1/volume2/volume2.pdf.

European Commission. 2006. *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. Formally adopted BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>.

IEA Bioenergy. 2004. *Biomass Combustion and Co-firing: An Overview*. IEA Bioenergy Task 32. www.ieabioenergy-task32.com.

Lavric E.D., Konnov A.A. and De Ruyck J. 2004. "Dioxin Levels in Wood Combustion: A Review." *Biomass and Bioenergy* 26:115–145.

LfU (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz). 2002. *Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe*. Zusammenfassender Bericht zu 15 Teilprojekten.

Nussbaumer T. 2003. “Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction.” *Energy and Fuels* 17:1510–1521.

Nussbaumer T. 2004. *Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung*. Umwelt-Materialien Nr. 172. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Nussbaumer T. and Hasler P. 1998. *Emissions of PCDD/F from Biomass Combustion*. Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, 8–11 June 1998, Würzburg (Germany).

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva.
www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2003.pdf.

Yasuhara A., Katami T. and Shibamoto T. 2003. “Formation of PCDDs, PCDFs, and Coplanar PCBs from Incineration of Various Woods in the Presence of Chlorides.” *Environ. Sci. Technol.* 37:1563–1567.
