

**Partie II Catégorie de source (b):  
Le brûlage de déchets dangereux dans des fours  
à ciment**

## Table des matières

V.B. Les fours à ciment brûlant des déchets dangereux .....	4
Préambule .....	4
<b>1. Introduction</b> .....	<b>5</b>
1.1 Généralités sur l'industrie du ciment.....	5
1.2 Brûlage des déchets dans les fours à ciment.....	6
<b>2. Liens vers d'autres sources d'information</b> .....	<b>7</b>
2.1 Considérations générales sur la gestion des déchets (Section III.C (ii)) .....	8
2.2 Autres options au traitement des déchets.....	8
2.3 Directives Techniques de la Convention de Bâle .....	8
<b>3. Les procédés de production de ciment</b> .....	<b>8</b>
3.1 Principe général .....	8
3.2 Préparation des matières premières .....	9
3.3 Le procédé du four rotatif.....	10
3.4 Le procédé de broyage du ciment.....	12
3.5 Contrôle des émissions .....	13
<b>4. Le brûlage</b> .....	<b>13</b>
4.1 Utilisation de combustibles conventionnels .....	13
4.2 Utilisation de déchets ou de déchets dangereux comme combustible .....	14
<b>5. Produits entrant et sortant du procédé</b> .....	<b>20</b>
5.1 Sorties générales .....	20
5.2 Utilisation de l'énergie .....	21
5.3 Emissions de PCDD/PCDF .....	22
5.4 Rejets de PCH et HCB .....	26
<b>6. Meilleures techniques disponibles et meilleures pratiques environnementales</b> .....	<b>26</b>
6.1 Mesures générales de gestion.....	26
6.2 Mesures spécifiques.....	28
<b>7. Exigences de performance basées sur les meilleures techniques disponibles</b> .....	<b>33</b>
<b>8. Suivi du procédé et des paramètres opératoires</b> .....	<b>33</b>

## Tableaux

Tableau 1. Résumé des mesures de PCDD/PCDF .....	23
Tableau 2. Injection de déchets au niveau du préchauffage et de la précalcination, et influence sur les émissions de PCDD/PCDF .....	25

## Figures

Figure 1. Schéma du procédé et frontières entre les différentes étapes de la production de ciment .....	10
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Figure2. Four rotatif avec fours de préchauffage et de calcination..... 11

Figure3. Evolution de la température en fonction des temps de séjour dans un four de fabrication de clinker avec préchauffage et pré-calcination cycloniques .....22

## V.B. Le brûlage de déchets dangereux dans des fours à ciment

### Résumé

L'objectif principal des fours à ciment est de produire le clinker. Brûler les déchets dans les fours à ciment vise à récupérer l'énergie et à remplacer les énergies fossiles. Dans certains cas, des déchets dangereux sont détruits dans ces installations.

Le procédé de fabrication comprend la décomposition à environ 900°C du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ , chaux) (calcination), suivie du procédé de formation de clinker dans un four rotatif à 1450°C. Le clinker est ensuite broyé sous vide avec du gypse et d'autres additifs, pour produire le ciment. Selon les conditions physiques et chimiques, les principales étapes du procédé de fabrication de ciment, notamment la cuisson, sont dites sèche, humide, semi sèche et semi humide.

La combustion des déchets dangereux peut conduire à la formation puis au dégagement de substances chimiques inscrites à l'Annexe C de la Convention de Stockholm. En outre, ces rejets peuvent se produire dans les lieux de stockage.

En travaillant dans de bonnes conditions de fabrication, et avec l'installation de mesures primaires appropriées, il devrait être possible de faire fonctionner les fours à ciment brûlant des déchets dangereux de telle manière à ce que la formation et le rejet de substances chimiques inscrites à l'Annexe C, soient réduits pour obtenir des concentrations de PCDD et PCDF, dans les gaz de combustion, inférieures à 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup> (teneur en oxygène de 10%), en fonction de divers paramètres comme l'utilisation de combustibles propres, le chargement des déchets, la température et le dépoussiérage. Au besoin, des mesures secondaires additionnelles devraient être appliquées.

Il existe de nombreuses données sur les émissions dans l'air des PCDD et PCDF.

Des rejets de PCDD/PCDF, par les poussières des fours à ciment, et éventuellement par le clinker, ont été signalés et font actuellement l'objet d'investigations. Des informations sur les PCB et HCB sont encore rares.

Les niveaux de performance associés aux meilleures techniques disponibles et aux meilleures pratiques environnementales, pour le contrôle des PCDD et PCDF dans les gaz rejetés, sont < 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup> avec des conditions de référence de 273 K, 101.3kPa, 10% O<sub>2</sub> et gaz sec.

### Préambule

Le document suivant fournit des orientations sur les meilleures techniques disponibles et les meilleures pratiques environnementales, pour les fours à ciment brûlant des déchets dangereux en rapport avec l'Article 5 et l'Annexe C, Partie II de la Convention. Les déchets peuvent être co-incinérés dans des fours à ciment, soit en tant que combustible de rechange, soit pour les détruire. Cette section considère aussi donc les exigences de l'Article 6 de la Convention concernant la destruction de déchets contenant des polluants organiques persistants.

Dans cette section est pris également en compte le rapport *General Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or*

*Contaminated with Persistent Organic Pollutants (POPs)* développé par les Parties à la Convention de Bâle sur le Contrôle des Mouvements Transfrontières de Déchets Dangereux et de leur Elimination (Basel Convention Secretariat 2005). Ces directives fournissent des conseils sur les meilleures techniques disponibles à appliquer pour la destruction ou la transformation irréversible de polluants organiques persistants, et identifient la co-incinération dans les fours à ciment comme un procédé qui peut être utilisé pour la destruction et la transformation irréversible de polluants organiques persistants dans les déchets.

La destruction et la co-incinération de déchets et de déchets dangereux dans des fours à ciment se situent également dans le cadre de cette section. Il doit être gardé à l'esprit, en lisant ces directives, qu'il n'existe pas actuellement de définitions rigoureuses des termes "déchets" et "déchets dangereux". Dans le contexte de ces directives, le terme "déchet" est utilisé indépendamment de sa valeur énergétique, ou de son potentiel à se substituer à des ressources minérales.

Cette section aborde les questions concernant les catégories de sources dans l'Annexe C, partie II b : le brûlage de déchets dangereux dans les four à ciment ; et dans le cas de la co-incinération de déchets municipaux ou de boues d'épuration dans les fours à ciment, la catégorie de source partie II a.

## **1. Introduction**

### **1.1 Généralités sur l'industrie du ciment**

La production mondiale de ciment a augmenté de manière significative ces dernières années, et il est prévu que cette tendance continuera à l'avenir. Selon les chiffres de l'industrie du ciment, la production totale annuelle en 2003 était de 1'940 millions de tonnes, à comparer avec 1'690 millions de tonnes en 2001 et 1'660 millions de tonnes en 2002. Une grande partie de cette production est effectuée par voie sèche (de Bas 2002 ; DFIU/IFARE 2002).

Au cours des dernières années, il y a eu une augmentation annuelle régulière estimée de 3,6% de cette production due à une forte demande des pays en développement et des pays avec des économies en transition. Actuellement l'Europe a une part de 14,4% de la production mondiale, les Etats-Unis d'Amérique 4,7%, le reste de l'Amérique 6,6%, l'Asie 67,5% (dont la Chine 41,9%), l'Afrique 4,1% et le reste du monde 2,7%. On a estimé que la consommation globale de ciment était de 260 kg par habitant en 2004 (Cembureau 2004).

La production de ciment en Europe atteint environ 190 millions de tonnes par an. Plus de 75% de cette production repose sur des procédés voie sèche, grâce à l'adoption accrue de ces procédés au rendement énergétique plus élevé pour les installations nouvelles, et de capacité plus importante ; 16% du total est produit par voie semi sèche ou semi humide, et 6% par voie humide. La capacité typique d'un nouveau four européen est de 3'000 tonnes de clinker par jour (Wulf-Schnabel and Lohse 1999).

L'industrie du ciment en Chine a produit 1'038 millions de tonnes de ciment en 2005 (808 kg par habitant ; 45,4% de la production mondiale)<sup>1</sup>. Approximativement 60% ont été produit dans 4'000 fours verticaux (Karstensen 2006a).

Aux Etats-Unis, un four moyen produit 468'000 tonnes par an (chiffre de 2002). Aujourd'hui, environ 81% du ciment produit aux Etats-Unis est fabriqué en utilisant le procédé par voie sèche (site Internet du Portland Cement Association).

Traditionnellement, le combustible primaire utilisé dans les fours à ciment est le charbon. D'autres combustibles sont également utilisés, tels que le coke de pétrole, le gaz naturel et le pétrole. (European Commission 2001). En Europe, la consommation d'énergie spécifique de l'industrie cimentière a été réduite d'environ 30% au cours des 20 dernières années (l'équivalent approximatif de 11 millions de tonnes de charbon par an) (Cembureau 2004). Il n'est pas rare que les fours puissent être alimentés à partir de différents combustibles et que ces combustibles changent de temps à autre en fonction de leurs coûts.

## **1.2 Brûlage de déchets dans les fours à ciment**

En plus des carburants conventionnels mentionnés dans la section 1.1, l'industrie cimentière emploie divers types de déchets comme combustible. Dans l'industrie du ciment européenne la consommation de déchets en tant que combustible s'élève à environ 6 millions de tonnes, ce qui correspond à un taux thermique de substitution de 18% (Cembureau 2004).

En outre, les fours à ciment peuvent contribuer à la destruction de déchets, y compris les déchets dangereux, dont certains avec peu ou pas de contenu énergétique ou matériaux minérale utile. Ceci peut être fait sur demande des autorités nationales (gouvernements) ou en réponse à une demande locale. Dans une installation bien contrôlée, on peut atteindre des efficacités de destruction élevées pour les composés organiques.

Le co-traitement des déchets dangereux peut seulement se faire si certains contrôles sont effectués : à l'entrée (par exemple la teneur en métaux lourds, la valeur calorifique, la teneur en cendres, la teneur en chlore), pendant le procédé, et sur les émissions, tel que décrit ci-dessous.

Cependant, il doit être précisé une nouvelle fois, que les fours à ciment sont principalement des procédés de production de clinker, et toutes les conditions de fonctionnement qui peuvent donner un clinker satisfaisant ne sont pas forcément idéales pour la destruction des déchets; par exemple, les fours à ciment tendent à fonctionner à des niveaux plus bas en oxygène, et plus élevés de monoxyde de carbone, que les incinérateurs bien réglés. La destruction des déchets organiques a besoin non seulement de hautes températures pendant des durées assez longues, mais aussi d'un apport d'oxygène suffisant, et un bon mélange des composés organiques à détruire, et de l'oxygène. Des conditions peuvent exister où les déchets ne sont pas détruits de manière adéquate, si le déchet n'est pas introduit correctement, ou si les niveaux disponibles d'oxygène sont trop faibles. La conception et l'opération des fours à ciment sont cruciales pour ce type d'application.

Il doit être souligné que cette activité est distincte de la substitution du combustible ou de la matière première dans le procédé. Des fours à ciment ont été employés de cette façon pendant

---

<sup>1</sup> Communication de CEMBUREAU (2006)

plusieurs d'années dans des pays tels que le Japon, la Norvège et la Suisse, où il y a peu d'espace disponibles pour des sites de décharges. Plus récemment, des fours modernes ont été employés pour la destruction de déchets dans quelques pays en développement, où le manque d'infrastructures existantes pour l'élimination des déchets et leur incinération signifie que les fours présentent l'option la plus économique et la plus facilement disponible. Cette section vise à donner des conseils en ce qui concerne les questions environnementales qui interviennent dans de tels cas. Même là où de bonnes infrastructures d'élimination de déchets existent, il peut être utile de compléter la capacité locale par l'utilisation des fours à ciment.

L'application des approches impliquant la gestion des déchets, telle que la réutilisation ou le retraitement, est préférable à l'élimination par mise en décharge ou en dépôts, ou par une destruction dans des fours à ciment. Une évaluation au cas par cas devrait être effectuée dans le contexte d'une stratégie globale de gestion des déchets (voir la section III C (ii)).

Dans des cas exceptionnels, des fours à ciment peuvent être employés pour l'élimination sans risques de déchets qui ont des valeurs calorifiques ou teneurs en minerais faibles, et qui ne dérèglent pas le procédé de production de clinker. Pour ce type de traitement, les autorités et les exploitants de l'installation de ciment doivent parvenir à des accords appropriés au cas par cas.

Lorsque des fours à ciment sont employés pour la destruction des déchets, d'autres dispositions alternatives devraient être soigneusement évaluées. La destruction des déchets en fours à ciment doit répondre à des normes strictes environnementales, de sûreté, de salubrité et ne doit pas altérer la qualité finale du produit. Dans les pays où il n'existe pas de normes strictes pour la qualité du produit, il est important d'exiger l'application des meilleures techniques disponibles et des meilleures pratiques environnementales pour ces installations de co-incinération de déchets. Le procédé doit être contrôlé avec précision lors de la destruction de tels déchets, et les émissions régulièrement mesurées.

## 2. Liens vers d'autres sources pertinentes d'information

Des informations complètes sur l'opération des fours à ciment en général, et sur le brûlage de déchets dans les fours à ciment, se trouvent dans :

European Commission.2001. *Reference Document on the Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain<sup>2</sup>.(<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>)

European Commission.2005. *Reference Document on the Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.(<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>)

Holcim. 2006. *Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production*.The GTZ-Holcim public private partnership 2006.  
([http://www.holcim.com/gc/CORP/uploads/GuidelinesCOPROCEM\\_web.pdf](http://www.holcim.com/gc/CORP/uploads/GuidelinesCOPROCEM_web.pdf))

CSI (Cement Sustainability Initiative). 2006. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials*. World Business Council

---

<sup>2</sup> Ce Document Référence est en cours de revision (2006)

for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.  
([http://www.wbcscement.org/pdf/tf2/tf2\\_guidelines.pdf](http://www.wbcscement.org/pdf/tf2/tf2_guidelines.pdf))

## **2.1 Considérations générales sur la gestion des déchets (Section III.C (ii))**

La société peut contrôler les déchets d'un certain nombre de manières, selon leur nature physique et chimique, et en fonction du contexte économique, social, et environnemental dans lequel ils sont produits. Certaines sont énumérées ci-dessous. Des décisions spécifiques seront toujours influencées par des circonstances locales, telles que la disponibilité des équipements de traitement des déchets, les marchés alternatifs pour les matériaux, et l'infrastructure disponible pour rassembler, contrôler et transporter les déchets sans risque (CSI 2005). La Section III C (ii) de ces Directives présente une hiérarchie de prises de décision pour la gestion des déchets.

## **2.2 Autres options pour le traitement des déchets**

L'utilisation des fours à ciment pour le traitement des déchets devrait être considérée comme une partie seulement du contexte général des options de gestion des déchets, dans une hiérarchie comme illustré ci-dessus. L'incinération de déchets est également une des options pour l'élimination des déchets, et les directives pour les meilleures techniques disponibles et les meilleures pratiques environnementales devraient être prises en considération quand des fours à ciment sont employés pour cette application.

## **2.3 Directives Techniques de la Convention de Bâle**

Les Directives Techniques développées par la Convention de Bâle doivent être soigneusement considérées, car elles fournissent de précieux conseils sur les meilleures techniques disponibles applicables à la destruction ou à la transformation irréversible des polluants organiques persistants en tant que déchets.

# **3. Les procédés de production de ciment**

Dans cette directive, la description du procédé de production de ciment est limitée aux divers procédés principaux utilisant des fours rotatifs. Il ne faut pas oublier qu'en Chine la plus grande partie du ciment est produite dans des fours verticaux qui ont une efficacité énergétique basse et des performances faibles sur le plan de l'environnement (H. Klee, World Business Council for Sustainable Development, communication personnelle 2004). Par conséquent, les fours verticaux ne devraient pas être retenus comme option pour les meilleures techniques disponibles.

## **3.1 Principe général**

La chimie de base du procédé de fabrication de ciment commence par la décomposition du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ , chaux) à environ  $900^\circ\text{C}$  avec un dégagement gazeux de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ; cette étape s'appelle la calcination. Elle est suivie du procédé de formation de clinker durant lequel l'oxyde de calcium réagit à température élevée (typiquement  $1'400-1'500^\circ\text{C}$ ) avec de la silice, de l'alumine et de l'oxyde



ferreux pour former des silicates, des aluminates et des ferrites de calcium qui composent le clinker Portland. Ce clinker est ensuite broyé avec du gypse et d'autres additifs pour donner du ciment. La Figure 1 identifie les procédés principaux, et les frontières des systèmes pour la fabrication du ciment.

### 3.2 Préparation des matières premières

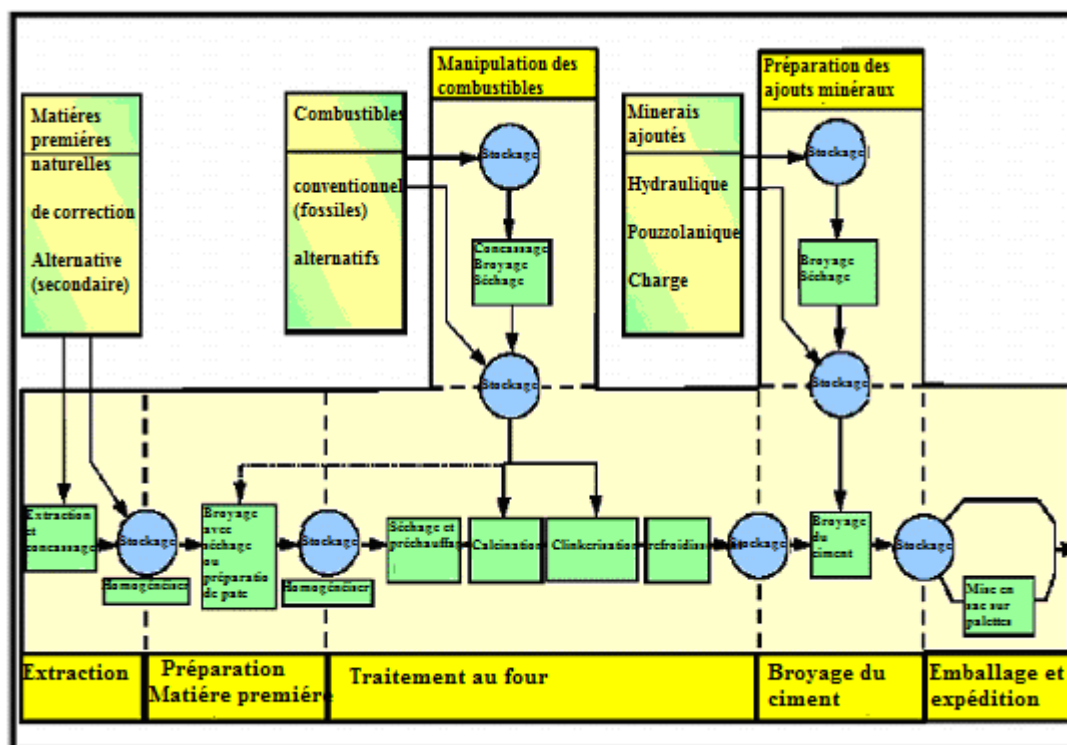
La préparation de la matière première est d'une grande importance pour l'efficacité de fonctionnement du four, tant au niveau de la bonne préparation de la chimie des matières premières que de l'assurance que celles-ci soient suffisamment fines. Il est important d'assurer un bon dosage de chaque composant de la matière première de charge afin de réaliser une composition globale consistante. Ceci est indispensable pour un fonctionnement régulier du four, et pour la fabrication d'un produit de haute qualité.

La préparation du combustible solide (concassage, broyage et séchage) est habituellement effectuée sur le site lui-même.

Les matières premières, dans des proportions contrôlées, sont broyées et mélangées ensemble pour former un mélange homogène avec la composition chimique nécessaire. Pour les procédés secs et semi secs, les constituants de la matière première sont broyés et séchés pour donner une poudre fine, en utilisant surtout les gaz de procédé et/ou l'air produit sortant du refroidisseur. Pour les matières premières ayant une teneur en humidité relativement plus élevée, ainsi que pour les procédures de démarrage, un four auxiliaire peut être nécessaire pour fournir de la chaleur additionnelle.

Le broyage humide est employé seulement en combinaison avec le procédé humide ou semi humide. Les composants des matières premières sont broyés avec de l'eau additionnelle, pour former une boue. Le processus humide est normalement préféré dès que la matière première a une teneur en humidité supérieure à 20% en poids.

Figure 1. Schéma du procédé et frontières des systèmes dans de la production de ciment



(European Commission 2001)

### 3.3 Le procédé de four rotatif

La matière première, appelée farine crue, mélange cru, boue (dans le cas d'un procédé par voie humide) ou alimentation crue, est chauffée dans un four, typiquement un grand four tournant cylindrique en acier qui est incliné (four rotatif). Les fours fonctionnent dans une configuration à contre-courant. Les gaz et les solides circulent dans des directions opposées à travers le four, ce qui fournit un transfert thermique plus efficace. La matière première pénètre par l'extrémité supérieure ou froide du four rotatif, la pente et la rotation l'entraînant vers l'extrémité inférieure ou chaude. Le four est allumé à l'extrémité chaude, habituellement avec du charbon ou du coke de pétrole comme combustible primaire. Pendant que la matière première se déplace le long du four, en étant chauffée, elle subit les réactions de séchage et de cuisson et forme le clinker, qui est composé de morceaux de matière fondue incombustible. Il existe diverses façons d'introduire le combustible (fossile ou autre) dans le four. Ceci est détaillé dans la sous section 4.1 ci-après.

Le clinker quitte l'extrémité chaude du four à une température d'environ 1'000°C. Il tombe dans un refroidisseur, typiquement une grille mobile au travers de laquelle on souffle de l'air de refroidissement.

Divers processus de fabrication du ciment peuvent être suivis pendant l'étape de combustion pour obtenir les transformations physiques et chimiques voulues. Ces processus varient en ce qui concerne la conception d'équipement, le mode de fonctionnement et la consommation de combustible.

### 3.3.1 *Procédé à voie sèche*

Ici, la matière première est broyée et séchée pour donner une farine sous forme de poudre fluide. Cette farine crue alimente ensuite un four de préchauffage ou de pré-calcination ou, plus rarement, un long four voie sèche.

#### 3.3.1.1 *Le procédé sec avec préchauffage*

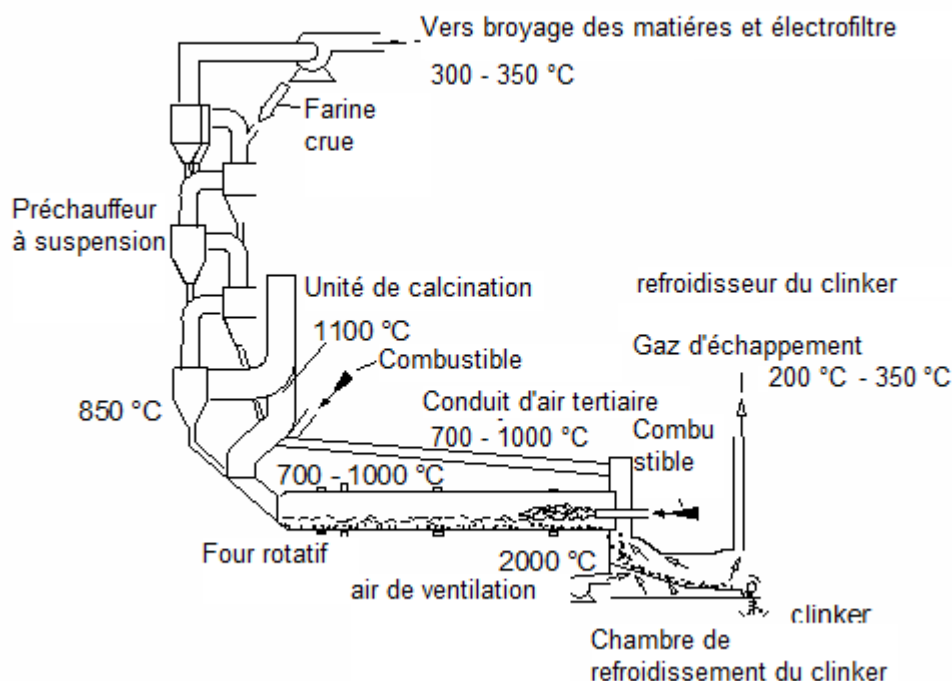
Dans ce procédé, des fours de préchauffage sont utilisés pour augmenter l'efficacité thermique. Un four de préchauffage pour la farine consiste en une tour verticale contenant une série de chambres du type cyclonique. La matière première est introduite par le haut de la tour. Les gaz chauds qui s'échappent du four rencontrent la matière première, qui descend avant qu'elle n'atteigne le four. La matière est séparée des gaz dans les chambres cycloniques, puis déposée au niveau inférieur. Puisque la matière entre dans le four à une température plus élevée que dans le cas des longs fours à voie sèche conventionnels, la longueur du four de préchauffage est plus courte.

Avec des systèmes à préchauffage, il est parfois nécessaire d'enlever les composés indésirables, tels que certains composés alcalins, par un système d'échappement situé entre l'extrémité qui alimente le four rotatif, et la tour de préchauffage. Autrement, ces composés alcalins pourraient s'accumuler dans le four et la couche qui se dépose sur les parois est difficile à enlever, et peut nécessiter l'arrêt du four. Ce problème peut être minimisé en réduisant la proportion des gaz riches en composés alcalins. Si ce système d'échappement des alcalins est équipé de sa propre cheminée d'évacuation, on peut s'attendre à ce que celle-ci rejette les mêmes polluants que les gaz sortant du four.

#### 3.3.1.2 *Le procédé sec à préchauffage/pré-calcination*

Ce procédé est similaire au procédé sec, avec préchauffage, mais dispose d'un système d'allumage auxiliaire pour augmenter la température des matières premières, avant leur introduction dans le four (Figure 2). Une chambre de pré-calcination est ajoutée en bas de la tour du four de préchauffage. Le premier avantage d'utiliser un système de pré-calcination, est d'augmenter la capacité de production du four, car seule la cuisson du clinker y est effectuée. Son utilisation permet également d'allonger la durée de vie des réfractaires du four, grâce à la réduction de la charge calorifique dans la zone de cuisson. Cette configuration peut également nécessiter un système de dérivation pour le contrôle de l'alcali, qui peut dégager les mêmes polluants que les gaz sortant du four, si l'évacuation se fait au moyen d'une cheminée indépendante,

**Figure 2. Four rotatif avec préchauffeur à suspension et unité de calcination**



### 3.3.2. La voie semi sèche

En voie semi sèche, la matière première sèche est agglomérée avec 12-14 % d'eau, et introduite dans un four de préchauffage à grille, ou dans un long four équipé de croix, sur lesquelles les agglomérats sont séchés et partiellement calcinés par les gaz chauds s'échappant du four, avant d'être introduits dans le four rotatif.

### 3.3.3. La voie semi humide

Dans le procédé semi humide, les matières premières (souvent avec un taux d'humidité élevé) sont broyées dans l'eau pour donner une boue pompable, qui est ensuite séchée dans des filtres-presses. Le gâteau de filtration est extrudé en agglomérats, puis est envoyé, soit sur une grille de préchauffage, soit directement dans un sécheur pour la production de farine crue.

### 3.3.4. La voie humide

Dans le procédé humide, les matières premières (souvent avec une forte teneur en humidité) sont broyées dans l'eau pour former une boue pompable. La boue est introduite soit directement dans le four, soit d'abord dans un sécheur. La voie humide est un procédé plus ancien, utilisé dans le cas du broyage humide des matières premières. Elle demande plus d'énergie que la voie sèche à cause de l'évaporation de l'eau de la boue.

## 3.4 Le procédé de broyage du ciment

Le clinker est broyé avec du gypse et d'autres additifs, généralement dans un broyeur à boulets, pour donner le produit final – le ciment. Le ciment est transporté du broyeur à ciment de finissage, aux grands silos de stockage verticaux qui se trouvent dans le département de

stockage ou d'expédition. Le ciment est retiré des silos de stockage par divers dispositifs d'extraction, puis dirigé jusqu'aux points de chargement dans l'usine, ou directement jusqu'aux véhicules de transport.

### **3.5 Contrôle des émissions**

En général, les fours à ciment sont équipés d'électrofiltres ou de filtres en tissu, ou des deux, pour le contrôle des matières particulaires. Dans certains cas, les gaz d'évacuation sont refroidis avant de passer dans le dispositif par voie sèche de contrôle antipollution de l'air. Les dispositifs de contrôle antipollution des gaz acides ne sont pas utilisés dans les fours à ciment puisque les matières premières sont fortement alcalines, et fournissent un bon contrôle pour les gaz acides (Karstensen 2006b), bien qu'il existe quelques fours équipés de systèmes de lavage humides des gaz, si le taux de soufre de la farine est élevé.

Des techniques pour la réduction de  $\text{NO}_x$  sont principalement des méthodes intégrées primaires comme le refroidissement de la flamme de combustion, la conception de brûleur, la combustion par étapes ou la réduction sélective non catalytique, par l'injection d'ammoniac.

## **4. Le brûlage**

### **4.1 Utilisation de combustibles conventionnels**

Les combustibles conventionnels utilisés dans les cimenteries sont des combustibles fossiles tels que le charbon, le lignite, le fioul ou le gaz naturel. Ces combustibles peuvent être employés séparément ou en association ; dans de tels cas, une qualité minimale (en termes de valeur calorifique, de métaux lourds ou de contenu en soufre) doit être assurée. Certains des combustibles fossiles (par exemple, le charbon) sont broyés avant qu'ils ne soient injectés.

Pour assurer une production bien régulière du four, une production de clinker homogène et une combustion complète, il est nécessaire de prendre en compte quelques critères importants pour le traitement des combustibles. L'oxydation des constituants du combustible se produit plus rapidement quand les combustibles sont bien mélangés, et lorsque la surface spécifique est plus grande. Dans le cas de combustibles liquides, l'injection doit se faire aussi régulièrement que possible. Dans le cas des combustibles solides, un mélange complet est nécessaire avec les autres combustibles utilisés en même temps. Ceci n'est pas nécessairement exigé tant que le combustible est homogène et très uniforme.

Une usine de ciment consomme de 3'000 à 6'500 MJ (électricité et transport non inclus) par tonne de clinker produite, selon les matières premières et le procédé utilisé. La plupart des fours à ciment emploient aujourd'hui du charbon et du coke de pétrole, en tant que combustibles primaires, et dans une moindre mesure le gaz naturel et le fioul. Toute en fournissant de l'énergie, certains de ces combustibles brûlent en laissant des cendres contenant des composés à base de silice et d'alumine (et d'autres éléments en traces). Ceux-ci se combinent avec les matières premières dans le four, contribuant à la structure du clinker, et font partie du produit final. L'énergie représente typiquement 30 à 40% du coût de production. Les différents types de combustibles sont, par ordre décroissant d'importance:

- Le charbon pulvérisé et le coke de pétrole (petcoke) ;
- Le fioul (fioul lourd) ;
- Le gaz naturel.

Les moyens possibles d'alimentation pour approvisionner le four en combustible sont:

- Par le brûleur principal à la sortie du four rotatif;
- Par une goulotte d'alimentation à la chambre de transition à l'entrée du four rotatif (dans le cas de morceaux de combustible solide);
- Par les brûleurs secondaires au conduit vertical;
- Par les brûleurs de pré-calcination, vers le four de pré-calcination;
- Par une goulotte d'alimentation vers le four de pré-calcination/préchauffage (dans le cas de morceaux de combustible solide);
- Par une vanne à mi-longueur du four, dans le cas de fours longs, voie sèche et voie humide (dans le cas de morceaux de combustible solide).

Selon des conditions de fonctionnement - explicitement dans le cas de manipulations non conformes de l'installation - des émissions significatives de dibenzo-*p*-dioxines polychlorés (PCDD) et de dibenzofuranes polychlorés (PCDF) peuvent se produire. Dans des conditions correctes, le dégagement de PCDD/PCDF devrait être bien en dessous du seuil de 0,1 ng TEQ/m<sup>3</sup>.

#### **4.2 Le brûlage de déchets ou de déchets dangereux**

La sélection des déchets et des matériaux dépend d'un certain nombre de considérations liées entre elles, notamment :

- Impact sur les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation de combustible;
- Impact sur le coût du combustible;
- Impact sur d'autres émissions telles que NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, particules, polluants organiques persistants, métaux lourds, CO, composés organiques;
- Impact sur les mines et les activités de carrière;
- Stabilité du fonctionnement du four (affectée par des paramètres tels que la valeur calorifique et la teneur en eau);
- Impact sur la qualité du produit (par exemple restriction du pourcentage de chlore dans le ciment : < 0,1%).

Les exigences de la qualité du produit, en particulier une limitation de la teneur en chlore à 0,1%, dans le ciment, limitent les options possibles pour le combustible, et la quantité de chlore à l'entrée doit être suivie.

##### **4.2.1 Exemples de déchets et de combustibles alternatifs**

La substitution des combustibles fossiles par des alternatives est une pratique bien développée dans un certain nombre de pays. Quelques pays utilisent les déchets en tant que carburants alternatifs depuis presque 30 ans, et quelques gouvernements nationaux favorisent activement cette approche, à condition que l'on respecte des conditions rigoureuses en ce qui concerne le contrôle des entrées, du procédé et des émissions dans l'air. Cependant, quelques parties prenantes, et certaines juridictions, ont considéré la pratique dans la même optique que l'incinération. Dans les pays où cette pratique est bien établie, on a évalué les types de matériaux les plus adaptés pour être incinérés dans des fours à ciment (CSI 2005) ; ceux-ci peuvent inclure :

- Les pneus usés;
- Les viandes, farines animales et graisses d'animaux;

- Les plastiques;
- La sciure de bois imprégnée;
- Les déchets de bois, de papier, de cartons, d'emballages;
- Les boues (fibres papetières, boues d'épuration);
- Les déchets agricoles et organiques;
- Le schiste, le schiste pétrolifère ou bitumineux;
- Les boues de charbon;
- Les résidus de distillation;
- Les poussières de charbon ou de coke/anodes/coke chimiques;
- Les huiles usées, les eaux souillées à l'huile;
- Les solvants usagés;

Il est important de contrôler les paramètres des déchets (par exemple : chaleur spécifique, teneurs en eau et en cendres, et teneurs en chlore et en métaux lourds).

#### 4.2.2 *Liste négative de déchets*

La co-incinération ne devrait être appliquée que si, et seulement si, toutes les conditions et exigences préalables touchant à l'environnement, à la santé, aux aspects socio-économiques et à l'opération, sont respectées. Par conséquent, les déchets ne conviennent pas tous pour une utilisation simultanée avec d'autres combustibles. Ce qui suit est une liste de déchets déconseillés pour incinération en cimenteries :

- Déchets nucléaires;
- Déchets électroniques;
- Explosifs;
- Acides minéraux;
- Déchets contenant de l'amiante;
- Déchets à haute teneur en cyanure;
- Déchets médicaux infectieux;
- Armes chimiques ou armes biologiques destinées à la destruction;
- Batteries complètes;
- Ordures municipales non triées et tout autre déchet de composition inconnue.

Les déchets électroniques se composent d'ordinateur et accessoires, consoles, outils de communication, jouets et également les produits blancs tels que les appareils de cuisine ou des appareils médicaux. La composition moyenne indique que les déchets électroniques contiennent, d'une part des substances nocives à la santé et à l'environnement tel que le Cl, Br, P, Cd, Ni, Hg, PCB et les composés bromés ignifuges à haute concentration, souvent au dessus des valeurs seuil, et d'autre part, des teneurs si élevées en métaux rares et précieux que tous les efforts doivent être entrepris pour les recycler. Le co-traitement des parties plastiques des déchets électroniques serait une option intéressante, mais exige un démontage et un tri préalable (d'après Holcim, 2006).

La liste présentée ci-dessus n'est pas une liste exhaustive. Généralement les déchets avec une faible capacité calorifique, et une teneur élevée en métaux lourds, ne sont pas adaptés à un traitement en fours à ciment. Les déchets solides municipaux ne devraient pas être co-incinérés en cimenteries à cause de compositions imprévisibles et de caractéristiques inconnues. En outre, certaines cimenteries peuvent exclure des matériaux additionnels, en

fonction des circonstances locales.

#### **4.2.3 Éléments pour la sélection des déchets**

La sélection des déchets est un processus complexe et est influencé par beaucoup de facteurs, tels que les caractéristiques du four, la nature intrinsèque du déchet, l'impact général sur l'environnement, la qualité désirée de clinker, la probabilité de la formation et du dégagement des produits chimiques inscrits à l'Annexe C de la Convention de Stockholm et d'autres rejets dans l'environnement. L'opérateur doit développer un procédé d'évaluation et d'acceptation des combustibles. Fondée sur ces éléments, une évaluation est effectuée de l'effet du combustible sur les émissions de l'usine, et du besoin potentiel de nouveaux équipements ou de procédures permettant de s'assurer qu'il n'y ait aucun impact négatif sur l'environnement.

Les paramètres qui doivent être considérés lorsque l'on choisit les combustibles et les matières premières sont (CSI 2005) :

##### **4.2.3.1 L'opération du four**

- La teneur en chlore, soufre, et alcalins : ces éléments peuvent se concentrer dans le four menant à une accumulation, à une obstruction et à un procédé instable; un excès de chlore ou d'éléments alcalins peut produire des poussières de four, ou des poussières dans les systèmes dérivés (et peut nécessiter l'installation d'une déviation), qui doivent être extraites, recyclées ou éliminées de manière correcte;
- La teneur en eau: une teneur élevée peut réduire la productivité et l'efficacité du four;
- La valeur calorifique (du combustible): la valeur calorifique est le paramètre principal pour déterminer l'énergie fournie au procédé;
- La teneur en cendres: elle affecte la composition chimique du ciment, et peut nécessiter un ajustement de la composition du mélange des matières premières;
- Des facteurs additionnels sont pertinents, par exemple la capacité de traitement et le volume des gaz perdus;
- La stabilité des opérations (par exemple, des pics de CO), et l'état (liquide, solide), la préparation (déchiquetage, broyage) et l'homogénéité des déchets.

##### **4.2.3.2 Qualité du clinker et du ciment**

- Teneur en phosphate : celle-ci influence le temps de durcissement;
- Teneurs en chlore, soufre, et alcalins : celles-ci affectent la qualité globale du produit;
- Présence de thallium et de chrome, en fonction des poussières des fours et de la qualité du ciment, ainsi que des réactions allergiques possibles pour les utilisateurs sensibles.

##### **4.2.3.3 Émissions atmosphériques polluantes, autres que les substances listées dans l'Annexe C**

- Teneurs élevées en soufre dans les matières premières, et les combustibles et déchets utilisés: Elles peuvent donner lieu à un dégagement de SO<sub>2</sub>;
- Contrôle des gaz produits : Lorsqu'un système de déviation d'éléments alcalins est installé, il faut également un système approprié de contrôle des émissions vers atmosphériques, sur le by-pass de la sortie des gaz, au même titre que sur celui fait sur le flot principal des gaz sortant en cheminée;
- Chlorures dans les matières premières ou combustibles: Ceux-ci peuvent se combiner avec des alcalins présents dans la charge d'alimentation, pour former une matière particulaire fine composée de chlorures de ces alcalins, qui peut être difficile à



contrôler ; dans certains cas les chlorures se combinent avec de l'ammoniaque présent dans la chaux, pour produire de forts dégagements bien visibles, de fines particules composées principalement de chlorure d'ammonium;

- Métaux dans les combustibles ou dans les matières premières : Les matières premières et les combustibles contiendront toujours des métaux à des concentrations variables. Le comportement de ces métaux durant le procédé de combustion dépend de leur volatilité. Les composés métalliques non-volatils restent au sein du procédé, et sortent du four en tant qu'éléments de la composition du clinker. Les composés métalliques semi-volatils passent partiellement dans la phase gazeuse aux températures de frittage pour ensuite se condenser sur les matières premières dans les parties plus froides du four. Ceci mène à un effet cyclique dans le four (cycles internes) qui augmente jusqu'au point où un équilibre est établi et maintenu entre l'entrée et la sortie via le clinker. Les composés métalliques volatils se condensent sur les particules de matières premières à de plus basses températures, et peuvent créer des cycles internes ou externes, à moins qu'ils ne soient émis avec les fumées. Le thallium et le mercure, et leurs composés, sont particulièrement facilement volatilisés, et à un moindre degré aussi le cadmium, le plomb, le sélénium et leurs composés. (European Commission 2001).
- La concentration en métal des poussières du four à ciment dépend des matières de charge, et d'une re-circulation à l'intérieur du four. En particulier, l'utilisation du charbon et des déchets combustibles peut faire augmenter l'entrée des métaux dans le processus. Les dispositifs de dépoussiérage peuvent seulement extraire la fraction des métaux lourds qui est fixée sur des particules. Le taux de rétention en phase gazeuse de métaux volatils, tels que le mercure, est faible. De telles entrées dans le four devraient donc être limitées. Ceci doit être pris en considération dès que des déchets contenant des métaux lourds volatils tels que le mercure, le plomb ou le cadmium seront co-incinérés. Le bois traité avec le cuivre, le chrome, l'arsenic etc. exige également des mesures spéciales en ce qui concerne le système de nettoyage de fumée;
- Le choix des combustibles peut également affecter les émissions des gaz à effet de serre. Par exemple, la substitution des combustibles fossiles par la biomasse a pour conséquence une diminution des émissions nettes de CO<sub>2</sub>;
- Les déchets peuvent influencer les émissions de NO<sub>x</sub>, selon leur composition et leur teneur en eau.

#### 4.2.4 Analyse des matières entrantes

Les opérateurs qui sont responsables des fours doivent développer des critères pour l'acceptation des matières premières contenant des déchets, et doivent effectuer une évaluation continue du procédé tenant compte des points suivants:

- Nom et adresse du transporteur/fournisseur, origine du déchet, quantité, teneur en eau et en cendres, chaleur spécifique, concentration des chlorures, fluorures, soufre et métaux lourds;
- Chaque fournisseur de matériaux doit être obligé de fournir, au début et ensuite périodiquement, des échantillons représentatifs du combustible, qui seront employés à des fins d'analyse du combustible, avant qu'il ne soit livré à l'usine;
- Le fournisseur devra également inclure une fiche de données détaillant les propriétés chimiques et physiques du combustible fourni, et donnant des informations sur la

toxicité, les risques pour l'environnement et pour la santé pendant le transport, la manipulation et son utilisation;

- Les caractéristiques physiques et chimiques de l'échantillon doivent être examinées et vérifiées selon les spécifications.

Un système clair pour la gestion de l'assurance qualité et de contrôle qualité doit être mis en place, y compris en ce qui concerne le prélèvement et l'analyse périodiques des matières réellement fournies à l'usine, et la vérification que le seuil des contaminations respecte les spécifications fixées.

#### **4.2.5 Prétraitement et stockage pour l'utilisation de déchets comme combustible secondaire**

Les conditions de stockage des combustibles secondaires dépendent de leur nature. En général, il faut faire attention aux émissions, et aux exigences techniques et hygiéniques.

Lors du stockage initial, les matériaux à forte contamination (avec un contenu biologique substantiel) et à humidité élevée (jusqu'à 40%) doivent être stockés dans des récipients spécialement conçus, afin de prévenir des risques éventuels hygiéniques. Les farines animales doivent être conditionnées dans des systèmes complètement clos. Elles sont livrées dans des conteneurs qui sont transportés, soit de manière pneumatique, soit avec un équipement mécanique jusqu'au point de stockage. Les combustibles liquides (huiles usagées, solvants et boues d'épuration) sont stockés dans des conteneurs spéciaux, conçus pour résister aux fuites et aux risques d'explosion. Des directives spéciales de sécurité doivent être élaborées et appliquées (tenant compte, par exemple, des risques d'explosion).

Le stockage intermédiaire au centre de conditionnement vise à vérifier la qualité des combustibles dérivés de déchets, après l'étape de préparation. Ici, on utilise normalement des conteneurs.

Le stockage initial, et la préparation des différents types de déchets utilisés comme combustibles, sont habituellement réalisés hors de la cimenterie, par le fournisseur ou par des organismes spécialisés dans le traitement des déchets. De telles solutions centralisées peuvent être à l'avantage de l'opérateur, dont le rôle premier est la production de clinker pour la fabrication de ciment. Cependant, la diligence exige que de tels combustibles soient soumis aux mesures d'assurance qualité par le service de réception. Cela signifie qu'il est seulement nécessaire que les fractions séparées et prétraitées soient stockées à la cimenterie, pour être ensuite dosées avant introduction dans le four. Puisque les stocks de déchets utilisables comme combustibles ont tendance à être variables, tandis que les marchés des déchets se développent rapidement, il serait judicieux de concevoir des lieux de stockage et de préparation polyvalents (Karstensen 2006b). Des mesures ont récemment été proposées (2003), dans l'Union Européenne, afin de normaliser les combustibles solides dérivés de déchets non dangereux.

Le fait de faire des mélanges de déchets dans le but de répondre à certaines spécifications, mais ayant comme conséquence la dissimulation des incidences possibles sur l'environnement par une dilution des concentrations, ne peut pas être considéré comme une pratique acceptable.

#### **4.2.6 Efficacité de destruction**

Le co-traitement des déchets dangereux peut seulement être fait si certaines conditions sont respectées, concernant le contrôle à entrée, le contrôle du cycle de combustion et le contrôle

des émissions. Un des paramètres essentiels du procédé est la teneur en oxygène des gaz produits. La destruction des déchets organiques nécessite non seulement de hautes températures et de longs temps de résidence, mais aussi un apport d'oxygène en quantité suffisante, une introduction correcte des composés organiques à détruire, et un mélange efficace des matériaux et de l'oxygène. Une bonne conception et un bon contrôle sont critiques pour l'utilisation des fours à ciment pour cette application.

Beaucoup de fours à ciment utilisent les déchets de manière commerciale (c.-à-d., ils acceptent les déchets venant de l'extérieur), dans la plupart des cas comme combustible de remplacement dans la production de clinker de ciment de Portland. Les déchets liquides sont typiquement injectés dans la partie chaude du four. Les déchets solides peuvent être introduits au niveau de la zone de calcination dans certaines installations. Pour les fours longs, cela signifie que le déchet solide est introduit à mi-longueur, et pour les fours de préchauffage/pré-calcination, l'introduction se fait au niveau d'une grille d'alimentation dans la partie du four à température élevée.

Dans le cas de déchets dangereux, on doit s'assurer de la décomposition complète des composés toxiques tels que les substances organiques halogénées. Les déchets introduits par le brûleur principal seront décomposés dans la zone de cuisson primaire à des températures supérieures à 1'800° C. Les déchets introduits dans un brûleur secondaire, ou dans unité de préchauffage ou de pré-calcination, seront brûlés à des températures plus faibles, mais la zone de cuisson du four de pré-calcination est prévue pour fonctionner à des températures supérieures à 1'000° C.

Les composés volatils présents dans des matières qui sont introduites par l'extrémité supérieure du four, ou en tant que combustibles en morceaux, peuvent s'évaporer et être modifiés par pyrolyse, sans avoir été brûlés, puisque le fonctionnement du four est à contre-courant. Les déchets injectés à mi-longueur ou par la zone d'alimentation du four, ne subissent pas les mêmes températures très élevées que subissent les déchets liquides introduits dans la partie chaude du four. Dans certains cas, des composés organiques volatils peuvent être libérés de la charge si rapidement qu'ils ne peuvent pas se mélanger à l'oxygène, et prennent feu avant de se refroidir en dessous d'une température critique, en formant des produits issus d'une combustion incomplète. Des capteurs de CO, installés pour contrôler le procédé, peuvent détecter la combustion incomplète et ainsi permettre des mesures correctives.

Les déchets dangereux utilisés comme combustibles dans l'industrie du ciment sont principalement constitués de matériaux organiques, mais peuvent également contenir des traces de composés métalliques. Pour déterminer si un four à ciment peut brûler efficacement les déchets dangereux, il faut déterminer ce que deviennent les constituants organiques.

Des tests d'analyse des émissions des fours à ciment, en vue de détecter la présence de produits chimiques organiques pendant la combustion des matériaux dangereux, ont été entrepris depuis les années '70, quand la pratique de brûler des déchets dans les fours à ciment a été envisagée pour la première fois. Les niveaux de destruction de produits chimiques tels que le chlorure de méthylène, le tétrachlorure de carbone, le trichlorobenzène, le trichloroéthane et les polychlorobiphényles (PCB) se situaient typiquement à 99,995% et plus (Karstensen 2006b).

L'utilisation potentielle de fours à ciment pour incinérer les PCB a été étudiée dans beaucoup

de pays. Le taux de destruction et d'élimination déterminé à partir de plusieurs essais de combustion indique que les fours à ciment, bien conçus et fonctionnant correctement, sont efficaces pour détruire les PCB. Une efficacité de destruction et d'élimination de 99,9999% est exigée par plusieurs juridictions pour l'incinération de ces composés (par exemple l'United States Toxics Substances Control Act, le Canadian Federal Mobile PCB Treatment and Destruction Regulations), paramètre qui pourrait être utilisé comme standard pour évaluer une meilleure technique.

## 5. Produits entrant et sortant du procédé

### 5.1 Sorties générales

Les principales questions concernant l'environnement, et associées à la production de ciment, sont les émissions dans l'air, l'utilisation énergétique, ainsi que la pollution des nappes phréatiques due à la manipulation et le stockage des poussières des fours à ciment. Les rejets d'eaux usées se limitent en général seulement aux ruissellements de surface et à l'eau de refroidissement, et ne contribue pas de manière substantielle à la pollution de l'eau.

Les sorties principales des procédés de production de ciment sont:

- Le produit: le clinker, qui est broyé pour produire le ciment;
- Les gaz sortant du four : leurs volumes sont compris dans la fourchette de 1'700 à 2'500 m<sup>3</sup>/Mg de clinker (mètres cube par tonne, conditions de référence, gaz sec, 101,3 kPa, et 273 K) pour tous les types de fours. Les systèmes de préchauffage à suspension ou de pré-calcination ont normalement des volumes de gaz sortant du four d'environ 2'000 m<sup>3</sup>/Mg de clinker (gaz sec, 101,3 kPa, 273 K);
- La poussière des fours à ciment (récupérée dans l'équipement d'extraction des poussières) : Aux Etats-Unis, environ 64% de la poussière de four à ciment est réutilisée dans le four ; la poussière restante, qui est produite à un taux d'environ 40 kg/tonne de clinker, est principalement enterrée dans des décharges (WISE 2002; EPA 2000). Holcim, l'un des plus importants fabricants de ciment au monde, a vendu ou mis en décharge 29 kg de poussière de four à ciment par tonne de clinker en 2001 (site web de Holcim);
- Le recyclage direct dans le four de la poussière, aboutit généralement à une augmentation graduelle en teneur alcaline de la poussière produite, ce qui peut endommager les revêtements du four à ciment, réduire la production de ciment, et augmenter à la fois les émissions de particules (EPA 1998b), et les émissions dues à sa manipulation et à son élimination (EPA 1998a). En Europe, la poussière de four à ciment est normalement ajoutée directement au ciment produit (Lohse and Wulf-Schnabel 1996). L'accumulation des alcalins dans le système de four peut être évitée par l'utilisation à contre courant de la poussière, ou en employant un système de déviation des alcalins. Pour les fours à préchauffage et à pré-calcination, ceci est parfois accompli par des systèmes de déviation des alcalins à la tête de préchauffage, ce qui élimine les composés alcalins du système;
- Les gaz sortant de la dérivation alcaline : Dans les installations équipées de dérivation alcaline, les gaz alcalins dérivés sont rejetés dans certains cas par une conduite d'évacuation secondaire et, dans d'autres cas, par la cheminée principale. Selon

l'Agence de Protection Environnementale EPA des Etats-Unis, les polluants présents dans ce flux gazeux sont les mêmes que ceux contenus dans les gaz sortant du four principal, si bien que le même équipement de surveillance et de lutte contre la pollution est exigé (EPA 1999). Un taux de dérivation alcaline de plus de 10% est en général exigé, pour l'élimination alcaline (Sutou, Harada and Ueno 2001). Cependant, un taux de dérivation de 30% a aussi été signalé (Holsiepe, Shenk and Keefe 2001);

## 5.2 Utilisation de l'énergie

L'industrie cimentière est une industrie qui est une grande consommatrice d'énergie où l'énergie représente typiquement 30-40% des frais d'exploitation (c.-à-d., frais financiers exclus). Une usine de ciment consomme de 3'000 à 6'500 MJ de combustible par tonne de clinker produite. Cette gamme étendue de demande énergétique couvre toutes sortes de fours à ciment.

L'utilisation théorique d'énergie lors de la combustion (impliquant des réactions chimiques) est d'environ 1'700 à 1'800 MJ par tonne de clinker. L'énergie de combustion réellement utilisée pour différents systèmes de fours est dans les gammes suivantes (MJ par tonne de clinker)<sup>3</sup>:

- 3'000-3,800 procédé à voie sèche, préchauffeur à chambres cycloniques avec étages multiples, plus fours de pré-calcination;
- 3'100-4'200 pour les fours rotatifs à voie sèche équipés de préchauffeurs à chambres cycloniques;
- 3'300-4'500 pour les procédés à voie semi sèche et semi humide (four type Lepol);
- Jusqu'à 5'000 pour les fours longs à voie sèche;
- 5'000-6'000 pour les fours longs à voie humide;
- 3'100 jusqu'à > 6'500 pour les fours verticaux et pour les ciments spéciaux.

La demande électrique est d'environ 90-130 kWh par tonne de ciment (European Commission 2001).

Afin d'optimiser l'entrée en énergie dans les systèmes de fours existants, il est possible de changer la configuration du four en un four court à voie sèche, avec préchauffage et précalcination à étages multiples. Cela est généralement seulement faisable dans le cadre d'une modification importante, correspondant à une augmentation de la production.

L'énergie électrique utilisée peut être minimisée grâce à l'installation de systèmes de gestion d'énergie et l'installation d'équipements efficaces en énergie, tels que des rouleaux de broyage à haute pression pour le concassage du clinker, et des commandes de vitesse variable pour les ventilateurs.

L'efficacité énergétique sera généralement diminuée par la mise en place de la plupart des types de réduction de pollution en fin de ligne, car leur opération demande habituellement un surcroît d'énergie. Certaines techniques de réduction décrites ci-dessous auront un effet positif sur les dépenses d'énergie, par exemple l'optimisation du contrôle du procédé.

---

<sup>3</sup> Contribution de CEMBUREAU Cement & Lime BREF Revision Energy Efficiency; 15 May 2006

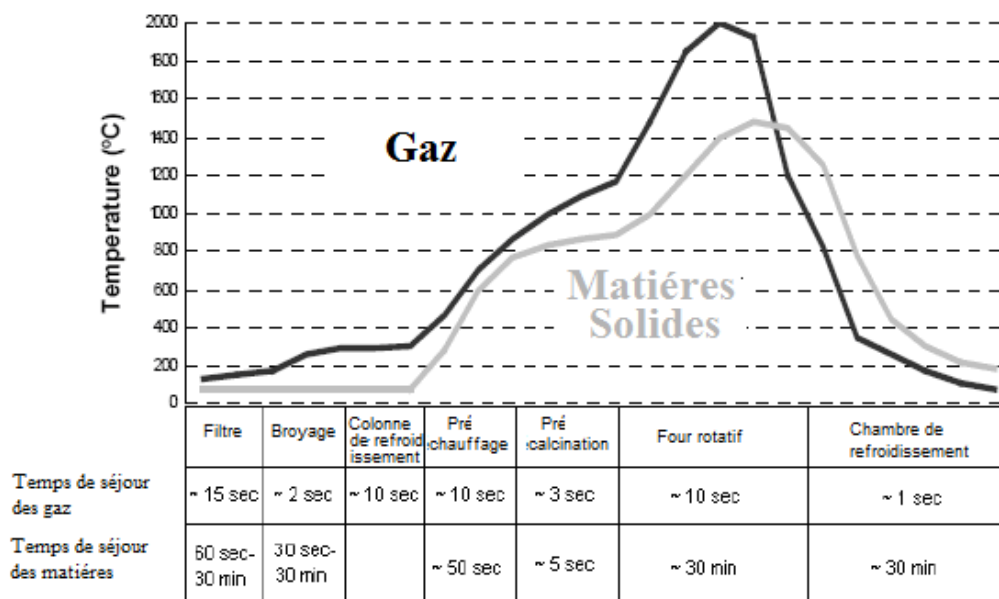
Des estimations actuelles suggèrent que l'industrie du ciment peut augmenter son efficacité énergétique de 0,5 à 2% par an, en remplaçant les équipements vieux ou périmés. Si de nouvelles usines utilisant la voie sèche remplaçaient des unités à voie humide plus anciennes, des gains significatifs d'efficacité énergétique seraient possibles (CSI 2005).

### 5.3 Emissions de PCDD/PCDF

#### 5.3.1 Formation des PCDD/PCDF

Tout apport de chlore, en présence de matériaux organiques, peut potentiellement mener à la formation de dibenzo-*p*-dioxines polychlorés (PCDD) et de dibenzofuranes polychlorés (PCDF) lors des procédés thermiques (combustion). Les PCDD/PCDF peuvent être formés dans, ou après, le four de préchauffage et dans le dispositif de contrôle de la pollution de l'air si les précurseurs de chlore ou d'hydrocarbures dans les matières premières sont disponibles en quantités suffisantes dans une gamme de température s'échelonnant de 200° C à 450° C. Le graphe de l'évolution de la température en fonction des temps typiques de séjour dans un four de fabrication de clinker avec préchauffage et pré-calcination cycloniques est présenté à la Figure 3 (Fabrellas *et al.* 2004).

**Figure 3. Profil de température et temps de résidence typique dans un four de fabrication de clinker avec préchauffage et pré-calcination cycloniques**



Source : Fabrellas *et al.* 2004.

#### 5.3.2 Etudes sur les émissions de PCDD/PCDF dans l'air

Un aperçu complet des émissions de PCDD/PCDF des fours à ciment, dans les pays développés et en voie de développement, est donné dans : Karstensen 2006. Les données rassemblent plus de 2'200 mesures faites dans divers fours, avec et sans l'utilisation d'un large éventail de matières premières, couvrant la période du début des années '90 jusqu'à aujourd'hui. Le Tableau 1 récapitule les résultats des mesures de PCDD/PCDF; quelques exemples sont décrits en plus de détails ci-dessous.

**Tableau 1. Résumé des mesures de PCDD/PCDF**

<b>Pays ou société</b>	<b>Substitution de combustibles et de matières premières?</b>	<b>Concentration de PCDD/PCDF<sup>a</sup>, en ng I-TEQ/m<sup>3</sup></b>	<b>Nombre de mesures</b>	<b>Facteur d'émission µg I-TEQ/tonne de ciment<sup>a</sup></b>
Australie	Oui	0,001–0,07	55	0,0032–0,216
Belgique	Oui	< 0,1	23	
Canada	Oui	0,0054–0,057	30	
Chili	Oui	0,0030–0,0194	5	
Colombie	Oui	0,00023–0,0031	3	
Danemark	Oui	< 0,0006–0027	?	
Egypte	Oui	< 0,001	3	
Europe	Oui	< 0,001–0,163	230	< 0,001–5
Allemagne 1989–1996	Oui	0,02	> 150	
Allemagne 2001	Oui	< 0,065	106	
Holcim 2001	Oui	0,0001–0,2395	71	0,104 (clinker)
Holcim 2002	Oui	0,0001–0,292	82	0,073 (clinker)
Holcim 2003	Oui	0,0003–0,169	91	0,058 (clinker)
Heidelberg	Oui	0,0003–0,44	> 170	
Japon	Oui	0–0,126	164	
Lafarge	Oui	0,003–0,231	64	
Mexico	Oui	0,0005–0,024	3	
Norvège	Oui	0,02–0,13	> 20	0,04–0,40
Philippines	Oui	0,0059–0,013	5	
Pologne	Oui	0,009–0,0819	7	
Portugal		0,0006–0,0009	4	
RMC	Oui	0,0014–0,0688	13	
Siam Cement Co.	Oui	0,0006–0,022	4	
Afrique du Sud	(Oui)	0,00053–0,001	2	
Espagne	Oui	0,00695	89	0,014464
Spain Cemex	Oui	0,0013–0,016	5	
Spain Cimpor	Oui	0,00039–0,039	8	
Taiheiyo	Oui	0,011	67	
Thaïlande	Oui	0,0001–0,018	12	0,00024–0,0045
Royaume-Uni	Oui	0,012–0,423	14	< 0,025–1,2
Uniland		0,002–0,006	2	0,005–0,011
USA <sup>b</sup>	Oui	0,004– ~ 50	~ 750	< 0,216–16,7
Venezuela	Oui	0,0001–0,007	5	
Vietnam		0,0095–0,014	3	

a. Les chiffres sont donnés soit comme une fourchette, soit comme valeur moyenne, et se réfèrent à 10 ou 11% d'O<sub>2</sub>, selon les réglementations nationales.

b. Les chiffres élevés des Etats-Unis se réfèrent aux mesures obtenues dans les années '90 ; le nombre de mesures est approximatif.

Source: Karstensen 2006b.

Dans une récente étude menée par Cembureau, des mesures d'émission de PCDD et PCDF sur 110 fours à ciment dans 10 pays ont été présentées. Les pays couverts par cette étude étaient la République Tchèque, le Danemark, la France, l'Allemagne, la Hongrie, l'Italie, les Pays Bas, la Norvège, l'Espagne et le Royaume-Uni. La concentration moyenne, tenant compte de toutes les données, était de 0,016 ng I-TEQ/m<sup>3</sup>. La fourchette entre les concentrations les plus basses et les plus élevées allait de < 0,001 ng ITEQ/ m<sup>3</sup> à 0,163 ng I-TEQ/m<sup>3</sup> (Karstensen 2006b). Toutes les mesures ont été exprimées dans les conditions standards (gaz sec, 273 K, 101,3 kPa et 10% d'O<sub>2</sub>).

La Holcim Cement Company exploite des fours à ciment dans le monde entier. Un rapport récent de Holcim donne pour 2001 et 2002 des valeurs moyennes en PCDD/PCDF, de 0,041 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (71 fours) et de 0,030 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (82 fours) respectivement. 120 de ces mesures proviennent de pays faisant partie de l'OCDE, avec une valeur moyenne de 0,0307 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>; les valeurs minimales et maximales étaient respectivement de 0,0001 et de 0,292 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>, avec neuf grands fours voie humide ayant des valeurs au-dessus de 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>. La valeur moyenne des 29 mesures effectuées dans des pays hors OCDE était de 0,0146 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>; les valeurs minimales et maximales étaient respectivement de 0,0002 et de 0,074 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>, aucune mesure n'étant au-dessus de 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> (Karstensen 2006b). Le Tableau 1 résume les résultats des mesures de PCDD/PCDF rapportées.

L'expérience montre qu'avec des températures relativement élevées dans l'électrofiltre et l'utilisation de matières premières riches en éléments organiques, des émissions élevées de produits chimiques inscrits à l'Annexe C étaient possibles.

En 2004, les émissions de PCDD/PCDF dans un four long à voie sèche au Royaume-Uni, ont atteint des pics à 136 ng TEQ/m<sup>3</sup> et accusaient une moyenne de plus 50 ng TEQ/m<sup>3</sup> sur une année, avec des émissions totale de plus de 40 g TEQ. Le four, maintenant fermé, fonctionnait avec des températures relativement élevées au niveau de l'électrofiltre, et utilisait des matières première avec une forte teneur en matière organique, en même temps que des cendres volantes pulvérisées<sup>4</sup>.

Les données recueillies auprès de plusieurs fours aux Etats-Unis montrent des émissions de PCDD/PCDF aussi élevées que 1,76 ng TEQ/m<sup>3</sup>, lorsque les dispositifs de contrôle de la pollution de l'air fonctionnent à 200°–230°C<sup>5</sup>. Les essais aux Etats-Unis indiquaient également des émissions plus importantes pour certains fours lorsque des déchets dangereux étaient brûlés.

Dans des études faites aux Etats-Unis et en Allemagne, une corrélation positive a été observée entre la concentration des émissions des PCDD et la température de l'électrofiltre/cheminée. Dans les essais aux Etats-Unis sur une seule installation, la température enregistrée dans l'électrofiltre était comprise entre 255°C et 400°C. Les émissions de PCDD étaient les plus élevées à 400°C, et diminuaient cinquante fois à 255°C. Cette corrélation a en général été observée dans toutes les installations testées. A des

---

<sup>4</sup> Communiqué par IPEN

<sup>5</sup> 1 ng (nanogramme) = 1 × 10<sup>-12</sup> kilogramme (1 × 10<sup>-9</sup> gramme); Nm<sup>3</sup> = mètre cube normal, volume de gaz sec mesuré à 0° C et 101.3 kPa. Pour des informations sur les mesures de toxicité voir section I.C, sous section 3 du présent document.



températures inférieures à 250°C, à l'entrée de l'électrofiltre/cheminée, il n'y avait pas de corrélation entre la température et les émissions de PCDD. Cela est conforme aux mécanismes connus de formation des PCDD à l'intérieur des systèmes d'incinération des déchets municipaux (Karstensen 2006b).

Des investigations plus détaillées ont suggéré – dans le cas d'une bonne combustion – que le principal facteur déterminant les concentrations de substances inscrites à l'Annexe C dans les gaz de cheminée, est la température de fonctionnement du dispositif de récupération de la poussière dans le système d'épuration des gaz. Les usines équipées d'électrofiltres fonctionnant à basse température (200° C ou moins) semblent présenter des niveaux d'émission faibles, qu'elles utilisent ou non des déchets comme combustibles (UNEP 2003).

Les conséquences possibles de l'injection de différents déchets au niveau du préchauffage/pré-calcination à basse température ont été étudiées par Lafarge, et les résultats sont présentés dans le Tableau 2. Les déchets injectés à mi-chemin ou à la fin de l'alimentation ne subissent pas de températures aussi élevées, ni des temps de séjour aussi longs, que des déchets introduits à l'extrémité chaude. Le niveau observé des concentrations en PCDD/PCDF était faible dans tous les cas de mesures (Karstensen 2006b).

**Tableau 2. Injection de déchets au niveau du préchauffage/pré-calcination et influence sur les émissions de PCDD/PCDF**

Usine	Année	Type de combustible alternatif	Emissions de PCDD/PCDF en ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup>
1	2002	Farines animales, plastiques et textiles	0,0025
2	2002	Farines animales et sciures imprégnées	0,0033
3	2002	Charbon, plastiques et pneus	0,0021 & 0,0041
4	2002	Pneus	0,002 & 0,006
5	2002	Petcoke (coke de pétrole), plastiques et huiles usagées	0,001
6	2002	Petcoke, coques de tournesol et huiles usagées	0,012
7	2002	Copeaux de pneus	0,004 & 0,021
8	2002	Solvants	0,07
9	2002	Sciures imprégnées, et solvants	0,00003 & 0,00145
10	2002	Solvants	0,00029 & 0,00057
11	2002	Boues	< 0,011
12	2002	Déchets automobiles et boues	0,0036 & 0,7 & 0,0032

Les données rapportées indiquent que les fours à ciment peuvent respecter un niveau d'émission de 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>, qui est la valeur limite de la législation, dans plusieurs pays d'Europe occidentale pour les usines d'incinération de déchets dangereux.

### 5.3.3 Etude des rejets de PCDD/PCDF par les matières solides

Puisque les données pour les émissions par les cheminées montrent que les fours à ciment bien conçus et bien utilisés peuvent atteindre des concentrations très faibles de PCDD/PCDF, on peut également penser que de telles installations auront des niveaux faibles dans les poussières récupérées des systèmes de lavage des gaz. Les mêmes facteurs qui contribuent à

de faibles niveaux d'émissions polluantes dans l'atmosphère, laissent penser que l'on trouvera de faibles concentrations dans les matières solides collectées. Les deux matières solides principales, produites dans les cimenteries, sont le clinker récupéré au niveau du refroidisseur, et les poussières extraites dans le dispositif de contrôle de pollution atmosphérique.

De nouvelles analyses sur les matières solides ont été recueillies auprès de plusieurs sociétés participant à la Cement Sustainability Initiative (CSI) (Karstensen 2006b). Le CSI a présenté des résultats sur les concentrations en PCDD/PCDF trouvées dans des poussières de clinker en 2005, dans huit usines. Quatre-vingt-dix échantillons ont montré une valeur moyenne de 6,7 ng I-TEQ/kg, apparemment fortement pondérée par quelques échantillons à niveau élevé. La concentration la plus élevée rapportée était de 96 ng I-TEQ/kg.

Huit sociétés de la CSI ont présenté des résultats sur les concentrations en PCDD/PCDF mesurées sur 57 échantillons de clinker en 2005. La valeur moyenne de tous les échantillons était de 1,24 ng I-TEQ/kg. Les échantillons de clinker provenaient de fours à préchauffage en suspension, à voie sèche et à voie humide. La concentration la plus élevée trouvée était de 13 ng I-TEQ/kg.

Deux sociétés de la CSI ont fait état en 2005 de concentrations de PCDD/PCDF dans 11 échantillons de matière alimentant des fours, composés de farines animales, de granules, de boue et de composants des matières premières. La valeur moyenne de ces échantillons était de 1,4 ng I-TEQ/kg. Ces échantillons provenaient de fours à préchauffage en suspension, à voie sèche et à voie humide. La concentration la plus élevée rapportée était de 7,1 ng I-TEQ/kg.

#### **5.4 Rejets de PCB et de HCB**

L'hexachlorobenzène (HCB) et les PCB n'ont pas fait l'objet de contrôle réglementaire dans les usines de ciment jusqu'ici. La plupart des mesures qui ont été faites n'ont pas détecté d'émissions de HCB. En ce qui concerne les émissions PCB, 40 mesures effectuées dans 13 fours en Allemagne en 2001 ont indiqué une concentration maximale de 0,4 µg de PCB/Nm<sup>3</sup>; dans neuf de ces 40 mesures, aucun PCB n'a été détecté.

La co-incinération de pesticides au Vietnam a montré des émissions de PCB apparentés aux dioxines de 0,001 ng TEQ/m<sup>3</sup> et des émissions de HCB en dessous de la limite de détection de 31 ng/m<sup>3</sup> (Karstensen 2006b).

### **6. Meilleures techniques disponibles et meilleures pratiques environnementales**

Les paragraphes suivants résument les meilleures techniques disponibles et les meilleures pratiques environnementales pour les fours à ciment brûlant les déchets dangereux.

#### **6.1 Mesures générales de gestion**

##### **6.1.1 Aspects législatifs**

Un cadre législatif et réglementaire doit être mis en place pour assurer l'application, et pour garantir un niveau élevé de protection de l'environnement.

En outre, un régime de gestion des déchets qui souligne la hiérarchie de cette gestion, illustrée dans la Section III C (ii) sur la gestion de déchets, devrait être établi avant, ou en même temps que la désignation formelle des fours à ciment en tant que destinataires autorisés des déchets dangereux, que ce soit sous forme de combustibles dérivés de déchets ou de déchets à éliminer. Toutes les autorités compétentes doivent être impliquées dans la procédure d'autorisation, et à ce titre, entre autres actions, l'exploitant du four à ciment devra:

- Établir et maintenir une crédibilité à travers une communication ouverte, précise, coopérative et continue avec les autorités et le public;
- Fournir toutes les informations nécessaires pour s'assurer que les autorités peuvent évaluer la sécurité et les conséquences sur l'environnement du traitement des déchets dangereux;
- Établir des groupes publics consultatifs, dès le début du processus de planification;
- Les directives de Holcim et de la CSI représentent de bons conseils au sujet des meilleures pratiques environnementales dans le cadre de cette section.

#### **6.1.2 Aspect environnementaux**

L'incinération simultanée de divers déchets dangereux devrait seulement être entreprise si le four à ciment fonctionne selon les meilleures techniques disponibles décrites dans ces directives. Si certaines dispositions de qualité au niveau des déchets et de l'alimentation sont respectées, le co-traitement des déchets n'aura pas d'influence significative sur les émissions du four à ciment. Cependant, quelques combustibles peuvent contenir des métaux très volatils, tels que le mercure, qui a un faible coefficient de capture. Pour contrôler les émissions de mercure, il peut donc être nécessaire de limiter les entrées de mercure dans le four. Les combustibles alternatifs doivent respecter une procédure rigoureuse d'acceptation et d'inspection, avant leur utilisation.

La surveillance des combustibles de rechange est obligatoire afin de démontrer la conformité aux lois, aux règlements et aux accords en vigueur.

#### **6.1.3 Aspects opérationnels**

Les opérateurs doivent s'assurer que seuls les déchets dangereux provenant de Parties dignes de confiance seront acceptés, en tenant compte de l'intégrité de tous les participants de la chaîne d'approvisionnement. La traçabilité des déchets doit être assurée par le service de réception, et les livraisons non-conformes doivent être refusées.

Le transport, la manipulation et le stockage des matériaux doivent être surveillés efficacement, et la totale conformité aux exigences réglementaires doit être assurée. Ce travail inclut l'analyse et la présentation de rapports pour des paramètres tels que la valeur calorifique, la teneur en eau, la teneur en métaux lourds, la teneur en cendres et les quantités de soufre et de chlore présentes. De plus, des échantillons témoins devraient être stockés pendant une période déterminée.

#### **6.1.4 Aspect de santé publique et de sécurité**

La convenance du site de production doit être évaluée pour éviter les risques liés à son emplacement (proximité d'habitations de personnes, impact potentiel des rejets, logistique, et transport), et à l'infrastructure (dégagements potentiels de vapeurs et d'odeurs, ou possibilités de fuites qui pourraient dégager des émissions dangereuses ou d'autres substances problématiques pour l'environnement, exigeant un contrôle en appliquant des solutions techniques).

Il est obligatoire de mettre en place : une documentation et une information adéquates sur la manipulation sans risque des combustibles dérivés de déchets, les procédures opératoires, et les mesures à prendre dans l'éventualité d'accidents. Le personnel de gestion de l'installation doit assurer que les équipes de travail reçoivent une information franche et transparente, sur les mesures et normes concernant la santé et la sécurité. Il est essentiel que les employés, les autorités de surveillance et les services d'intervention (par exemple départements du feu) reçoivent ces informations bien avant que la combustion de déchets, y compris les déchets dangereux, débute dans un four à ciment.

#### **6.1.5 Questions de communication et de responsabilité sociale**

Dans l'intérêt de la franchise et de la transparence, l'opérateur de la cimenterie qui a l'intention de manipuler et de co-incinérer des déchets, y compris des combustibles dangereux ou dérivés de déchet, doit fournir toutes les informations nécessaires pour permettre aux parties prenantes de comprendre le but de l'utilisation des déchets dangereux dans le four à ciment, et pour les mettre au courant des points suivants : les moyens mis en œuvre pour éviter des impacts défavorables pour le public et pour l'environnement, les tâches incombant aux parties impliquées, et les procédures de prise de décision. En résumé, les aspects suivants de gestion générale devraient être pris en considération :

- Infrastructure générale, revêtement du sol, ventilation;
- Bonne tenue du site et des installations ;
- Contrôle général et suivi des paramètres de performance de base;
- Contrôle et réduction des émissions dans l'air (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, particules, métaux);
- Développement du suivi environnemental (création de protocoles de suivi standards);
- Développement de systèmes d'audit et de transmission de l'information;
- Mise en œuvre de systèmes d'agrémentation et d'audit, pour l'utilisation des déchets et de combustibles de rechange;
- Démonstration, par le suivi des émissions, qu'une installation peut atteindre une valeur limite d'émission donnée;
- Dispositions pour l'hygiène et la sécurité du travail: Les cimenteries qui utilisent comme combustible des déchets et des combustibles alternatifs, doivent adopter des procédures appropriées pour protéger le personnel manipulant ces matériaux pendant l'étape de chargement;
- Qualification et formation suffisantes du personnel.

## **6.2 Mesures spécifiques**

Pour de nouvelles installations, et des améliorations majeures à des unités existantes, on considère que les meilleures techniques disponibles pour la production de clinker sont représentées par un four à voie sèche, avec préchauffage et pré-calcination à étages multiples. Pour les installations existantes, une reconstruction partielle (et peut-être considérable) sera nécessaire.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Le procédé par voie sèche est approprié uniquement dans le cas où l'on utilise le calcaire comme matière première pour le four. Il est possible d'utiliser une technologie de préchauffage/pré-calcination pour traiter le calcaire, en séchant la pâte de calcaire dans un séchoir-éclair situé à l'entrée du procédé.

## **6.2.1 Mesures primaires et optimisation du procédé**

### **6.2.1.1 Optimisation du procédé**

- S'assurer du refroidissement rapide à moins de 200°C des gaz sortant du four;
- Caractériser les paramètres qui correspondent à un bon fonctionnement, et les utiliser comme base pour améliorer d'autres paramètres opératoires de performance. Ayant caractérisé de bons paramètres opératoires, établir des données de référence en ajoutant des doses contrôlées de déchets, et évaluer quels sont les changements et les contrôles et procédures nécessaires pour contrôler les émissions;
- Gérer le procédé de fabrication pour obtenir et maintenir un mode opératoire stable, par exemple en optimisant le contrôle du procédé (y compris la mise en place de systèmes de contrôle automatisé par ordinateur) et par l'utilisation de systèmes de chargement modernes et gravimétriques pour les combustibles solides;
- Minimiser dans la mesure du possible, les dépenses en énergie au moyen de systèmes de préchauffage et de pré-calcination, en tenant compte de la configuration du four actuelle; utiliser des refroidisseurs de clinker modernes, permettant de récupérer le maximum de chaleur des gaz émis;

Le contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C : Les mesures indirectes pour le contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C constituent un élément important de contrôle intégré des émissions. De telles mesures sont en général applicables, et assez facile à mettre en œuvre techniquement.

### **6.2.1.2 Préparation des déchets dangereux**

Le prétraitement des déchets, y compris des déchets dangereux, avec l'objectif de fournir une charge plus homogène et donc des conditions plus stables de combustion peut ainsi, selon la nature du combustible dérivé des déchets, impliquer le séchage, le déchiquetage, le mélange ou le broyage (voir également la section 3.4). Il est important de porter une attention particulière :

- Au bon entretien, à la bonne tenue et à de bonnes procédures adaptés à la réception, à la manipulation et au stockage des déchets, au fur et à mesure qu'ils arrivent sur le site, ainsi que des équipements appropriés spécifiques pour le stockage provisoire, tenant compte des risques et des caractéristiques de chaque déchet;
- Bon entretien, bonne tenue et bonnes procédures opératoires ; aussi, utilisation d'équipements de stockage bien conçus, spécifiques pour le stockage du combustible alternatif.

Ces mesures ne sont pas nécessairement spécifiques au contrôle de produits chimiques de l'Annexe C qui sont à éliminer ou à réduire, mais sont des éléments essentiels d'une stratégie intégrée de contrôle des émissions.

### **6.2.1.3 Contrôle des charges**

- Des fournitures fiables à long terme d'un déchet donné ou de combustibles alternatifs (par exemple une fourniture d'un mois ou plus à l'avance) sont nécessaires pour maintenir des conditions stables pendant l'opération;
- Les substances entrant dans le four devraient être soigneusement sélectionnés et contrôlés ; des spécifications devront être définies, en se basant sur des considérations de produit/procédé ou d'émission, et être suivies ;

- Apport régulier de combustible alternatif, avec spécifications pour les métaux lourds, le chlore, le soufre;
- Aucune alimentation en combustibles dérivés de déchets, pendant la période d'allumage et d'arrêt ;
- Il faut éviter de charger des matières premières comprenant des déchets contenant des matières organiques qui pourraient agir en tant que précurseurs;
- Les déchets halogénés doivent être chargés au niveau du brûleur principal;
- En général les déchets devraient être alimentés au niveau du brûleur principal, ou du brûleur secondaire pour les fours à préchauffage/pré-calcination. Pour le brûleur secondaire, il faut s'assurer que la température de la zone de combustion est maintenue  $> 850^{\circ}\text{C}$  pendant un temps de résidence suffisant ( 2 s);
- Les déchets chargés contenant des composés organiques, qui pourraient agir en tant que précurseurs, ne doivent pas être incorporés au mélange de départ ;
- Des combustibles dérivés de déchets ne doivent jamais être utilisés pendant les opérations de mise en route et d'arrêt.

Contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C : Les mesures indirectes pour le contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C constituent un élément important du contrôle intégré des émissions. De telles mesures sont applicables en général et sont assez faciles à appliquer sur le plan technique.

#### **6.2.1.4 Stabilisation des paramètres du procédé**

Il est important pour la stabilité de la combustion et du procédé de s'assurer :

- De l'uniformité des caractéristiques des combustibles (aussi bien de substitution que fossiles) ;
- De la régularité des taux d'approvisionnement en combustibles, ou des fréquences d'introduction des matières chargées de manière discontinue;
- D'un excès d'oxygène suffisant assurant une combustion complète;
- Que les concentrations de CO dans les gaz de procédé sont suivies, et qu'elles n'excèdent pas des niveaux mesurés au préalable reflétant une combustion incomplète;

Contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C : Les mesures indirectes pour le contrôle de telles substances chimiques sont des éléments importants d'une stratégie globale de contrôle des émissions. De telles mesures sont généralement applicables, et aident à assurer des conditions de fonctionnement stables.

#### **6.2.1.5 Modification du procédé**

La poussière dans les gaz émis (également connue sous le nom de poussière de cimenterie) doit être contrôlée soigneusement. Dans beaucoup de cas elle peut être réintroduite dans le four dans la mesure où cela a été démontré faisable ; ceci évite des émissions excessives de métaux volatils et de sels alcalins. Lorsqu'il est possible d'optimiser cette re-circulation, ceci contribuera à réduire les problèmes liés à l'élimination des poussières. Les poussières qui ne peuvent pas être réintroduites doivent être contrôlées de telle sorte à démontrer qu'elles ne présentent pas de risque. Selon le niveau de contamination qui pose problème (par exemple, métaux lourds, polluants organiques persistants), ces matières peuvent être dans certains cas

considérées comme déchets dangereux, et imposeront ainsi des mesures réglementaires spéciales de manipulation et d'élimination, selon leurs caractéristiques.

Contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C: Les mesures indirectes pour le contrôle de telles substances chimiques sont un élément important d'une stratégie intégrée de contrôle d'émission.

#### **6.2.1.6 Résumé des mesures primaires**

En général, les mesures primaires mentionnées ci-dessus suffisent pour atteindre un niveau d'émission inférieur à 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>, dans les gaz de combustion pour les nouvelles installations et celles existantes. Si toutes ces options ne mènent pas à une performance inférieure à 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>, on peut envisager les mesures secondaires décrites ci-dessous.

#### **6.2.2 Mesures secondaires**

Les mesures secondaires décrites ci-dessous sont normalement installées dans les fours à ciment pour contrôler les polluants, autres que les polluants organiques persistants formés de manière non-intentionnelle, mais elles peuvent mener à une réduction simultanée des émissions de substances chimiques inscrites à l'Annexe C.

##### **6.2.2.1 Amélioration supplémentaire de la diminution et du recyclage de la poussière**

Ces mesures ne réduiront pas de manière significative les niveaux des produits chimiques inscrits à l'Annexe C et présents dans les gaz. En conséquence, l'efficacité de cette stratégie diminuera généralement avec l'augmentation de la température des équipements d'extraction des poussières. Si l'on passe d'un système sans circulation, à un système de re-circulation totale des poussières, il y aura un changement dans la composition chimique de ces poussières avec le temps, augmentant le contenu alcalin et remettant en cause le fonctionnement du procédé; une certaine fraction de la poussière récupérée doit être retirée; quand des taux élevés de recyclage sont pratiqués, la poussière est susceptible d'être enrichie en métaux lourds semi-volatils et volatils, exigeant des procédures de manipulation soignées, et une élimination fiable dans une installation conçue pour traiter ou contenir les déchets dangereux. Applicabilité générale; besoins modérés au niveau de la technique de construction; bonne extraction de la fraction des produits chimiques inscrits à l'Annexe C qui sont fixés aux particules.

Des fours rotatifs sont généralement équipés d'électrofiltres, à cause des températures relativement élevées des gaz de sortie. Des filtres à tissu sont également utilisés, en particulier sur les fours à préchauffage, où les températures des gaz sont plus faibles.

Des fours verticaux sont habituellement équipés de filtres en tissu. Des épurateurs humides sont parfois utilisés. Les unités de broyage de chaux utilisent ces filtres à tissu pour collecter le produit et pour dépoussiérer l'air environnant. Les unités d'hydratation, avec des gaz saturés en vapeur d'eau à environ 90° C, sont généralement équipées d'épurateurs humides, bien que les filtres en tissu soient de plus en plus utilisés dans les cas où la chaux injectée a une réactivité élevée.

Des informations fournies par l'Union Européenne (European Commission 2001) indiquent que la matière particulaire peut être efficacement extraite par application :

- d'électrofiltres associés à des équipements de mesure et de contrôle rapides pour réduire le nombre de passages de CO;

- de filtres en tissu à compartiments multiples, et avec détecteurs de rupture du tissu.

Le niveau d'émission lié à ces meilleures techniques disponibles est de 20-30 mg poussière/m<sup>3</sup>, sur une base moyenne quotidienne. Ce niveau d'émission peut être atteint par des électrofiltres ou avec des filtres en tissu sur divers types d'installations dans l'industrie du ciment.

#### **6.2.2.2 Injection de charbon actif**

Quand les filtres en tissu sont utilisés pour le contrôle des particules émises, il est possible d'injecter du charbon actif en poudre en amont du filtre en tissu, et de réaliser une très bonne extraction des métaux et des composés organiques. Les polluants sont extraits par adsorption sur la surface du carbone, à la fois pendant qu'il est dispersé dans le flux gazeux, et également pendant que le flux gazeux traverse le gâteau de filtration formé à l'intérieur des sacs de filtres en tissu. Une basse température de fonctionnement est la clef à la réussite de cette technique, puisque dans l'intervalle de température pour la synthèse *de novo* (250°-400° C), le charbon actif pourrait servir de source de carbone pour la formation de PCDD/PCDF. Le charbon actif est aussi plus efficace pour adsorber les métaux et les PCDD/PCDF aux températures en dessous de 200° C. En même temps, la température doit être maintenue au-dessus du point de condensation pour les gaz d'échappement, afin d'éviter la condensation et le colmatage des sacs. Une température de fonctionnement aux alentours de 160° C est généralement employée, bien qu'avec un suivi soigné, des valeurs légèrement plus basses puissent être réalisées. Le contrôle de température est habituellement effectué par un refroidissement par évaporation, et le carbone est typiquement injecté dans le refroidisseur par évaporation, ou juste en aval de celui-ci. Il est à noter que si la poussière du four à ciment doit être réutilisée dans le four, cette technique peut ne pas être très efficace pour la régulation des émissions de mercure, car le mercure déposé sera à nouveau libéré dans le four, et le flux des poussières en excès, soutiré pour élimination, devra peut-être représenter une fraction plus importante afin d'assurer un contrôle efficace.

Cette technique a une applicabilité générale pour le contrôle des produits chimiques inscrits à l'Annexe C, avec une très bonne extraction (> 90%) quand les températures de fonctionnement sont optimisées correctement ; elle a des besoins en construction qui vont de faibles à modérés, et est mieux adaptée à une situation de réhabilitation d'usine que les deux options suivantes.

#### **6.2.2.3 Filtre à charbon actif**

Cette mesure permet un rendement d'épuration élevé pour les traces de polluants (> 90% généralement; < 99% pour certains composés). Les polluants comme le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), des composés organiques, des métaux, l'ammoniaque (NH<sub>3</sub>), des composés d'ammoniaque (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide fluorhydrique (HF), et la poussière résiduelle (après un électrofiltre ou un filtre en tissu) peuvent être séparés des gaz sortant du four par adsorption sur un lit de charbon actif. Le seul filtre à charbon actif installé pour l'industrie du ciment en Europe se trouve à la cimenterie de Siggenthal, en Suisse. L'unité de Siggenthal dispose d'un four de préchauffage à quatre chambres cycloniques, et atteint une capacité de production de 2'000 tonnes de clinker par jour. Des mesures ont montré des rendements d'épuration élevés en ce qui concerne le SO<sub>2</sub>, les métaux et les PCDD/PCDF (European Commission 2001).

Contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C : applicabilité générale, technique de construction exigeante.



#### 6.2.2.4 Réduction catalytique sélective

En général, la réduction catalytique sélective s'applique pour le contrôle des NO<sub>x</sub>. Le procédé réduit le NO et le NO<sub>2</sub> en N<sub>2</sub> utilisant le NH<sub>3</sub> comme agent réducteur, en présence d'un catalyseur approprié, dans une zone de températures d'environ 300° à 400°C, ce qui nécessiterait le réchauffement des gaz sortant dans le cas d'un four typique. Une partie seulement des catalyseurs capables de réduire les oxydes d'azote est aussi applicable pour la destruction des polluants de l'Annexe C tels que les PCDD/PCDF. Jusqu'à maintenant, la réduction catalytique sélective a seulement été testée sur des systèmes de four avec préchauffage et des fours voie sèche (Lepol), mais elle pourrait s'appliquer également à d'autres systèmes de fours (European Commission 2001). Ses coûts en investissement élevés, associés à des coûts énergétiques significatifs pour le réchauffement des gaz émis qui est nécessaire pour son fonctionnement, pourrait rendre cette solution non viable pour des applications normales. La première unité à l'échelle industrielle (Solnhofer Zementwerke) fonctionne depuis fin 1999 (IPTA 2004).

Contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C : techniques de construction et coûts investissement/opératoire exigeants ; excellente amélioration attendue du contrôle des substances chimiques inscrites à l'Annexe C, à l'aide de catalyseurs sélectionnés de manière appropriée.

#### 6.2.2.5 Injection de charbon actif, une technologie émergente

Il est possible d'injecter le charbon actif en poudre en amont du filtre à tissu et de réaliser une bonne extraction des métaux et des composés organiques. Cependant, les remarques suivantes sont à retenir :

- Une température faible de fonctionnement, < 160°C, est cruciale pour une mise en œuvre réussie de cette technique;
- En même temps, la température doit être maintenue au dessus du point de rosée des acides pour éviter condensation et corrosion;
- Si la poussière de four à ciment doit être recyclée, ce qui est habituellement le cas, cette technique ne sera pas efficace pour le contrôle des émissions de mercure, car le mercure déposé sera à nouveau sublimé dans le four;
- Cette technologie d'injection de charbon actif n'a pas été prouvée pour le contrôle des émissions de PCDD/PCDF dans les cimenteries, et a seulement été appliqué dans des incinérateurs de déchets municipaux.

### 7. Exigences de performance basées sur les meilleures techniques disponibles

Les exigences de performance basées sur les meilleures techniques disponibles pour le contrôle des PCDD/PCDF dans les gaz de cheminée, devraient être < 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> dans les conditions de référence : 273 K, 101,3 kPa, 11% O<sub>2</sub> et base de gaz sec.

### 8. Suivi des émissions polluantes et des paramètres opératoires

Pour contrôler le procédé dans le four, des mesures en continu sont recommandés pour les paramètres suivants (European Commission 2001):

- Pression;
- Température;
- Teneur en O<sub>2</sub>;
- NO<sub>x</sub>;

- CO, et si possible quand la concentration en SO<sub>x</sub> est élevée;
- SO<sub>2</sub> (une technique est en cours de développement pour optimiser CO avec NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub>).

En plus de ces paramètres, la teneur en mercure doit être contrôlée (si celle dans les déchets est élevée).

Pour quantifier les émissions avec précision, des mesures en continu des paramètres suivants sont recommandées (il faudrait peut-être les mesurer à nouveau si leurs niveaux changent, après le point où ils sont mesurés lors des contrôles) :

- Volume de gaz produit (peut être calculé, mais le procédé est souvent considéré comme étant compliqué);
- Humidité;
- Température à l'entrée du dispositif de contrôle de la matière particulaire;
- Matière particulaire/poussière;
  
- O<sub>2</sub>;
- NO<sub>x</sub>;
- Poussières
- SO<sub>2</sub>;
- CO.

Un contrôle périodique et régulier est la meilleure technique disponible pour les substances suivantes:

- Métaux et leurs composés;
- Total des composés carbone organique et composés organiques;
- HCl, HF ;
- NH<sub>3</sub>;
- PCDD/PCDF.

Des mesures des substances suivantes peuvent être exigées occasionnellement lors de conditions de fonctionnement spéciales :

- Destruction et rendement d'épuration, dans le cas de rejets de polluants organiques persistants des fours à ciment;
- Benzène, toluène, xylène;
- Hydrocarbures polycycliques aromatiques;
- Autres polluants organiques (par exemple, chlorobenzènes, PCB, y compris congénères coplanaires, chloronaphtalènes).

Il est particulièrement important de mesurer les teneurs en métaux quand des déchets à teneur en métal plus élevée sont utilisés comme matières premières ou comme combustibles.

## Références

- Basel Convention Secretariat. 2005. *General Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or Contaminated with Persistent Organic Pollutants (POPs)*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Geneva.
- Cembureau. 2004. *Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production*. Cembureau, Brussels, Belgium.
- CEN (European Committee for Standardization). 1996a. "EN 1948-1: Sampling." Part 1 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.
- CEN (European Committee for Standardization). 1996b. "EN 1948-2: Extraction and Clean-up." Part 2 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.
- CEN (European Committee for Standardization). 1996c. "EN 1948-3: Identification and Quantification." Part 3 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.
- CSI (Cement Sustainability Initiative). 2005. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials*. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.
- de Bas P. 2002. *The Economics of Measurement of Emissions into the Air*. European Measurement Project. Pembroke College, Oxford, UK.
- DFIU/IFARE (French-German Institute for Environmental Research). 2002. *Cement/Lime Industry*. Draft Background Document in preparation for 5th EGTEI Panel Meeting, 29 November 2002. [www.citepa.org/forums/egtei/cement\\_lime\\_draft.pdf](http://www.citepa.org/forums/egtei/cement_lime_draft.pdf).
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998a. *Technical Background Document on Control of Fugitive Dust at Cement Manufacturing Facilities*. Draft. EPA, Office of Solid Waste, Washington, D.C.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998b. *Technical Background Document on Ground Water Controls at CKD Landfills*. Draft. EPA, Office of Solid Waste, Washington, D.C.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1999. *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories: Portland Cement Manufacturing Industry: Final Rule*. 40 CFR part 63, 14 June 1999. EPA, Washington, D.C.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. "Combustion Sources of CDD/CDF: Other High Temperature Sources." Chapter 5, *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*. EPA/600/P-00/001Bb. EPA, Washington, D.C., September 2000.
- European Commission. 2001. *Reference Document on the Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.
- Fabrellas B., Larrazabal D., Martinez M.A., Sanz P., Ruizl M.L., Abad E. and Rivera J. 2004. "Global Assessment of PCDD/PCDF Emissions from the Spanish Cement Sector: Effect of Conventional/Alternative Fuels." *Organohalogen Compd.* 66:905–911.
- Holcim. *Sustainable Development: Environmental Performance*. [www.holcim.com](http://www.holcim.com).
- Holsiepe D., Shenk R. and Keefe B. 2001. *Partners in Progress: A Case Study on Upgrading for the New Millennium, Part I*. Cement Americas.

[cementtour.cementamericas.com/ar/cement\\_partners\\_progress\\_case\\_2/](http://cementtour.cementamericas.com/ar/cement_partners_progress_case_2/).

IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). 2004. *Promoting Environmental Technologies: Sectoral Analyses, Barriers and Measures*. Draft Report EUR 21002 EN, European Communities.

Karstensen K.H. 2006a. *Cement Production in Vertical Shaft Kilns in China: Status and Opportunities for Improvement*. Report to the United Nations Industrial Development Organization, 31 January 2006.

Karstensen K.H. 2006b. *Formation and Release of POPs in the Cement Industry*. Second edition, January 2006. World Business Council for Sustainable Development/SINTEF.

Lohse J. and Wulf-Schnabel J. 1996. *Expertise on the Environmental Risks Associated with the Co-Incineration of Wastes in the Cement Kiln "Four E" of CBR Usine de Lixhe, Belgium*. Okopol, Hamburg, Germany. [www.oekopol.de/Archiv/Anlagen/CBRBelgien.htm](http://www.oekopol.de/Archiv/Anlagen/CBRBelgien.htm).

Portland Cement Association. *Industry Overview*. [www.cement.org/basics/cementindustry.asp](http://www.cement.org/basics/cementindustry.asp).

Sutou K., Harada H. and Ueno N. 2001. *Chlorine Bypass System for Stable Kiln Operation and Recycling of Waste*. Technical Conference on Cement Process Engineering, 21st Plenary Session of the VDZ Process Engineering Committee, Düsseldorf, Germany, 22 February 2001.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. [www.pops.int/documents/guidance/Toolkit\\_2003.pdf](http://www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2003.pdf).

WISE (Waste Indicator System for the Environment). 2002. *Volume of Cement Kiln Dust Produced and Reused*. Indicators: Environmental Issue 1, Waste Generation. [www.pepps.fsu.edu/WISE/](http://www.pepps.fsu.edu/WISE/).

Wulf-Schnabel J. and Lohse J. 1999. *Economic Evaluation of Dust Abatement in the European Cement Industry*. Report prepared for the European Commission DG XI, Contract No. B4-3040/98/000725/MAR/E1. [www.oekopol.de/en/Archiv/archiv.htm](http://www.oekopol.de/en/Archiv/archiv.htm).

## Autres sources

Environment Canada. 1999. *Level of Quantification Determination: PCDD/PCDF and Hexachlorobenzene*. Environment Canada, Environmental Technology Centre, Analysis and Air Quality Division. [www.ec.gc.ca/envhome.html](http://www.ec.gc.ca/envhome.html).

Holcim. 2004. *Guidelines on Co-Processing of Waste Material in Cement Production*. Version 6. Cooperation of Holcim and GTZ, December 2004.

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. 1997. *Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans in Europe*. Commissioned by EC DG XI, LUA-Materialien No. 43. European Dioxin Inventory.

Marlowe I. and Mansfield D. 2002. *Toward a Sustainable Cement Industry*. Substudy 10: Environment, Health and Safety Performance Improvement. AEA Technology. [www.wbcdcement.org/](http://www.wbcdcement.org/).

Stieglitz L., Jay K., Hell K., Wilhelm J., Polzer J. and Buekens A. 2003. *Investigation of the Formation of Polychlorodibenzodioxins/Furans and of Other Organochlorine Compounds in Thermal Industrial Processes*. Scientific Report FZKA 6867. Forschungszentrum Karlsruhe.