



COMMISSION EUROPEENNE
DIRECTION GENERALE CCR
CENTRE COMMUN DE RECHERCHE
Institut d'Etudes Technologiques Prospectives
Unité de Production et Consommation Durable
Bureau Européen IPPC

Prévention et contrôle intégrés de la pollution

Projet de document de référence sur les
meilleures techniques disponibles dans

les industries de fabrication du ciment, de la chaux et de la magnésie

Mai 2009



Le présent document fait partie de la série de documents ci-dessous, qui doivent être révisés :

Document de référence sur les meilleures techniques disponibles . . .	Code
Grandes installations de combustion	LCP
Raffineries	REF
Aciéries	I&S
Transformation des métaux ferreux	FMP
Industrie des métaux non ferreux	NFM
Forges et fonderies	SF
Traitement de surface des métaux et des matières plastiques	STM
<i>Industries de fabrication du ciment, de la chaux et de l'oxyde de magnésium</i>	<i>CLM</i>
Verreries	GLS
Céramiques	CER
Chimie organique de base	LVOC
Chimie fine organique	OFC
Polymères	POL
Industrie du chlore et de la soude	CAK
Chimie minérale de base - ammoniac, acides et engrais	LVIC-AAF
Chimie minérale de base - produits solides et autres	LVIC-S
Chimie minérale de spécialités	SIC
Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique	CWW
Traitement des déchets	WT
Incinération des déchets	WI
Gestion des résidus et des stériles des activités minières	MTWR
Industrie papetière	PP
Textile	TXT
Tannerie	TAN
Abattoirs et équarrissage	SA
Industries agro-alimentaires et laitières	FDM
Elevage intensif de volailles et de porcs	IRPP
Traitement de surface utilisant des solvants	STS
Systèmes de refroidissement industriel	ICS
Emissions dues au stockage	EFS
Efficacité énergétique	ENE
Document de référence. . .	
Principes généraux de surveillance	MON
Aspects économiques et effets croisés	ECM

Les versions électroniques des projets de documents et des documents finalisés sont accessibles au public et peuvent être téléchargées à partir de la page <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>.

RESUME EXECUTIF

Le document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF - Best Available Techniques Reference document) intitulé «**Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie**» rend compte de l'échange d'informations mené en application de l'article 17, paragraphe 2, de la directive 2008/1/CE du Conseil (directive IPPC). Le présent résumé, qu'il convient de lire à la lumière de la préface du BREF qui en explique les objectifs, l'utilisation et les termes juridiques, décrit les principales constatations faites, les principales conclusions relatives aux MTD (meilleures techniques disponibles) ainsi que les niveaux d'émission et de consommation associés. Il se suffit à lui-même mais, en tant que résumé, il ne rend pas compte de toutes les complexités du texte complet du BREF. Il n'a donc pas vocation à se substituer au BREF intégral en tant qu'outil pour la prise de décisions sur les meilleures techniques disponibles

CHAMP D'APPLICATION DU BREF

Le présent document concerne les activités industrielles spécifiées au point 3.1 de l'annexe I de la directive 2008/1/CE, à savoir:

«3.1. Installations destinées à la production de ciment à clinker dans des fours rotatifs avec une capacité de production supérieure à 500 tonnes par jour, ou de chaux dans des fours rotatifs avec une capacité de production supérieure à 50 tonnes par jour, ou dans d'autres types de fours avec une capacité de production supérieure à 50 tonnes par jour.»

Outre l'industrie du ciment et de la chaux, le document couvre la production d'oxyde de magnésium par voie sèche.

Le BREF comprend trois chapitres, un premier consacré à l'industrie du ciment, un deuxième qui porte sur l'industrie de la chaux et un troisième relatif à la production d'oxyde de magnésium par voie sèche à partir de magnésite naturelle (carbonate de magnésium $MgCO_3$). Chacun de ces chapitres comporte sept sections conformément au guide d'élaboration des BREF. En plus des activités de fabrication de base des trois secteurs industriels susmentionnés, le BREF couvre les activités associées qui sont susceptibles d'avoir une incidence sur les émissions ou sur la pollution. Le document aborde donc l'ensemble des activités, depuis la préparation des matières premières jusqu'à l'expédition des produits finis. Certaines activités, notamment l'extraction des matières premières dans les carrières et la production de clinker dans des fours verticaux, ne sont pas couvertes parce qu'elles ne sont pas considérées comme étant directement associées à l'activité primaire.

INDUSTRIE DU CIMENT

Principaux problèmes d'environnement

Le ciment est le matériau de base utilisé pour la construction de bâtiments et d'ouvrage de génie civil. La production de ciment de l'Union européenne était de 267,5 millions de tonnes en 2006, soit environ 10,5 % de la production mondiale.

En 2008, on dénombrait dans l'Union européenne 268 installations produisant du clinker et du ciment fini, regroupant 377 fours au total. On recensait également 90 usines de broyage (broyeurs à ciment) et deux installations de production de clinker sans broyeur. En règle générale, les fours ont une capacité d'environ 3 000 tonnes de clinker/jour.

La cuisson du clinker est l'étape qui contribue le plus aux problèmes environnementaux associés à la fabrication du ciment, à savoir la consommation d'énergie et les émissions dans l'air. En fonction des procédés de production mis en œuvre, les cimenteries rejettent des émissions dans l'air et produisent des déchets. Dans de rares cas, des rejets dans l'eau sont possibles. Peuvent s'y ajouter des nuisances sonores et olfactives. Les principales substances polluantes émises dans l'atmosphère sont des poussières, des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre. S'y ajoutent des émissions d'oxydes de carbone, de dibenzo-p-dioxines et de dibenzofurannes polychlorés, de

carbone organique total, de métaux, de chlorure d'hydrogène et de fluorure d'hydrogène. Le type et le volume des polluants atmosphériques dépend de plusieurs paramètres, notamment des intrants (matières premières et combustibles utilisés) ainsi que du type de procédé mis en œuvre.

Dans l'Union européenne, la production d'une tonne de clinker implique en règle générale la consommation de 1,52 tonne de matières premières (en moyenne). La différence s'explique principalement par des pertes sous la forme d'émissions de dioxyde de carbone dans l'air lors de la réaction de calcination ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$).

Techniques et procédés appliqués

Après extraction, puis concassage, broyage et homogénéisation des matières premières, la première étape de la fabrication du ciment consiste en la calcination du carbonate de calcium, suivie de la réaction de l'oxyde de calcium ainsi obtenu avec de la silice, de l'alumine et de l'oxyde ferreux à température élevée pour former le clinker. Le clinker est ensuite broyé avec du gypse et d'autres constituants pour donner du ciment. Le carbonate de calcium est extrait de formations naturelles de roches calcaires, de marne ou de craie. La silice, l'oxyde de fer et l'alumine se trouvent dans divers minerais et minéraux. Plusieurs types de déchets peuvent également être utilisés pour remplacer une partie des matières premières naturelles.

L'industrie cimentière est une grande consommatrice d'énergie, avec un poste énergie représentant classiquement 40 % des coûts de production (coûts d'investissement exclus mais coûts de l'électricité compris). Divers combustibles fossiles traditionnels ou à base de déchets peuvent être utilisés pour fournir l'énergie thermique nécessaire au procédé. En 2006, les combustibles les plus couramment utilisés étaient le coke de pétrole, le charbon et différents types de déchets, suivis du lignite et d'autres combustibles solides, du fioul et du gaz naturel.

En fait, les caractéristiques du procédé de cuisson du clinker permettent d'utiliser des déchets comme matières premières et/ou comme combustibles. La cuisson du clinker est réalisée dans un four rotatif qui peut faire partie d'un système du type four long à voie sèche ou à voie humide, du type four avec préchauffeur à grille (Lepol) à voie semi-sèche ou à voie semi-humide, ou du type four à voie sèche avec préchauffeur ou avec préchauffeur/précalcinateur. En 2008, environ 90 % de la production européenne de ciment était assurée par les procédés à voie sèche; les procédés par voie semi-sèche ou voie semi-humide représentaient 7,5 % de la production et les 2,5 % restants étaient obtenus dans des fours à voie humide. D'une manière générale, les fours à voie humide qui sont actuellement en service en Europe sont appelés à être convertis en systèmes de four à voie sèche lors de leur renouvellement; il en ira de même pour les systèmes de four à voie semi-sèche ou semi-humide.

INDUSTRIE DE LA CHAUX

Principaux problèmes d'environnement

La chaux a des usages très divers; elle sert par exemple de fondant dans l'affinage de l'acier, de liant dans le BTP (bâtiment-travaux publics) et d'agent de précipitation des impuretés dans le traitement des eaux. Elle est également largement utilisée pour la neutralisation des constituants acides des effluents industriels et des gaz de carneau. En 2004, la production européenne de chaux s'élevait à 25 millions de tonnes ou à 28 millions de tonnes en incluant la production captive (pour consommation propre), ce qui représente 20 % de la production mondiale de chaux.

En 2003, on dénombrait environ 211 installations produisant de la chaux dans les pays qui forment actuellement l'UE-27 (production captive exclue) et en 2006, le nombre total de fours produisant de la chaux commerciale s'élevait à 597 dont 551 (ou 90 % environ) étaient des fours verticaux. La capacité des fours se situe en général entre 50 et 500 tonnes de chaux par jour, pour les fours verticaux. La production de chaux nécessite habituellement entre 1,4 et 2,2 tonnes de calcaire pour une tonne de chaux vive marchande. La consommation de matière première dépend

du type de produit, de la pureté du calcaire, du degré de calcination et de la quantité de déchets. La différence entre la quantité de matière consommée et la quantité de chaux produite s'explique principalement par les pertes en cours de fabrication dues aux émissions de dioxyde de carbone dans l'air.

L'industrie de la chaux est une industrie à très forte intensité énergétique, dont le poste énergie peut représenter jusqu'à 60 % des coûts de production. Les fours sont alimentés avec des combustibles gazeux (gaz naturel, gaz de cokeries), solides (charbon, coke/anthracite) ou liquides (fioul lourd/léger). En outre, différents types de déchets sont utilisés comme combustibles (huile, plastique, papier, farines animales, sciure de bois).

Les questions environnementales cruciales associées à la fabrication de la chaux sont la pollution de l'air et la consommation d'énergie. Le procédé de cuisson de la chaux est la principale source d'émissions et également le principal consommateur d'énergie. Les procédés secondaires d'extinction et de broyage de la chaux peuvent également jouer un certain rôle à cet égard. En fonction des procédés de production mis en œuvre, les usines de chaux rejettent des émissions dans l'air et produisent des déchets. Peuvent s'y ajouter des nuisances sonores et olfactives. Les principales substances polluantes émises dans l'atmosphère sont des poussières, des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre et du monoxyde de carbone. En fonction des matières premières et des combustibles utilisés, des émissions de dibenzo-p-dioxines et de dibenzofurannes polychlorés, de carbone organique total, de métaux, de chlorure d'hydrogène et de fluorure d'hydrogène sont également possibles.

Techniques et procédés appliqués

Le terme «chaux» comprend la chaux vive et la chaux éteinte et est synonyme de «produits de chaux». La chaux vive ou chaux calcinée est de l'oxyde de calcium (CaO). La chaux éteinte est essentiellement constituée d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) et comprend la chaux hydratée (qui est de la poudre sèche d'hydroxyde de calcium), le lait de chaux et la pâte de chaux (qui sont des dispersions de particules d'hydroxyde de calcium dans l'eau).

La fabrication de la chaux consiste à cuire des carbonates de calcium et/ou de magnésium pour libérer du dioxyde de carbone et obtenir l'oxyde dérivé ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). À la sortie du four, l'oxyde de calcium est habituellement concassé, broyé et/ou tamisé avant d'être transporté vers les silos de stockage. Du silo, la chaux calcinée est soit livrée au client final pour utilisation sous forme de chaux vive, soit transférée dans une installation d'hydratation où elle est mise à réagir avec de l'eau pour produire de la chaux éteinte.

FABRICATION D'OXYDE DE MAGNÉSIUM (VOIE SÈCHE)

Principaux problèmes d'environnement

L'oxyde de magnésium (MgO /magnésie) est la principale forme industrielle du magnésium et il est essentiellement utilisé en sidérurgie et dans les industries réfractaires, mais aussi dans de nombreux autres secteurs industriels. Le procédé par voie sèche permet d'obtenir différents types d'oxyde de magnésium, tels que la magnésie calcinée à mort (MCM), la magnésie calcinée caustique (MCC) et la magnésie fondue (MF).

En 2003, la production mondiale de magnésite était d'environ 12,5 millions de tonnes, dont 2,3 millions de tonnes (18,4 %) produites par les pays qui forment aujourd'hui l'UE-27. La même année, la production mondiale de MgO par voie sèche s'élevait à environ 5,8 millions de tonnes. En 2008, d'après les informations disponibles, l'UE-27 ne comptait que neuf producteurs d'oxyde de magnésium (par voie sèche), exploitant 14 usines. Le nombre de fours par usine varie entre un et trois, sauf pour un producteur dont l'usine comprend huit fours.

La fabrication d'oxyde de magnésium consomme beaucoup d'énergie car la magnésie, et en

particulier la MCM, est produite à très haute température. L'énergie requise pour la production de MgO est comprise entre 6 et 12 GJ/t MgO et dépend de plusieurs facteurs. En 2008, les combustibles utilisés étaient le gaz naturel, le coke de pétrole et le fioul lourd.

Les principales questions environnementales associées à la production d'oxyde de magnésium sont la pollution de l'air et la consommation d'énergie. Le procédé de cuisson est la principale source d'émissions et également le principal consommateur d'énergie. En fonction des procédés de production mis en œuvre, les usines de production de MgO rejettent des émissions dans l'air et produisent des déchets. Peuvent s'y ajouter des nuisances sonores et olfactives. Les principales substances polluantes émises dans l'atmosphère sont des poussières, des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre et des oxydes de carbone (CO, CO₂).

Techniques et procédés appliqués

La magnésite brute est extraite en carrière, concassée, broyée et tamisée avant cuisson. Plus de 98 % de la magnésite extraite est utilisée pour la production des différents types de magnésie. La réaction chimique de désacidification de la magnésite est endothermique et nécessite une température de calcination élevée. Plusieurs procédés et étapes de calcination sont nécessaires pour produire les différents types d'oxyde de magnésium que sont la MCC, la MCM et/ou la MF. Plusieurs types de fours sont utilisés, notamment des fours à soles multiples, des fours verticaux ou des fours rotatifs. Pour la production de magnésie fondue, on utilise des fours à arc électrique spéciaux.

INDUSTRIES DU CIMENT, DE LA CHAUX ET DE LA MAGNÉSIE

Techniques à prendre en considération pour la détermination des MTD

Les aspects importants pour la mise en œuvre de la directive IPPC dans les industries du ciment, de la chaux et la magnésie sont la réduction des émissions dans l'air et dans l'eau, l'efficacité énergétique, la consommation de matières premières et d'eau, la réduction maximale des pertes/déchets de production, ainsi que leur récupération et leur recyclage, et l'efficacité des systèmes de gestion de l'environnement et de l'énergie.

Ces aspects sont pris en compte grâce à diverses mesures/techniques intégrées au processus de fabrication ou mises en œuvre en fin de chaîne, en fonction de leur applicabilité dans les secteurs du ciment, de la chaux et de la magnésie. Les mesures/techniques indiquées dans le présent document sont celles qui sont susceptibles de contribuer à un niveau élevé de protection de l'environnement. Dans ce cadre, les techniques de prévention et de réduction de la pollution proposées sont au nombre de 36 environ pour l'industrie du ciment (Section 1.4), de 24 environ pour l'industrie de la chaux (Section 2.4) et de 16 environ pour l'industrie de la magnésie (Section 3.4).

Meilleures techniques disponibles

Les sections relatives aux MTD (sections 1.5, 2.5 et 3.5) recensent les techniques considérées comme MTD dans les secteurs du ciment, de la chaux et de la magnésie en général, sur la base essentiellement des informations fournies dans les sections 1.4, 2.4 et 3.4 et compte tenu de la définition des meilleures techniques disponibles énoncée à l'article 2, point 12, de la directive IPPC ainsi que des éléments de réflexion figurant à l'annexe IV de celle-ci. Les sections relatives aux MTD suggèrent également des valeurs d'émission et de consommation qui sont associées à l'utilisation des MTD. Comme cela est expliqué dans la préface du BREF, les sections relatives aux MTD ne proposent pas de valeurs limites d'émission. Pour les installations qui relèvent de la directive IPPC, c'est à l'autorité compétente qu'il incombe de déterminer les valeurs limites d'émission, sur la base des MTD, et de les spécifier dans l'autorisation.

Il convient de signaler que dans le présent résumé, les conclusions en matière de MTD sont présentées de façon synthétique. Pour consulter l'intégralité des conclusions en matière de MTD,

il convient de se reporter aux sections 1.5, 2.5 et 3.5 du BREF. Il est à noter par ailleurs que, en cas de coïncinération de déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

Résumé des MTD pour l'industrie du ciment	
Management de l'environnement (MTD 1, section 1.5.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en place et adhérer à un système de management de l'environnement comprenant, le cas échéant, en fonction des conditions locales, les caractéristiques énumérées dans la MTD 1, section 1.5.1 du BREF.
Mesures/techniques primaires générales (MTD 2, 3, 4, section 1.5.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Assurer une cuisson homogène et stable, avec un four fonctionnant à des valeurs proches des valeurs de consigne des paramètres, ce qui influe favorablement sur toutes les émissions du four ainsi que sur la consommation d'énergie, en appliquant les mesures/techniques énumérées dans la MTD 2, points a) et b), section 1.5.2 du BREF. Procéder à une sélection et à un contrôle rigoureux de toutes les substances introduites dans le four afin d'éviter et/ou de réduire les émissions (MTD 3, section 1.5.2 du BREF). procéder régulièrement à la surveillance et aux mesures des paramètres du procédé et des émissions énumérés dans la MTD 4 points a) à e), section 1.5.2 du BREF.
Choix du procédé (MTD 5, section 1.5.3.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Pour les installations nouvelles et les mises à niveau majeures, utiliser un système de four à voie sèche avec préchauffeur à cyclones et précalcinateur. En conditions d'exploitation normales ou optimisées, la valeur de bilan thermique associée à la MTD est comprise entre 2900 et 3300 MJ/tonne de clinker (MTD 5, section 1.5.3.1).
Consommation d'énergie (MTD 6, 7, 8, 9, section 1.5.3.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire/minimiser la consommation d'énergie thermique par l'application d'une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 6, points a) à f), section 1.5.3.2. Réduire la consommation d'énergie primaire en considérant la réduction de la teneur en clinker du ciment et des produits de ciment (MTD 7, section 1.5.3.2). Réduire la consommation d'énergie primaire en considérant si possible le recours à des unités de cogénération/production combinée de chaleur et d'électricité, en fonction de la demande de chaleur utile, dans le cadre de programmes de régulation de l'énergie, pour autant que cela soit économiquement viable (MTD 8, section 1.5.3.2). Minimiser la consommation d'électricité en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 9, points a) et b), section 1.5.3.2.
Contrôle de la qualité des déchets (MTD 10 a) à c), section 1.5.4.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en œuvre des systèmes d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des déchets, et analyser tout déchet destiné à être utilisé comme matière première et/ou comme combustible dans un four à ciment au regard des paramètres/critères énumérés dans la MTD 10, point a) I à III, section 1.5.4.1. Contrôler le nombre de paramètres pertinents pour tout déchet destiné à être utilisé comme matière première et/ou combustible dans un four à ciment, notamment chlore, métaux pertinents (cadmium, mercure, thallium par exemple), soufre, teneur totale en halogènes (MTD 10 point b), section 1.5.4.1). Mettre en œuvre des systèmes d'assurance qualité pour chaque charge de déchets (MTD 10 point c), section 1.5.4.1).
Alimentation du four en déchets (MTD 11 a) à f), section 1.5.4.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Utiliser les points d'alimentation du four appropriés en ce qui concerne la température et le temps de séjour, en fonction de la conception du four et de son fonctionnement (MTD 11 point a), section 1.5.4.2) Introduire dans les zones à haute température appropriées du four les déchets contenant des matières organiques susceptibles de se volatiliser avant la zone de calcination (MTD 11 point b), section 1.5.4.2). Faire fonctionner le four de façon que le gaz résultant de la coïncinération des déchets soit porté, de façon contrôlée et homogène, même dans les conditions les plus défavorables, à une température de 850 °C pendant 2 secondes (MTD 11 point c), section 1.5.4.2). Porter la température à 1100 °C en cas de coïncinération de déchets dangereux dont la teneur en substances organiques halogénées, exprimée en chlore, est supérieure à 1 % (MTD 11 point d), section 1.5.4.2). Alimenter de manière continue et constante le four en déchets (MTD 11 point e), section 1.5.4.2) Arrêter la coïncinération des déchets lors des phases de fonctionnement telles que le démarrage et/ou l'arrêt, lorsqu'il n'est pas possibles d'atteindre les valeurs de température et de temps de séjour appropriées qui sont indiquées dans la MTD 11 points a) à d), section 1.5.4.2).
Management de la sécurité lors de l'utilisation de déchets dangereux (MTD 12, section 1.5.4.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Appliquer des mesures de management de la sécurité pour la manutention, par exemple pour le stockage et/ou l'introduction de déchets dangereux dans le four, notamment une approche fondée sur les risques, en fonction de la source et du type de déchets, pour l'étiquetage, le contrôle, l'échantillonnage et l'essai des déchets devant être manutentionnés (MTD 12, section 1.5.4.3).

Résumé des MTD pour l'industrie du ciment													
Émissions diffuses de poussières (MTD 13 a) et b), section 1.5.5.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Minimiser/prévenir les émissions diffuses de poussières en appliquant une ou plusieurs des mesures/techniques énumérées dans la MTD 13, points a) et b), section 1.5.5.1 (mesures/techniques applicables aux opérations générant de la poussière et aux zones de stockage en vrac).												
Émissions canalisées de poussières résultant d'opérations générant de la poussière (MTD 14, section 1.5.5.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Appliquer un système de management de l'entretien axé sur la performance des filtres équipant ces sources. Avec un tel système de management, la MTD consiste à ramener les émissions canalisées de poussières à moins de 10 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesure ponctuelle, pendant au moins une demi-heure) par une épuration des effluents gazeux à sec au moyen d'un filtre. Pour les petites sources (<10000 Nm³/h), il convient d'appliquer une approche basée sur les priorités.												
Émissions de poussières générées par les procédés de cuisson dans les fours (MTD 15, section 1.5.5.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Réduire les émissions de poussières (particules) en épurant les gaz de carneau à sec au moyen d'un filtre. Les niveaux d'émission associés à la MTD (NEA MTD) sont <10 – 20 mg/Nm³ (moyenne journalière). En appliquant des filtres à manches ou des électrofiltres neufs ou améliorés, le niveau bas de la plage est atteint.												
Émissions de poussières générées par les procédés de refroidissement et de broyage (MTD 16, section 1.5.5.4 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Réduire les émissions de poussières (particules) des effluents gazeux des procédés de refroidissement et de broyage en appliquant une épuration à sec des gaz d'exhaure au moyen d'un filtre. Les NEA MTD sont <10 – 20 mg/Nm³ en moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure). En appliquant des filtres à manches ou des électrofiltres neufs ou améliorés le niveau bas de la plage est atteint.												
Émissions de NO _x (MTD 17, 18, section 1.5.6.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Réduire la teneur en NO_x des effluents gazeux en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 17 points a) à d), section 1.5.6.1 [c-à-d mesures/techniques primaires et/ou combustion étagée (combustibles conventionnels ou à base de déchets), également en association avec un précalcinateur et l'utilisation d'un mixte combustibles optimisé, réduction non catalytique sélective (SNCR), réduction catalytique sélective (SCR), sous réserve d'un développement approprié de catalyseur et du procédé dans l'industrie cimentière]. Les niveaux d'émission de NO_x associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants (MTD 17, section 1.5.6.1):<table><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="3"></td></tr></table>En appliquant la SNCR (MTD 18, section 1.5.6.1),<ul style="list-style-type: none">Appliquer les mesures/techniques énumérées dans la MTD 18, points a) et b), section 1.5.6.1.Maintenir la fuite en NH₃ des effluents gazeux à un niveau aussi faible que possible et en tout état de cause inférieur à 30 mg/Nm³ en moyenne journalière. Il convient de considérer la corrélation entre l'efficacité de la réduction des émissions de NO_x et la fuite en NH₃. En fonction de la concentration initiale de NO_x et de l'efficacité de la réduction des émissions de NO_x, la fuite en NH₃ peut être plus importante et atteindre 50 mg/Nm³. Pour les fours Lepol et les fours rotatifs longs, ce niveau peut être encore plus élevé (MTD 18, point c), section 1.5.6.1).												

Résumé des MTD pour l'industrie du ciment																
Émissions de SO _x (MTD 19, 20, section 1.5.6.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Maintenir à un faible niveau ou réduire la teneur en SO_x des fumées du four et/ou des effluents gazeux des procédés de préchauffage/précalcination en appliquant une des mesures/techniques énumérées dans la MTD 19 point a) (ajout d'absorbants) et b) (laveur humide), section 1.5.6.2. Les niveaux d'émission de SO_x associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants (MTD 19, section 1.5.6.2):<table><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="3"></td></tr></table>Optimiser les procédés de broyage des matières premières (pour la voie sèche) car le broyage réduit les émissions de SO₂ du four, comme indiqué dans la section 1.3.4.3 (MTD 20, section 1.5.6.2).															
Réduction du nombre d'arrêts d'urgence dus aux pics de CO (MTD 21, section 1.5.6.3.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">En cas d'utilisation d'électrofiltres ou de filtres hybrides, réduire au minimum la fréquence des arrêts d'urgence dus aux pics de CO et maintenir leur durée totale au-dessous de 30 minutes par an grâce à l'application de plusieurs des mesures/techniques énumérées dans la MTD 21 points a) à c), section 1.5.6.3.1.															
Émissions de carbone organique total (MTD 22, section 1.5.6.4 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Maintenir la teneur en COT des fumés du four à un faible niveau en évitant d'introduire dans le four des matières premières à teneur élevée en composés organiques volatils par l'intermédiaire de l'alimentation en matières premières.															
Émissions de chlorure d'hydrogène (HCl) et de fluorure d'hydrogène (HF) (MTD 23, 24, section 1.5.6.5 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Maintenir les émissions de HCl au-dessous de 10 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 23, points a) et b), section 1.5.6.5.Maintenir les émissions de HF (exprimées en HF) au-dessous de 1 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 24, points a) et b), section 1.5.6.5.															
Émissions de PCDD/F (MTD 25, section 1.5.7 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Éviter les émissions de PCDD/F ou maintenir à un faible niveau les émissions de PCDD/F des fumées du four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 25, points a) à f), section 1.5.7. Les NEA MTD sont <0,05 – 0,1 ng PCDD/F I-TEQ/Nm³ en moyenne sur la période d'échantillonnage (6 à 8 heures).															
Émissions de métaux (MTD 26, section 1.5.8 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Minimiser la teneur en métaux des fumées du four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 26, points a) à c), section 1.5.8. Les niveaux d'émission de métaux associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants:<table><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="3"></td></tr></table>															
Pertes/déchets de production (MTD 27, section 1.5.9 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Les matières particulières recueillies (poussières) doivent si possible être réutilisées dans le procédé ou utilisées pour la fabrication d'autres produits commerciaux.															
Bruit (MTD 28, section 1.5.10 du BREF)	<ul style="list-style-type: none">Réduire/minimiser les émissions sonores des procédés de fabrication du ciment en appliquant plusieurs des mesures/techniques énumérées dans la MTD 28, points a) à h), section 1.5.10.															

Résumé des MTD pour l'industrie de la chaux

Résumé des MTD pour l'industrie de la chaux																	
Management de l'environnement (MTD 29, section 2.5.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en place et adhérer à un système de management de l'environnement comprenant, le cas échéant, en fonction des conditions locales, les caractéristiques énumérées dans la MTD 29, section 2.5.1 du BREF. 																
Mesures/techniques primaires générales (MTD 30, 31, 32, section 2.5.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Assurer une cuisson homogène et stable, avec un four fonctionnant à des valeurs proches des valeurs de consigne des paramètres, ce qui influe favorablement sur toutes les émissions du four ainsi que sur la consommation d'énergie, en appliquant les mesures/techniques énumérées dans la MTD 30, points a) et b), section 2.5.2 du BREF. Procéder à une sélection et à un contrôle rigoureux des substances introduites dans le four afin d'éviter et/ou de limiter les émissions (MTD 31, section 2.5.2). Procéder régulièrement aux contrôles et aux mesures des paramètres du procédé et des émissions qui sont énumérés dans la MTD 32 points a) à d), section 2.5.2. 																
Consommation d'énergie (MTD 33, 34, section 2.5.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire/minimiser la consommation d'énergie thermique par l'application d'une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 33, points a) à c), section 2.5.3. Les niveaux de consommation d'énergie associés à la MTD (MTD 33, section 2.5.3) sont les suivants: <table border="1" data-bbox="470 604 1364 958"> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </table> Minimiser la consommation d'énergie électrique en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 34 points a) à c), section 2.5.3. 																
Consommation de calcaire (MTD 35, section 2.5.4 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Minimiser la consommation de calcaire en appliquant les mesures/techniques énumérées dans la MTD 35, points a) et b), section 2.5.4 individuellement ou en combinaison. 																
Sélection de combustibles (MTD 36, section 2.5.5)	<ul style="list-style-type: none"> Procéder à une sélection et à un contrôle rigoureux des combustibles introduits dans le four; choisir notamment des combustibles à faible teneur en soufre (pour les fours rotatifs en particulier), en azote et en chlore afin d'éviter/de réduire les émissions 																
Contrôle de la qualité des déchets (MTD 37 a) et b), section 2.5.5.1.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en œuvre des systèmes d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des déchets, et analyser tout déchet destiné à être utilisé comme combustible dans un four à chaux au regard des paramètres/critères énumérés dans la MTD 37, point a) I à III, section 2.5.5.1.1. Contrôler le nombre de paramètres pertinents pour tout déchet destiné à être utilisé comme combustible dans un four à chaux, notamment la teneur totale en halogènes, en métaux pertinents (chrome, plomb, cadmium, mercure, thallium, par exemple) et en soufre. 																
Alimentation du four en déchets (MTD 38 a) à e), section 2.5.5.1.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Utiliser des brûleurs adaptés pour alimenter le four en déchets appropriés, en fonction de la conception du four et de son fonctionnement (MTD 38, point a), section 2.5.5.1.2). Opérer de façon que le gaz résultant de la coïncinération des déchets soit porté, de façon contrôlée et homogène, même dans les conditions les plus défavorables, à une température de 850 °C pendant 2 secondes (MTD 38 point b), section 2.5.5.1.2). Porter la température à 1100 °C en cas de coïncinération de déchets dangereux dont la teneur en substances organiques halogénées, exprimée en chlore, est supérieure à 1 % (MTD 38 point c), section 2.5.5.1.2). Alimenter de manière continue et constante le four en déchets (MTD 38 point d), section 2.5.5.1.2) Arrêter la coïncinération des déchets lors des phases de fonctionnement telles que le démarrage et/ou l'arrêt, lorsqu'il n'est pas possibles d'atteindre les valeurs de température et de temps de séjour appropriées qui sont indiquées dans la MTD 38 points b) et c) (MTD 38, point e), section 2.5.5.1.2). 																
Management de la sécurité lors de l'utilisation de déchets dangereux (MTD 39, section 2.5.5.1.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Appliquer des mesures de management de la sécurité pour la manutention, notamment pour le stockage et/ou l'introduction de déchets dangereux dans le four (voir section 2.4.4) (MTD 39, section 2.5.5.1.3). 																

Résumé des MTD pour l'industrie de la chaux														
Émissions diffuses de poussières (MTD 40, section 2.5.6.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Minimiser/prévenir le plus possible les émissions diffuses de poussières en appliquant une ou combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 40, points a) et b), section 2.5.6.1. 													
Émissions canalisées de poussière résultant d'opérations générant de la poussière (MTD 41, section 2.5.6.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Appliquer un système de management de l'entretien axé sur la performance des filtres équipant ces sources. Prenant en compte un tel système de management, la MTD consiste à ramener les émissions canalisées de poussières à moins de 10 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) au moyen de filtres à manches, ou à ramener ces émissions à des valeurs <10 – 20 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) au moyen de laveurs humides. Les laveurs humides sont surtout utilisés pour les installations d'hydratation de la chaux. Pour les petites sources (<10000 Nm³/h), il convient d'appliquer une approche basée sur les priorités. 													
Émissions de poussières générées par les procédés de cuisson dans le four (MTD 42, section 2.5.6.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les émissions de poussières (particules) en épurant les gaz de carneau au moyen d'un filtre (voir section 2.4.5.3). Avec des filtres à manches, le niveau d'émission associé à la MTD (NEA MTD) est inférieur à 10 mg/Nm³ en moyenne journalière. Avec des électrofiltres ou d'autres types de filtres, le niveau d'émission associé à la MTD (NEA MTD) est inférieur à 20 mg/Nm³ en moyenne journalière. Dans les cas exceptionnels où la résistivité de la poussière est élevée, le NEA MTD pourrait être plus élevé et atteindre 30 mg/Nm³ en moyenne journalière. 													
Mesures/techniques primaires générales pour réduire les effluents gazeux (MTD 43, section 2.5.7.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les effluents gazeux (NO_x, SO_x, HCl, CO, COT/COV, métaux) des gaz d'exhaure du four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques primaires énumérées dans la MTD 43, points a) à c), section 2.5.7.1. 													
Émissions de NO _x (MTD 44, 45, section 2.5.7.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la teneur en NO_x des fumées du four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 44, points a) et b), section 2.5.7.2. Les niveaux d'émission de NO_x associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type de four</th><th>Unité</th><th>NEA MTD (moyenne journalière, exprimée en NO₂)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PFRK, ASK, MFSK, OSK</td><td>mg/Nm³</td><td>100 – <350^{1) 3)}</td></tr> <tr> <td>LRK, PRK</td><td>mg/Nm³</td><td><200 – <500^{1) 2)}</td></tr> </tbody> </table> <p>¹⁾ Les valeurs les plus élevées correspondent à la production de chaux dolomitique et de chaux frittée. ²⁾ Pour les fours de type LRK et PRK produisant de la chaux frittée, la limite maximale est de 800 mg/Nm³ ³⁾ lorsque les mesures primaires indiquées au point a) I. ne sont pas suffisantes et en l'absence de mesures secondaires permettant de ramener les émissions de NO_x à 350 mg/Nm³, la limite maximale est de 500 mg/Nm³, en particulier pour la chaux frittée.</p> Lorsque la SNCR est utilisable, <ul style="list-style-type: none"> appliquer les mesures/techniques énumérées dans la MTD 45, points a) et b), section 2.5.7.2. Maintenir la fuite en NH₃ à partir des effluents gazeux à un niveau aussi faible que possible et en tout état de cause inférieur à 30¹⁾ mg/Nm³ en moyenne journalière. Il convient de considérer la corrélation entre l'efficacité de la réduction des émissions de NO_x et la fuite de NH₃ (voir section 2.4.6.1.4, Figure 2.50) (MTD 45, point c), section 2.5.7.2). <p>¹⁾ Ce NEA MTD correspond à des expériences rapportées par une installation de production de chaux (quatre fours).</p> 		Type de four	Unité	NEA MTD (moyenne journalière, exprimée en NO ₂)	PFRK, ASK, MFSK, OSK	mg/Nm ³	100 – <350 ^{1) 3)}	LRK, PRK	mg/Nm ³	<200 – <500 ^{1) 2)}			
Type de four	Unité	NEA MTD (moyenne journalière, exprimée en NO ₂)												
PFRK, ASK, MFSK, OSK	mg/Nm ³	100 – <350 ^{1) 3)}												
LRK, PRK	mg/Nm ³	<200 – <500 ^{1) 2)}												
Émissions de SO _x (MTD 46, section 2.5.7.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les émissions de SO_x des fumées du four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 46, points a) à c), section 2.5.7.3. Les niveaux d'émission de SO_x associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants: <table border="1"> <tbody> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> 													

Résumé des MTD pour l'industrie de la chaux														
Émissions de CO (MTD 47, section 2.5.7.4.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les émissions de CO en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 47, points a) et b), section 2.5.7.4.1. Les niveaux d'émissions de CO associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type de four</th><th>Unité</th><th>NEA MTD¹⁾ (moyenne journalière)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PFRK, OSK, LRK, PRK</td><td>mg/Nm³</td><td><500</td></tr> </tbody> </table> <p>¹⁾ Le niveau peut être plus élevé en fonction des matières premières utilisées et/ou du type de chaux produit, par exemple la chaux hydraulique.</p>		Type de four	Unité	NEA MTD ¹⁾ (moyenne journalière)	PFRK, OSK, LRK, PRK	mg/Nm ³	<500						
Type de four	Unité	NEA MTD ¹⁾ (moyenne journalière)												
PFRK, OSK, LRK, PRK	mg/Nm ³	<500												
Réduction du nombre d'arrêts d'urgence dus aux pics de CO (MTD 48, section 2.5.7.4.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> En cas d'utilisation d'électrofiltres, minimiser la fréquence des arrêts d'urgence dus aux pics de CO en appliquant les mesures/techniques énumérées dans la MTD 48, points a) à c), section 2.5.7.4.2. 													
Émissions de carbone organique total (MTD 49, section 2.5.7.5 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la teneur en COT des fumées du four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 49, points a) et b), section 2.5.7.5. Les niveaux d'émission de COT associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type de four</th><th>Unité</th><th>NEA MTD (moyenne sur la période d'échantillonnage)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LRK¹⁾, PRK¹⁾</td><td>mg/Nm³</td><td><10</td></tr> <tr> <td>ASK¹⁾, MFSK^{1) 2)}, PFRK²⁾</td><td>mg/Nm³</td><td><30</td></tr> </tbody> </table> <p>¹⁾ Le niveau peut être plus élevé en fonction des matières premières utilisées et/ou du type de chaux produit, par exemple la chaux hydraulique. ²⁾ Exceptionnellement, le niveau peut être plus élevé.</p>		Type de four	Unité	NEA MTD (moyenne sur la période d'échantillonnage)	LRK ¹⁾ , PRK ¹⁾	mg/Nm ³	<10	ASK ¹⁾ , MFSK ^{1) 2)} , PFRK ²⁾	mg/Nm ³	<30			
Type de four	Unité	NEA MTD (moyenne sur la période d'échantillonnage)												
LRK ¹⁾ , PRK ¹⁾	mg/Nm ³	<10												
ASK ¹⁾ , MFSK ^{1) 2)} , PFRK ²⁾	mg/Nm ³	<30												
Émissions de chlorure d'hydrogène (HCl) et de fluorure d'hydrogène (HF) (MTD 50, section 2.5.7.6 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> En cas d'utilisation de déchets, réduire les émissions de HCl et de HF en appliquant les mesures/techniques énumérées dans la MTD 50, points a) et b), section 2.5.7.6. Le NEA MTD pour le HCl est <10 mg/Nm³ en moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) et le NEA MTD pour le HF est < 1 mg/Nm³ en moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure). 													
Émissions de PCDD/F (MTD 51, section 2.5.8 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Prévenir ou réduire les émissions de PCDD/F en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques primaires énumérées dans la MTD 51, points a) à c), section 2.5.8. Les NEA MTD sont <0,05 – 0,1 ng PCDD/F I-TEQ/Nm³ en moyenne sur la période d'échantillonnage (6 à 8 heures). 													
Émissions de métaux (MTD 52, section 1.5.9 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Minimiser la teneur en métaux des fumées du four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 52, points a) à d), section 2.5.9. En cas d'utilisation de déchets, les niveaux d'émission de métaux associés à la MTD sont les suivants (NEA MTD): <table border="1"> <thead> <tr> <th>Métaux</th><th>Unité</th><th>NEA MTD (moyenne sur la période d'échantillonnage)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hg</td><td>mg/Nm³</td><td><0,05</td></tr> <tr> <td>Σ (Cd, Tl)</td><td>mg/Nm³</td><td><0,05</td></tr> <tr> <td>Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)</td><td>mg/Nm³</td><td><0,5</td></tr> </tbody> </table> <p>De faibles niveaux ont été déclarés (voir sections 2.3.3.9, 2.3.3.10.1 et 4.3.4 lors de l'application des mesures/techniques indiquées dans la MTD 52).</p>		Métaux	Unité	NEA MTD (moyenne sur la période d'échantillonnage)	Hg	mg/Nm ³	<0,05	Σ (Cd, Tl)	mg/Nm ³	<0,05	Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	mg/Nm ³	<0,5
Métaux	Unité	NEA MTD (moyenne sur la période d'échantillonnage)												
Hg	mg/Nm ³	<0,05												
Σ (Cd, Tl)	mg/Nm ³	<0,05												
Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	mg/Nm ³	<0,5												
Pertes/déchets de production (MTD 53, points a) et b), section 2.5.10 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Dans la mesure du possible, réutiliser les poussières/particules dans le procédé (MTD 53, point a), section 2.5.10). Utiliser les poussières, la chaux vive et la chaux hydratée hors spécifications pour la fabrication de certains produits commerciaux (MTD 53, point b), section 2.5.10). 													
Bruit (MTD 54, section 2.5.11 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire/minimiser les émissions sonores des procédés de fabrication de la chaux en appliquant une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 54, points a) à o), section 2.5.11. 													

Résumé des MTD pour l'industrie de la magnésie	
Management de l'environnement (MTD 55, section 3.5.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Mettre en place et adhérer à un système de management de l'environnement comprenant, le cas échéant, en fonction des conditions locales, les caractéristiques énumérées dans la MTD 55, section 3.5.1 du BREF.

Résumé des MTD pour l'industrie de la magnésie		
Mesures/techniques primaires générales (MTD 56, section 3.5.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Procéder régulièrement aux contrôles et aux mesures des paramètres du procédé et des émissions qui sont énumérés dans la MTD 56 points a) à c), section 3.5.2. 	
Consommation d'énergie MTD 57, 58, section 3.5.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la consommation d'énergie thermique dans une fourchette comprise entre 6 et 12 GJ/t en fonction du procédé et des produits, en appliquant une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 57, points a) à c), section 3.5.3. Minimiser la consommation d'électricité en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 58, points a) et b), section 3.5.3. 	
Émissions diffuses de poussières (MTD 59, section 3.5.4.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Minimiser/prévenir les émissions diffuses de poussières en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques recommandées pour les opérations générant de la poussière. 	
Émissions canalisées de poussières résultant d'opérations générant de la poussière (MTD 60, section 3.5.4.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les émissions canalisées de poussières à moins de 10 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) en épurant les effluents gazeux au moyen d'un filtre. Pour les petites sources (<10000 Nm³/h), il convient d'appliquer une approche basée sur les priorités. 	
Émissions de poussières générées par la cuisson dans le four (MTD 61, section 3.5.4.3 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les émissions de poussières (particules) des effluents gazeux résultant du procédé de cuisson dans le four à des valeurs comprises dans la fourchette <20 – 35 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) en épurant les effluents gazeux au moyen d'un filtre. 	
Mesures/techniques primaires générales pour réduire les effluents gazeux (MTD 62, section 3.5.5.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les émissions des composés gazeux (NO_x, HCl, SO_x, CO) des effluents de la cuisson dans le four en appliquant une ou une combinaison des mesures/techniques primaires énumérées dans la MTD 62, points a) à c), section 3.5.5.1. 	
Émissions de NO _x (MTD 63, section 3.5.5.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la teneur en NO_x des fumées du four à des valeurs comprises dans la fourchette <500 – <1500 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne journalière exprimée en NO₂ en appliquant une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 63, points a) et b), section 3.5.5.2. Les valeurs NEA MTD du haut de la fourchette correspondent au procédé de production de la magnésie calcinée à mort, obtenue à haute température. 	
Émissions de CO (MTD 64, section 3.5.5.3.1 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la teneur en CO des fumées du four à des valeurs comprises dans la fourchette <50 – <1 000 mg/Nm³ (NEA MTD) en moyenne journalière en appliquant une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 64, points a) à c), section 3.5.5.3.1. 	
Réduction du nombre d'arrêts d'urgence dus aux pics de CO (MTD 65, section 3.5.5.3.2 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Lors de l'utilisation d'électrofiltres, minimiser le nombre d'arrêts d'urgence dus aux pics de CO en appliquant les mesures/techniques énumérées dans la MTD 65, points a) à c), section 3.5.5.3.2. 	
Émissions de SO _x (MTD 66, section 3.5.5.4 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la teneur en SO_x des fumées du four en appliquant une combinaison des mesures/techniques primaires ou secondaires énumérées dans la MTD 66, points a) à c), section 3.5.5.4. Les niveaux d'émission de SO_x associés à la MTD (NEA MTD) sont les suivants: 	

Résumé des MTD pour l'industrie de la magnésie	
Pertes/déchets de production (MTD 67, 68, 69, section 3.5.6 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> • Dans la mesure du possible, réutiliser dans le procédé les particules recueillies (divers types de poussières de carbonate magnésium) (MTD 67, section 3.5.6). • Lorsque les divers types de poussières de carbonate de magnésium recueillies ne sont pas recyclables, utiliser si possible ces poussières pour la fabrication d'autres produits marchands (MTD 68, section 3.5.6). • Réutiliser dans le procédé ou dans d'autres secteurs les boues résultant de la désulfuration par voie humide des fumées (MTD 69, section 3.5.6).
Bruit (MTD 70, section 3.5.7 du BREF)	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire/minimiser les émissions sonores des procédés de production d'oxyde de magnésium en appliquant une combinaison des mesures/techniques énumérées dans la MTD 70, points a) à j), section 3.5.7.
Utilisation de déchets en tant que combustibles et/ou matières premières (MTD 71, section 3.5.8 du BREF).	<ul style="list-style-type: none"> • En cas d'utilisation de déchets: <ul style="list-style-type: none"> ○ choisir des déchets adaptés au procédé et au brûleur (MTD 71, point a), section 3.5.8). ○ mettre en œuvre des systèmes d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des déchets, et analyser tout déchet destiné à être utilisé au regard des critères énumérés dans la MTD 71, point b), section 3.5.8. ○ contrôler le nombre de paramètres pertinents pour tout déchet destiné à être utilisé, notamment la teneur totale en halogènes, en métaux (chrome total, plomb, cadmium, mercure, thallium, par exemple) et en soufre (MTD 71, point c), section 3.5.8).

Conclusions, recommandations, recherche et développement technique

Les conclusions et les recommandations concernant les secteurs du ciment, de la chaux et de la magnésie contiennent des informations sur les grandes étapes de l'élaboration du BREF, précisent le niveau de consensus obtenu sur les propositions de MTD pour les secteurs du ciment, de la chaux et de la magnésie et recensent les déficits d'information qui subsistent. ((Un niveau élevé de consensus a été obtenu et aucun avis divergent n'a été enregistré. Le site internet du bureau IPPC européen fournit des informations complémentaires et des conseils sur le fonctionnement de l'échange d'informations et sur la procédure de réexamen des BREF. Ne figure pas sur la version en ligne sur le site internet de Séville))

Dans le cadre de ses programmes de RDT, la Communauté européenne mène et subventionne une série de projets concernant les technologies propres, les nouvelles techniques de recyclage et de traitement des effluents et les stratégies de management en la matière. Ces projets sont susceptibles d'apporter une précieuse contribution lors des futurs réexamens des BREF. Les lecteurs sont donc invités à informer le bureau IPPC européen de tout résultat de recherche présentant de l'intérêt pour ce document (voir également la préface du BREF).

PREFACE

1. Statut du document

Sauf indication contraire, les références à « la Directive » faites dans le présent document renvoient à la Directive 2008/1/CE du Parlement européen et du Conseil relative à la prévention et au contrôle intégrés de la pollution (IPPC). La Directive IPPC s'appliquant sans préjudice des dispositions de la Communauté sur la santé et la sécurité sur le lieu de travail, il en est de même du présent document.

Le présent document fait partie d'une série de documents qui présentent les résultats d'un échange d'informations entre les États membres de l'UE et les industries concernées sur les meilleures techniques disponibles (MTD), la surveillance associée et leur évolution. * [Il est publié par la Commission européenne en application de l'article 16, paragraphe 2, de la Directive et doit donc être pris en considération, conformément à l'Annexe IV de la Directive, lors de la détermination des « meilleures techniques disponibles »].

* Note : les crochets seront supprimés une fois que la procédure de publication par la Commission sera terminée.

2. Obligations légales pertinentes de la Directive IPPC et définition des MTD

Pour aider le lecteur à comprendre le contexte légal dans lequel le présent document a été rédigé, certaines des dispositions les plus pertinentes de la Directive IPPC, y compris la définition du terme « meilleures techniques disponibles », sont décrites. Cette description n'est donnée qu'à titre d'information. Elle n'a aucune valeur légale et ne modifie, ni n'affecte de quelque manière que ce soit les dispositions effectives de la Directive IPPC.

La Directive a pour objectif la prévention et le contrôle intégrés de la pollution résultant des activités listées en Annexe I, en vue de conduire à un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble. La base légale de la Directive a trait à la protection de l'environnement. Sa mise en œuvre devrait également tenir compte d'autres objectifs communautaires, tels que la compétitivité de l'industrie de la communauté, contribuant ainsi au développement durable.

Elle prévoit plus spécifiquement un système d'autorisation pour certaines catégories d'installations, exigeant tant des opérateurs que des autorités, qu'ils adoptent une vision globale intégrée du potentiel de consommation et de pollution de l'installation. L'objectif global d'une telle approche intégrée doit être l'amélioration de la conception, du management et du contrôle tout comme du démantèlement des procédés industriels, afin d'assurer un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble. Au cœur de cette approche, figure le principe général mentionné à l'article 3, selon lequel les exploitants devraient adopter toutes les mesures préventives appropriées contre la pollution, en particulier par l'application des meilleures techniques disponibles leur permettant d'améliorer leur performance environnementale.

Le terme « meilleures techniques disponibles » est défini à l'article 2 paragraphe 12 de la Directive comme étant « le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble. » L'article 2 paragraphe 12 poursuit pour clarifier plus encore cette définition comme suit :

- par « techniques », on entend aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt ;

- par « disponibles », on entend les techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou non sur le territoire de l'État membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables ;
- par « meilleures », on entend les techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

En outre, l'Annexe IV de la Directive contient une liste de « considérations à prendre en compte en général ou dans un cas particulier lors de la détermination des meilleures techniques disponibles ... compte tenu des coûts probables et des avantages d'une mesure, et des principes de précaution et de prévention ». Ces considérations comprennent les informations publiées par la Commission en vertu de l'article 17, paragraphe 2 de la Directive.

Les autorités compétentes chargées de délivrer des autorisations doivent tenir compte des principes généraux définis à l'article 3 de la Directive lorsqu'elles définissent les conditions de l'autorisation. Ces conditions doivent comporter des valeurs limites d'émission, qui peuvent être complétées ou remplacées, le cas échéant, par des paramètres ou des mesures techniques équivalents. Conformément à l'article 9, paragraphe 4 de la Directive IPPC, ces valeurs limites d'émission, paramètres et mesures techniques équivalents doivent, sans préjudice du respect des normes sur la qualité de l'environnement, reposer sur les meilleures techniques disponibles. Elles ne doivent pas prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie spécifique, mais tenir compte des caractéristiques techniques de l'installation considérée, de son implantation géographique et des conditions locales de l'environnement. Dans tous les cas, les conditions d'autorisation doivent prévoir des dispositions relatives à la minimisation de la pollution à longue distance ou transfrontière et garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

En vertu de l'article 11 de la Directive, les États membres ont l'obligation de veiller à ce que les autorités compétentes se tiennent informées ou soient informées de l'évolution des meilleures techniques disponibles.

3. Objectif du présent document

L'article 17, paragraphe 2 de la Directive oblige la Commission à organiser un « échange d'informations entre les États membres et les industries concernées au sujet des meilleures techniques disponibles, de la surveillance associée et de leurs développements » et à publier les résultats de cet échange.

L'objet de l'échange d'informations est défini au considérant 27 de la Directive, qui prévoit que les « progrès et les échanges d'informations au niveau communautaire sur les meilleures techniques disponibles

- devraient permettre de réduire les déséquilibres au plan technologique dans la Communauté,
- devraient favoriser la diffusion au plan mondial des valeurs limites et des techniques utilisées dans la Communauté, et
- devraient aider les États membres dans la mise en œuvre efficace de la présente directive. »

La Commission (DG Environnement) a mis en place un forum d'échange d'informations (IEF) pour faciliter les travaux entrepris en application de l'article 17 paragraphe 2 de la Directive. Un certain nombre de groupes de travail techniques ont par ailleurs été créés sous les auspices de l'IEF. L'IEF comme les groupes de travail techniques sont composés de représentants des États

membres et de l'industrie, comme le prévoit l'article 17 paragraphe 2 de la Directive.

La présente série de documents, laquelle sera réexaminée et actualisée de manière continue, a pour objet de refléter précisément l'échange d'informations qui a eu lieu conformément à l'article 17 paragraphe 2 de la Directive et de fournir à l'instance chargée de la délivrance des autorisations des informations de référence dont cette dernière tiendra compte lors de la définition des conditions d'autorisation. En fournissant les informations pertinentes relatives aux meilleures techniques disponibles, ces documents devraient agir comme des outils précieux pour motiver la performance environnementale.

Sources d'informations

Le présent document est le résumé des informations recueillies à partir d'un certain nombre de sources, en particulier au travers de l'expertise des groupes mis en place pour assister la Commission dans son travail en vertu de l'article 17 paragraphe 2 de la Directive, puis vérifiées par les services de la Commission. Le travail des contributeurs et des groupes d'experts doit en être remercié avec gratitude.

4. Compréhension et utilisation du présent document

Les informations contenues dans le présent document sont prévues pour servir de base à la détermination des meilleures techniques disponibles dans certains cas particuliers. Lors de la détermination de ces meilleures techniques et de la fixation des conditions d'autorisation basées sur les MTD, l'objectif global, qui est de parvenir à un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble, ne doit jamais être perdu de vue.

Les sections ci-après décrivent le type d'informations présentées dans chacune des sections du document.

Comme le mentionne la portée du présent document, ce dernier a une structure différente de celle d'un BREF classique. Il comporte trois grands chapitres : chapitre 1 – l'industrie du ciment, chapitre 2 – l'industrie de la chaux et chapitre 3 – l'industrie de l'oxyde de magnésium en voie sèche.

A l'intérieur de ces trois chapitres, les sections standards du BREF sont organisées de la façon suivante :

- les sections 1 et 2 de chaque chapitre fournissent des informations générales sur le secteur industriel concerné et sur les processus industriels utilisés dans ce secteur ;
- la section 3 de chaque chapitre fournit des données et des informations relatives aux niveaux actuels d'émission et de consommation qui reflètent la situation dans les installations existantes au moment de la rédaction ;
- la section 4 de chaque chapitre décrit de manière plus détaillée les techniques de réduction des émissions et d'autres techniques considérées comme les plus pertinentes pour la détermination des meilleures techniques disponibles et des conditions d'autorisation fondées sur les MTD. Ces informations incluent les niveaux de consommation et d'émission qu'il est possible d'atteindre avec la technique considérée, donnent une estimation des coûts et des effets croisés avec la technique. Elles précisent dans quelle mesure la technique est applicable aux installations nécessitant des autorisations IPPC, par exemple aux installations nouvelles, existantes, modifiées, de petite ou de grande dimension. Les techniques généralement considérées comme obsolètes ne sont pas incluses ;

- la section 5 de chaque chapitre présente les techniques et les niveaux d'émission et de consommation jugés compatibles avec les meilleures techniques disponibles dans le secteur (pour de plus amples explications, le lecteur est invité à se reporter à l'introduction de la section 5 de chaque chapitre). L'objectif est d'apporter ainsi des indications générales sur les niveaux d'émission et de consommation qu'il est possible de considérer comme des valeurs de référence appropriées pour assister à la détermination de conditions d'autorisation reposant sur les meilleures techniques disponibles ou à l'établissement des prescriptions générales prévues à l'article 9, paragraphe 8 de la Directive. Il faut cependant souligner que ce document ne propose pas de valeurs limites d'émission. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de facteurs locaux inhérents au site, tels que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions locales de l'environnement. Dans le cas des installations existantes, il faut en outre tenir compte de la viabilité économique et technique de leur amélioration. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent de faire des compromis entre différents types d'impacts sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales. Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes évoqués, il ne pourra pas les traiter tous de manière exhaustive. Les techniques et niveaux présentés aux sections 1.5, 2.5 et 3.5 ne seront donc pas forcément appropriés pour toutes les installations. Par ailleurs, l'obligation de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement, y compris la réduction de la pollution à longue distance ou transfrontière, suppose que les conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base de considérations purement locales. C'est pourquoi il est de la plus haute importance que les autorités chargées de délivrer les autorisations tiennent compte de toutes les informations présentées dans le présent document ;
- la section 6 de chaque chapitre décrit les techniques émergentes.

Toutes les éventuelles observations et propositions peuvent être faites au Bureau européen IPPC de l'Institut de prospective technologique, à l'adresse suivante :

Commission européenne
Institut de prospective technologique
Edificio Expo
C/ Inca Garcilaso, 3
E-4 1092 Séville, Espagne

Téléphone : +34 95 4488 284
Fax : +34 95 4488 426
E-mail: JRC-IPTS-EIPPCB@ec.europa.eu
Internet : <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>

6. Caractère dynamique des MTD et réexamen des documents de référence sur les MTD (BREF)

Les MTD sont un concept dynamique. En effet, de nouvelles mesures et/ou techniques peuvent apparaître, les technologies sont en constante évolution et de nouveaux procédés environnementaux réussissent à percer dans l'industrie. Au fur et à mesure que les éléments des MTD évoluent avec le temps et que l'industrie se développe, les BREF doivent être réexaminés et actualisés tel que nécessaire.

Le premier BREF sur le ciment et la chaux avait été adoptée par la Commission européenne en 2001. Le présent document est le fruit du premier réexamen de ce BREF.

Document de référence sur les meilleures techniques disponibles dans l'industrie de fabrication du ciment, de la chaux et de l'oxyde de magnésium

RESUME I

PREFACE XI

PORTEE..... XXXI

1 INDUSTRIE DU CIMENT.....

1.1	Informations générales sur l'industrie du ciment.....	
1.2	Procédés et techniques de fabrication du ciment.....	
1.2.1	Les matières premières et leur extraction.....	
1.2.2	Matières premières – stockage et préparation.....	
1.2.2.1	Stockage des matières premières.....	
1.2.2.2	Broyage des matières premières.....	
1.2.2.2.1	Broyage des matières premières pour procédés en voie sèche et semi-sèche.....	
1.2.2.2.2	Broyage des matières premières préparées en voie humide ou semi-humide.....	
1.2.2.2.3	Homogénéisation et stockage du cru ou de la pâte.....	
1.2.3	Stockage et préparation de combustibles.....	
1.2.3.1	Stockage des combustibles conventionnels.....	
1.2.3.2	Préparation des combustibles conventionnels.....	
1.2.4	Utilisation des déchets.....	
1.2.4.1	Généralités.....	
1.2.4.2	Utilisation des déchets comme matières premières.....	
1.2.4.3	Utilisation des déchets comme combustibles.....	
1.2.4.3.1	Types de déchets combustibles.....	
1.2.4.3.1.1	Déchets combustibles solides.....	
1.2.4.3.1.2	Déchets combustibles liquides.....	
1.2.4.3.2	Exigences de qualité des déchets et contrôle des matières entrantes.....	
1.2.4.3.2.1	Concentrations en métaux des déchets.....	
1.2.4.3.3	Stockage et manutention des déchets.....	
1.2.5	Cuisson du clinker.....	
1.2.5.1	Chauffe du four.....	
1.2.5.2	Fours longs rotatifs.....	
1.2.5.3	Fours rotatifs avec préchauffeurs.....	
1.2.5.3.1	Technique des préchauffeurs à grilles.....	
1.2.5.3.2	Technique des préchauffeurs à suspension.....	
1.2.5.3.3	Préchauffeurs droits.....	
1.2.5.3.4	Préchauffeur à quatre étages de cyclones.....	
1.2.5.4	Fours rotatifs avec préchauffeur et précalcinateur.....	
1.2.5.4.1	Systèmes de dérivation.....	
1.2.5.5	Fours verticaux.....	
1.2.5.6	Gaz résiduels des fours.....	
1.2.5.6.1	Pics de CO.....	
1.2.5.7	Refroidisseurs à clinker.....	
1.2.5.7.1	Refroidisseurs rotatifs.....	
1.2.5.7.1.1	Refroidisseurs tubulaires.....	
1.2.5.7.1.2	Refroidisseurs planétaires (ou à satellites).....	
1.2.5.7.2	Refroidisseurs à grilles.....	
1.2.5.7.2.1	Refroidisseurs à grille mobile.....	
1.2.5.7.2.2	Refroidisseurs à grille de retournement.....	
1.2.5.7.2.3	Refroidisseurs à grilles de troisième génération.....	
1.2.5.7.3	Refroidisseurs verticaux.....	
1.2.5.8	Cogénération.....	
1.2.6	Broyage et stockage du ciment.....	
1.2.6.1	Stockage du clinker.....	
1.2.6.2	Broyage du ciment.....	
1.2.6.2.1	Pesage et dosage des matériaux broyés.....	
1.2.6.2.2	Broyage du ciment.....	
1.2.6.2.3	Broyage des additions minérales.....	
1.2.6.2.4	Séparation en fonction de la répartition granulométrique.....	
1.2.6.2.5	Réduction des chromates – chrome (VI).....	
1.2.6.3	Stockage du ciment.....	
1.2.7	Conditionnement et expédition.....	
1.3	Consommation d'énergie et niveaux d'émission.....	
1.3.1	Consommation d'eau.....	
1.3.2	Consommation de matières premières.....	
1.3.2.1	Consommation de déchets comme matières premières.....	
1.3.3	Utilisation de l'énergie.....	
1.3.3.1	Besoins en énergie thermique.....	
1.3.3.2	Besoins en énergie électrique.....	
1.3.3.3	Consommation de déchets combustibles.....	

1.3.4	Emissions dans l'air	
1.3.4.1	Poussières (particules)	
1.3.4.1.1	Emissions de poussières canalisées	
1.3.4.1.2	Emissions de poussières fines PM10 et PM2.5	
1.3.4.1.3	Emissions de poussières diffuses.....	
1.3.4.2	Oxydes d'azote	
1.3.4.3	Dioxyde de soufre	
1.3.4.4	Oxydes de carbone (CO ₂ , CO)	
1.3.4.4.1	Dioxyde de carbone (CO ₂)	
1.3.4.4.2	Monoxyde de carbone (CO)	
1.3.4.5	Composés organiques totaux (TOT)	
1.3.4.6	Polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzofuranes (PCDF)	
1.3.4.7	Métaux et leurs composés	
1.3.4.7.1	Mercure	
1.3.4.8	Chlorure d'hydrogène et fluorure d'hydrogène (HCl et HF)	
1.3.4.8.1	Composés chlorés inorganiques gazeux	
1.3.4.8.2	Composés fluorés inorganiques gazeux.....	
1.3.4.9	Ammoniac (NH ₃)	
1.3.4.10	Benzène, toluène, éthylbenzène et xylène (BTEX).....	
1.3.4.11	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HPA).....	
1.3.4.12	Autres polluants organiques.....	
1.3.4.13	Impacts de l'utilisation des déchets sur le comportement des émissions et l'efficacité énergétique.....	
1.3.4.14	Impacts de l'utilisation des déchets sur la qualité des produits	
1.3.5	Pertes/déchets de traitement	
1.3.6	Emissions dans l'eau	
1.3.7	Bruit.....	
1.3.8	Odeurs	
1.3.9	Surveillance	
1.3.9.1	Surveillance des paramètres et des émissions	
1.4	Techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD.....	
1.4.1	Consommation de matières premières	
1.4.2	Réduction de la consommation d'énergie (efficacité énergétique)	
1.4.2.1	Réduction de l'utilisation d'énergie thermique	
1.4.2.1.1	Fours.....	
1.4.2.1.2	Propriétés des matières premières	
1.4.2.1.3	Propriétés des combustibles	
1.4.2.1.4	Système de dérivation des gaz.....	
1.4.2.1.5	Réduction de la teneur en clinker des ciments.....	
1.4.2.2	Réduction de l'utilisation d'énergie électrique	
1.4.2.3	Choix du procédé	
1.4.2.4	Récupération de l'énergie des fours et des refroidisseurs /cogénération	
1.4.3	Techniques générales.....	
1.4.3.1	Optimisation de la conduite des fours.....	
1.4.3.2	Choix des combustibles et des matières premières	
1.4.3.3	Utilisation des déchets comme combustibles.....	
1.4.4	Emissions de poussières (particules)	
1.4.4.1	Mesures et/ou techniques pour les opérations génératrices de poussières	
1.4.4.2	Mesures et/ou techniques pour les zones de stockage en vrac et les stocks	
1.4.4.3	Réduction des émissions de poussières canalisées.....	
1.4.4.3.1	Filtres électrostatiques	
1.4.4.3.2	Filtres à manches	
1.4.4.3.3	Filtres hybrides	
1.4.5	Composés gazeux	
1.4.5.1	Réduction des émissions de la NO _x	
1.4.5.1.1	Refroidissement de flamme	
1.4.5.1.2	Brûleurs bas NO _x	
1.4.5.1.3	Combustion étagée	
1.4.5.1.4	Cuisson en milieu de four.....	
1.4.5.1.5	Clinker minéralisé	
1.4.5.1.6	Optimisation du procédé (NO _x).....	
1.4.5.1.7	Réduction sélective non catalytique (SNCR)	
1.4.5.1.8	Réduction sélective catalytique (SCR)	
1.4.5.2	Réduction des émissions de SO ₂	
1.4.5.2.1	Addition d'absorbants	
1.4.5.2.2	Epurateur en voie humide.....	
1.4.5.2.3	Charbon actif	
1.4.5.3	Réduction des émissions d'oxydes de carbone (CO) et pics de CO	
1.4.5.4	Réduction des émissions de carbone organique total (COT)	
1.4.5.5	Réduction du chlorure d'hydrogène (HCl) et du fluorure d'hydrogène (HF)	
1.4.6	Réduction des émissions de polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et de polychlorodibenzofuranes (PCDF).....	
1.4.7	Réduction des émissions de métaux	

1.4.8	Exemples de données financières relatives à différentes mesures/techniques de réduction des gaz résiduels et à des mesures/techniques primaires pouvant être utilisées pour réduire les émissions
1.4.8.1	Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des poussières
1.4.8.2	Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des NO _x
1.4.8.3	Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des SO _x
1.4.9	Pertes et/ou déchets de traitement
1.4.10	Bruit
1.4.11	Considérations générales à propos des odeurs
1.4.12	Outils de management environnemental
1.5	Meilleures techniques disponibles dans l'industrie du ciment
1.5.1	Systèmes de management environnemental (SME)
1.5.2	Mesures/techniques primaires générales
1.5.3	Consommation d'énergie et choix du procédé
1.5.3.1	Choix du procédé
1.5.3.2	Consommation d'énergie
1.5.4	Utilisation des déchets
1.5.4.1	Contrôle de la qualité des déchets
1.5.4.2	Introduction des déchets dans le four
1.5.4.3	Gestion de la sécurité pour l'utilisation de déchets dangereux
1.5.5	Emissions de poussières
1.5.5.1	Emissions de poussières diffuses
1.5.5.2	Emissions de poussières canalisées provenant d'opérations génératrices de poussières
1.5.5.3	Emissions de poussières provenant des procédés de chauffe du four
1.5.5.4	Emissions de poussières provenant des procédés de refroidissement et de broyage
1.5.6	Composés gazeux
1.5.6.1	Emissions de NO _x
1.5.6.2	Emissions de SO _x
1.5.6.3	Emissions de CO et pics de CO
1.5.6.3.1	Réduction des pics de CO
1.5.6.4	Emissions de carbone organique total (COT)
1.5.6.5	Emissions de chlorure d'hydrogène (HCl) et de fluorure d'hydrogène (HF)
1.5.7	Emissions de PCDD/F
1.5.8	Emissions de métaux
1.5.9	Pertes/déchets de traitement
1.5.10	Bruit
1.6	Techniques émergentes dans l'industrie du ciment
1.6.1	Fabrication du ciment par la technique du lit fluidisé
1.6.2	Combinaison de la combustion étagée et de la SNCR
1.6.3	Traitement des gaz résiduels d'un four à ciment au bicarbonate de sodium sec et réutilisation des produits chimiques
1.7	Conclusions et recommandations
2	INDUSTRIE DE LA CHAUX
2.1	Informations générales sur l'industrie de la chaux
2.1.1	La chaux et ses applications
2.1.2	Production mondiale de chaux
2.1.3	Répartition géographique et considérations économiques générales en Europe – principaux indicateurs
2.1.3.1	Production annuelle
2.1.3.2	Questions essentielles sur l'environnement et le développement durable
2.1.3.3	Type de chaux et de chaux dolomitique
2.1.3.4	Installations de fabrication de chaux
2.2	Techniques et procédés utilisés pour la fabrication de la chaux
2.2.1	Description générale du procédé de production
2.2.2	Matières premières et extraction du calcaire
2.2.3	Préparation, nettoyage et stockage du calcaire
2.2.3.1	Préparation du calcaire
2.2.3.2	Stockage du calcaire
2.2.3.3	Lavage du calcaire
2.2.4	Combustibles – préparation et stockage
2.2.5	Utilisation des déchets
2.2.5.1	Généralités
2.2.5.2	Considérations techniques
2.2.5.3	Types de déchets combustibles utilisés
2.2.5.4	Contrôle qualité des déchets combustibles solides
2.2.6	Production de chaux vive et de dolomie
2.2.6.1	Calcination du calcaire – réaction chimique
2.2.6.2	Calcination du calcaire dans le four
2.2.6.3	Traitement de la chaux vive
2.2.6.3.1	Production de chaux vive broyée
2.2.6.4	Production de chaux éteinte et/ou hydratée
2.2.6.4.1	Production de chaux hydratée
2.2.6.4.2	Production de lait de chaux et de chaux en pâte

2.2.7	Types de fours à chaux – techniques et conception	
2.2.7.1	Four vertical à alimentation mixte	
2.2.7.2	Four vertical à cycles alternés	
2.2.7.3	Fours verticaux annulaires	
2.2.7.4	Autres fours	
2.2.7.4.1	Autres fours verticaux simples	
2.2.7.4.2	Fours verticaux à double chambre inclinée	
2.2.7.4.3	Fours verticaux à plusieurs chambres	
2.2.7.4.4	Fours à grilles mobiles	
2.2.7.4.5	Fours avec mise en forme au sommet	
2.2.7.4.6	Fours de calcination avec mise en suspension par le gaz	
2.2.7.4.7	Fours à sole rotative	
2.2.7.5	Fours longs rotatifs	
2.2.7.6	Fours rotatifs avec préchauffeurs	
2.2.8	Stockage et manutention	
2.2.8.1	Stockage	
2.2.8.1.1	Stockage de la chaux vive	
2.2.8.1.2	Stockage de la chaux hydratée	
2.2.8.1.3	Stockage du lait de chaux	
2.2.8.2	Manutention	
2.2.9	Autres types de chaux	
2.2.9.1	Production de chaux hydrauliques	
2.2.9.2	Production de dolomie calcinée	
2.2.10	Considérations générales sur les fours à chaux intégrés	
2.2.10.1	Les fours à chaux dans la sidérurgie	
2.2.10.2	Les fours à chaux dans la fabrication des pâtes à papier selon le procédé Kraft	
2.2.10.3	Les fours à chaux dans l'industrie sucrière	
2.3	Consommation d'énergie et niveaux d'émission	
2.3.1	Consommation de pierre à chaux	
2.3.2	Utilisation d'énergie	
2.3.2.1	Calcination du calcaire	
2.3.2.2	Hydratation de la chaux	
2.3.2.3	Broyage de la chaux	
2.3.3	Emissions dans l'air	
2.3.3.1	Poussières (PM)	
2.3.3.1.1	Emissions de poussières canalisées	
2.3.3.1.2	Emissions de poussières diffuses	
2.3.3.2	Oxydes d'azote	
2.3.3.3	Dioxyde de soufre	
2.3.3.4	Oxydes de carbone (CO _x)	
2.3.3.4.1	Dioxyde de carbone (CO ₂)	
2.3.3.4.2	Monoxyde de carbone (CO)	
2.3.3.5	Composés organiques / carbone organique total (COT)	
2.3.3.6	Polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzofuranes (PCDF)	
2.3.3.7	Chlorure d'hydrogène et fluorure d'hydrogène (HCl et HF)	
2.3.3.8	Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	
2.3.3.9	Métaux	
2.3.3.10	Impact de l'utilisation de déchets sur le comportement des émissions	
2.3.3.10.1	Exemples d'émissions dans l'utilisation d'huiles usagées	
2.3.3.10.2	Exemples d'émissions liées à l'utilisation de déchets solides dans des fours rotatifs	
2.3.4	Pertes/déchets de traitement	
2.3.5	Utilisation et purification de l'eau	
2.3.6	Bruit	
2.3.7	Odeurs	
2.3.8	Surveillance	
2.3.8.1	Mesures en continu	
2.3.8.2	Mesures périodiques	
2.4	Techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD	
2.4.1	Consommation de pierre à chaux	
2.4.2	Réduction de la consommation d'énergie (efficacité énergétique)	
2.4.3	Optimisation du contrôle de procédé	
2.4.4	Choix des combustibles (y compris les déchets combustibles)	
2.4.5	Emissions de poussières (matière particulaire)	
2.4.5.1	Mesures/techniques pour les opérations génératrices de poussières	
2.4.5.2	Mesures/techniques pour les zones de stockage en vrac et les stocks	
2.4.5.3	Réduction des émissions de poussières canalisées	
2.4.5.3.1	Filtres électrostatiques (ESP)	
2.4.5.3.2	Filtres à manches	
2.4.5.3.3	Séparateurs de poussières par voie humide	
2.4.5.3.4	Séparateurs centrifuges/cyclones	
2.4.5.3.5	Exemples de données de coût pour les différentes techniques de nettoyage des gaz résiduels	

2.4.6	Composés gazeux	
2.4.6.1	Réduction des émissions de NO _x	
2.4.6.1.1	Optimisation du procédé	
2.4.6.1.2	Etagement de l'air	
2.4.6.1.3	Brûleurs bas NO _x	
2.4.6.1.4	Réduction sélective non catalytique (SNCR)	
2.4.6.1.5	Réduction sélective catalytique (SCR)	
2.4.6.2	Réduction des émissions de SO ₂	
2.4.6.3	Réduction des émissions de CO	
2.4.6.4	Réduction des émissions de carbone organique total (COT)	
2.4.6.5	Réduction du chlorure d'hydrogène (HCl) et du fluorure d'hydrogène (HF)	
2.4.7	Réduction des émissions de polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et de polychlorodibenzofuranes (PCDF)	
2.4.8	Réduction des émissions de métaux	
2.4.9	Pertes/déchets de traitement	
2.4.9.1	Considérations générales concernant la réutilisation des pertes/déchets de traitement solides en tant que matière première	
2.4.10	Bruit	
2.4.11	Considérations générales à propos des odeurs	
2.4.12	Outils de management environnemental	
2.5	Meilleures techniques disponibles pour l'industrie de la chaux	
2.5.1	Système de management environnemental (SME)	
2.5.2	Mesures/techniques primaires générales	
2.5.3	Consommation d'énergie	
2.5.4	Consommation de calcaire	
2.5.5	Choix des combustibles	
2.5.5.1	Utilisation des déchets combustibles	
2.5.5.1.1	Contrôle de la qualité des déchets	
2.5.5.1.2	Alimentation du four en déchets	
2.5.5.1.3	Gestion de la sécurité pour l'utilisation de déchets dangereux	
2.5.6	Emissions de poussières	
2.5.6.1	Emissions de poussières diffuses	
2.5.6.2	Emissions de poussières canalisées provenant d'opérations génératrices de poussières	
2.5.6.3	Emissions de poussières provenant des procédés de cuisson des fours	
2.5.7	Composés gazeux	
2.5.7.1	Mesures/techniques primaires générales de réduction des composés gazeux	
2.5.7.2	Emissions de NO _x	
2.5.7.3	Emissions de SO _x	
2.5.7.4	Emissions de CO et pics de CO	
2.5.7.4.1	Emissions de CO	
2.5.7.4.2	Réduction des pics de CO	
2.5.7.5	Emissions de carbone organique total (COT)	
2.5.7.6	Emissions de chlorure d'hydrogène (HCl) et de fluorure d'hydrogène (HF)	
2.5.8	Emissions de PCDD/F	
2.5.9	Emissions de métaux	
2.5.10	Pertes/déchets de traitement	
2.5.11	Bruit	
2.6	Techniques émergentes dans le secteur de la chaux	
2.6.1	Calcination en lit fluidisé	
2.6.2	Four à calcination rapide avec préchauffeur	
2.6.3	Filtres en céramique	
2.6.4	Post-combustion des gaz résiduels des fours verticaux à alimentation mixte	
2.7	Conclusions et recommandations	
3	INDUSTRIE DE L'OXYDE DE MAGNESIUM (EN VOIE SECHE A PARTIR DE MAGNESITE NATURELLE EXTRAITE)	
3.1	Informations générales	
3.1.1	Introduction	
3.1.2	L'industrie de la magnésite à travers le monde et en Europe	
3.1.2.1	Types de produits à base d'oxyde de magnésium (magnésie)	
3.1.2.1.1	Magnésie	
3.1.2.1.1.1	Magnésie clinkérisée/surcuite	
3.1.2.1.1.2	Magnésie calcinée caustique	
3.1.2.1.1.3	Magnésie fondue	
3.1.3	Utilisation de la magnésie	
3.2	Procédés et techniques appliqués	
3.2.1	Matières premières et préparation	
3.2.1.1	Magnésite	
3.2.2	Combustibles	
3.2.3	Description générale du procédé de production de magnésie à partir de magnésite (magnésie naturellement clinkérisée/surcuite)	
3.2.3.1	Procédés de cuisson	
3.2.3.1.1	Procédé de cuisson directe (cuisson en une seule phase)	
3.2.3.1.1.1	Préparation du « clinker brut »	
3.2.3.1.2	Procédé de cuisson en deux phases	

3.2.3.2	Types de fours– techniques et conception	
3.2.3.2.1	Fours rotatifs	
3.2.3.2.1.1	Fours rotatifs avec préchauffeur.....	
3.2.3.2.1.2	Fours longs rotatifs	
3.2.3.2.2	Fours verticaux	
3.2.3.2.2.1	Fours verticaux avec plaque rotative.....	
3.2.3.2.2.2	Fours verticaux avec grille rotative.....	
3.2.3.2.2.3	Four à double chambre.....	
3.2.4	Production de magnésie fondue.....	
3.3	Consommation d'énergie et niveaux d'émission	
3.3.1	Consommation de matières premières (magnésite non traitée) et d'eau	
3.3.2	Consommation d'énergie	
3.3.3	Emissions	
3.3.3.1	Emissions dans l'air.....	
3.3.3.2	Pertes/déchets de traitement.....	
3.3.3.3	Emissions dans l'eau	
3.3.3.4	Bruit	
3.3.4	Surveillance	
3.4	Techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD	
3.4.1	Considérations générales concernant la consommation de matières premières.....	
3.4.2	Considérations générales concernant l'eau	
3.4.3	Réduction de la consommation d'énergie (efficacité énergétique)	
3.4.4	Optimisation de la conduite	
3.4.5	Choix du combustible	
3.4.6	Emissions de poussières (matières particulaires).....	
3.4.6.1	Mesures/techniques pour les opérations génératrices de poussières	
3.4.6.2	Réduction des émissions de poussières canalisées.....	
3.4.6.2.1	Précipitateurs électrostatiques (ESP).....	
3.4.6.2.2	Séparateurs centrifuges/cyclones.....	
3.4.6.2.3	Séparateurs de poussières par voie humide	
3.4.6.2.4	Filtres à manches	
3.4.7	Composés gazeux	
3.4.7.1	Réduction des émissions de NO _x	
3.4.7.2	Réduction des émissions de CO.....	
3.4.7.3	Réduction des émissions de SO ₂	
3.4.8	Considérations générales concernant les pertes/déchets de traitement	
3.4.9	Bruit.....	
3.4.10	Outils de management environnemental	
3.5	Meilleures techniques disponibles pour la fabrication d'oxyde de magnésium en utilisant le procédé en voie sèche à partir de magnésite naturelle extraite en carrière.....	
3.5.1	Système de management environnemental (SME)	
3.5.2	Mesures/techniques primaires générales – Surveillance.....	
3.5.3	Consommation d'énergie	
3.5.4	Emissions de poussières	
3.5.4.1	Emissions de poussières diffuses	
3.5.4.2	Emissions de poussières canalisées provenant d'opérations génératrices de poussières	
3.5.4.3	Emissions de poussières provenant des procédés de chauffe du four	
3.5.5	Composés gazeux	
3.5.5.1	Mesures/techniques primaires générales de réduction des composés gazeux	
3.5.5.2	Emissions de NO _x	
3.5.5.3	Emissions de CO et pics de CO	
3.5.5.3.1	Emissions de CO	
3.5.5.3.2	Réduction des pics de CO.....	
3.5.5.4	Emissions de SO _x	
3.5.6	Pertes/déchets de traitement	
3.5.7	Bruit.....	
3.5.8	Utilisation des déchets comme combustibles et/ou comme matières premières.....	
3.6	Techniques émergentes	
3.7	Conclusions et recommandations	

REFERENCES

GLOSSAIRE DES TERMES ET DES ABREVIATIONS.....

4 ANNEXES.....

4.1	Législation sur l'environnement (CE) applicable à la production de ciment et de chaux dans l'UE des 27	
4.2	Annexe : fabrication du ciment	
4.2.1	Regroupements des déchets combustibles selon le CEMBUREAU et selon le CED	
4.2.2	Fabrication du ciment – données spécifiques aux usines.....	
4.2.2.1	Exemples de types de déchets utilisés, influence sur les émissions et concentrations de substances dans les déchets (critères d'entrée)	
4.2.2.1.1	Exemples de concentrations de substances dans les déchets/critères d'entrée des déchets.....	
4.2.2.2	Exemples de consommation d'énergie	
4.2.2.3	Exemples de données sur les émissions	

4.2.3	Fabrication du ciment – cogénération/récupération de l’excédent de chaleur
4.2.3.1	Cogénération d’énergie électrique à l’aide du procédé à cycle à vapeur conventionnel – cimenterie suédoise de Slite
4.2.3.2	Cogénération à l’aide du procédé à cycle organique de Rankine (ORC) – cimenterie située à Lengfurt, en Allemagne
4.2.4	Fabrication du ciment – exemples de réduction des NO _x en utilisant une technique SNCR très efficace
4.2.4.1	Exemple de technique SNCR utilisée en Suède.....
4.2.4.2	Exemple de technique SNCR utilisée en Allemagne
4.2.5	Fabrication du ciment – exemple de réduction des NO _x en utilisant la technique SCR
4.2.6	Fabrication du ciment – contrôle des pics de CO
4.2.6.1	Objectifs de réduction des interruptions de service – pics de CO.....
4.2.6.2	Système de surveillance du CO
4.2.6.3	Système de surveillance du CO
4.2.6.4	Actions à mettre en œuvre en cas de pic de CO.....
4.2.6.5	CO et CH ₄ dans les filtres à manches.....
4.3	Annexe : fabrication de la chaux
4.3.1	Fabrication de la chaux – répartition des concentrations en métal dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l’UE des 27
4.3.2	Fabrication de la chaux – données spécifiques aux usines
4.3.2.1	Exemples de caractéristiques des matières premières
4.3.2.2	Utilisation des déchets comme combustibles – exemples de teneurs en polluants acceptables dans les déchets
4.3.2.3	Exemples de données sur les consommations et émissions
4.3.3	Fabrication de la chaux – exemple de manipulation d’huiles usagées dans un four vertical (et d’autres fours)
4.3.4	Fabrication de la chaux – exemple de contrôle qualité des déchets combustibles solides brûlés dans les fours rotatifs
4.3.5	Fabrication de la chaux – exemple d’élimination des NO _x en utilisant la technique SNCR dans les fours rotatifs à préchauffeur (PRK)

Liste des figures

Figure 1.1 :	Production de ciment dans l'UE des 27 et dans le monde de 1950 à 2006
Figure 1.2 :	Estimation de l'évolution de l'emploi dans l'industrie du ciment de l'Union européenne de 1975 à 2005
Figure 1.3 :	Production de ciment, clinker d'exportation compris, et consommation de ciment dans l'UE des 25
Figure 1.4 :	Vue d'ensemble d'un procédé de fabrication de ciment.....
Figure 1.5 :	Exemple de hall de stockage de matières premières
Figure 1.6 :	Diagramme ternaire CaO , SiO_2 et $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ du clinker et des cendres des différents combustibles et matières premières.....
Figure 1.7 :	Déchets dangereux – Sciure de bois imprégnée
Figure 1.8 :	Déchets combustibles spéciaux à base de papier, de matières plastiques, de textiles
Figure 1.9 :	Déchets ménagers spéciaux utilisés comme combustible dans les fours à ciment
Figure 1.10 :	Vue schématique d'un four équipé d'un préchauffeur/précalcinateur/refroidisseur à grilles ...
Figure 1.11 :	Exemple de brûleur multicanal.....
Figure 1.12 :	Préchauffeur à grilles.....
Figure 1.13 :	Préchauffeur à suspension
Figure 1.14 :	Préchauffeur à suspension équipé d'un précalcinateur
Figure 1.15 :	Profils des températures des gaz et des solides dans un four avec préchauffeur à cyclones ...
Figure 1.16 :	Exemple de tirage inversé avec séparation ligne / calcinateur
Figure 1.17 :	Exemple de points d'alimentation en déchets d'un calcinateur
Figure 1.18 :	Exemple de refroidisseur planétaire
Figure 1.19 :	Bilan massique pour la production de 1 kg de ciment en voie sèche
Figure 1.20 :	Déchets utilisés comme matières premières dans 20 pays de l'UE des 27
Figure 1.21 :	Consommation d'énergie thermique dans l'industrie du ciment de l'UE des 25 en 2004
Figure 1.22 :	Consommation des différents types de déchets dangereux et non dangereux utilisés comme combustible dans les fours à ciment de l'UE des 27
Figure 1.23 :	Plages des valeurs des émissions de poussières mesurées en continu dans le gaz épuré de 253 fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.24 :	Valeurs des émissions de poussières obtenues lors de 180 mesures ponctuelles de poussières effectuées dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.25 :	Emissions de NO_x (exprimées en NO_2) par les fours de cimenteries des pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ en 2004, classées par catégorie selon le taux de substitution.....
Figure 1.26 :	Répartition des mesures par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de NO_x
Figure 1.27 :	Plages des émissions de NO_x obtenues par l'utilisation du refroidissement de la flamme dans plusieurs cimenteries de l'UE des 23+
Figure 1.28 :	Plages des émissions de NO_x obtenues par plusieurs cimenteries de l'UE des 23+ n'utilisant pas le refroidissement de la flamme.....
Figure 1.29 :	Emissions de NO_x obtenues par plusieurs cimenteries utilisant la SNCR pour réduire les émissions de NO_x
Figure 1.30 :	Plages des émissions de NO_x obtenues par plusieurs cimenteries sans utiliser la SNCR.....
Figure 1.31 :	Schéma de principe du soufre dans un four de cimenterie avec préchauffeur / précalcinateur
Figure 1.32 :	Valeurs des émissions de SO_2 mesurées dans le gaz épuré de cimenteries des pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.33 :	Répartition des mesures classées par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de SO_2
Figure 1.34 :	Valeurs de concentration des émissions de CO mesurées dans le gaz épuré de 29 fours rotatifs allemands en 2004.....
Figure 1.35 :	Emissions de COT mesurées en continu dans le gaz épuré de fours à ciment dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+.....
Figure 1.36 :	Répartition des mesures en continu par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de COT
Figure 1.37 :	Valeurs de concentration des émissions de carbone organique total mesurées dans le gaz épuré de 27 fours rotatifs allemands en 2004.....
Figure 1.38 :	Emissions de PCDD/F dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ en 2004, par catégorie selon le taux de substitution thermique.....
Figure 1.39 :	Répartition des mesures ponctuelles par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de PCDD/F des fours à ciment dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+

Figure 1.40 :	Emissions de PCDD/F mesurées dans le gaz épuré de 39 fours rotatifs allemands en 2004 [76, Allemagne, 2006]
Figure 1.41 :	Parcours des métaux dans des fours à ciment équipés de préchauffeurs en voie sèche
Figure 1.42 :	Valeurs des émissions de cadmium et de thallium obtenues lors de 262 mesures ponctuelles de Σ (Cd, Tl) effectuées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.43 :	Répartition des mesures par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de Σ (Cd, Tl).....
Figure 1.44 :	Valeurs des émissions obtenues lors de mesures ponctuelles de Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V) dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.45 :	Répartition des mesures par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V).....
Figure 1.46 :	Valeurs des émissions de mercure obtenues lors de 306 mesures ponctuelles de Hg effectuées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.47 :	Valeurs des émissions de mercure obtenues lors de 306 mesures ponctuelles de Hg effectuées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.48 :	Valeurs des émissions de HCl mesurées en continu dans le gaz épuré de 98 fours à ciment dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.49 :	Répartition des mesures de HCl en continu par catégorie selon le taux de substitution thermique.....
Figure 1.50 :	Valeurs des émissions obtenues lors de 233 mesures ponctuelles effectuées dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.51 :	Répartition des mesures ponctuelles de HCl par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de HCl
Figure 1.52 :	Emissions de composés chlorés inorganiques gazeux, exprimées en HCl, mesurées dans le gaz épuré de 38 fours rotatifs allemands en 2004.....
Figure 1.53 :	Valeurs des émissions de HF mesurées en continu dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.54 :	Répartition des mesures en continu des émissions de HF par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de HF
Figure 1.55 :	Valeurs des émissions de HF mesurées ponctuellement dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Figure 1.56 :	Répartition des mesures ponctuelles de HF par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de HF
Figure 1.57 :	Emissions de composés fluorés inorganiques gazeux, exprimées en HF, mesurées dans le gaz épuré de 38 fours rotatifs allemands en 2004
Figure 1.58 :	Emissions d'ammoniac d'une cimenterie suédoise équipée d'un épurateur de SO_x
Figure 1.59 :	Concentrations des émissions de benzène mesurées dans 17 fours rotatifs allemands.....
Figure 1.60 :	Exemple de filtre à manches et de matière filtrante utilisés dans une cimenterie du Royaume-Uni
Figure 1.61 :	Filtre hybride pour la collecte des poussières
Figure 1.62 :	Méthodes d'injection employées pour le refroidissement de la flamme en cimenterie dans les pays de l'UE des 23+
Figure 1.63 :	Caractéristiques d'installation incluant le refroidissement de la flamme dans les pays de l'UE des 23+
Figure 1.64 :	Caractéristiques des cimenteries utilisant la SNCR dans les pays de l'UE des 23+
Figure 1.65 :	Porteurs d'azote/agents $\text{NH}_2\text{-X}$ utilisés par la SNCR dans les pays de l'UE des 23+
Figure 1.66 :	Exemple d'installation SCR.....
Figure 1.67 :	Exemple de catalyseur individuel utilisé dans la technique SCR
Figure 1.68 :	Exemple de position d'un module dans l'unité de SCR
Figure 1.69 :	Caractéristiques de fonctionnement élémentaires d'un épurateur en voie humide
Figure 1.70 :	Amélioration continue dans un modèle de SME
Figure 1.71 :	Four à ciment à lit fluidisé.....
Figure 2.1 :	Production de chaux et de dolomie dans l'UE des 27 en 2004
Figure 2.2 :	Production de chaux commerciale par type de four dans l'UE des 27 en 2004
Figure 2.3 :	Production de dolime commerciale par type de four dans l'UE des 27 en 2004.....
Figure 2.4 :	Production de dolime commerciale surcuite par type de four dans l'UE des 27 en 2004.....
Figure 2.5 :	Vue d'ensemble du procédé de fabrication de chaux
Figure 2.6 :	Schéma de principe des principales étapes de la fabrication de la chaux
Figure 2.7 :	Vue d'ensemble d'un procédé de fabrication de chaux
Figure 2.8 :	Schéma de principe du lavage du calcaire et de la purification de l'eau de lavage

Figure 2.9 :	Types de combustibles utilisés pour le procédé de cuisson des fours à chaux en 2005 dans l'UE des 27
Figure 2.10 :	Schéma de principe d'un exemple de système de dosage pour four vertical
Figure 2.11 :	Exemple de système de dosage pour four vertical.....
Figure 2.12 :	Quantité de chaux produite à l'aide de déchets combustibles dans différents pays européens.....
Figure 2.13 :	Répartition des fours à chaux utilisant des déchets combustibles dans différents pays européens.....
Figure 2.14 :	Vue de face d'un brûleur multicanaux dans un four rotatif
Figure 2.15 :	Schéma d'un brûleur dans un four rotatif.....
Figure 2.16 :	Evolution de la réactivité en fonction de la température de cuisson et du type de calcaire.....
Figure 2.17 :	Morphologie de la chaux douce, moyenne et dure
Figure 2.18 :	Principes généraux de calcination de la chaux
Figure 2.19 :	Schéma de principe d'un hydrateur à chaux
Figure 2.20 :	Principe de fonctionnement d'un four vertical à alimentation mixte
Figure 2.21 :	Four vertical à alimentation mixte.....
Figure 2.22 :	Principes de fonctionnement d'un four vertical à cycles alternés.....
Figure 2.23 :	Exemple de four vertical à cycles alternés
Figure 2.24 :	Principe élémentaire de fonctionnement et circulation des gaz dans un four vertical à cycles alternés.....
Figure 2.25 :	Four vertical annulaire.....
Figure 2.26 :	Exemple de four vertical annulaire utilisé dans la fabrication de la chaux.....
Figure 2.27 :	Principe de fonctionnement de fours verticaux annulaires.....
Figure 2.28 :	Four vertical à double chambre inclinée.....
Figure 2.29 :	Schéma du procédé de calcination avec mise en suspension par le gaz
Figure 2.30 :	Principe de fonctionnement d'un four long rotatif.....
Figure 2.31 :	Exemple de four long rotatif utilisé dans la fabrication de la chaux
Figure 2.32 :	Four rotatif avec préchauffeur
Figure 2.33 :	Principe de fonctionnement d'un four rotatif avec préchauffeur
Figure 2.34 :	Exemple de four rotatif avec préchauffeur
Figure 2.35 :	Emissions de poussières mesurées à partir de différents types de fours à chaux utilisant différents types de techniques de réduction des poussières dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure)
Figure 2.36 :	Emissions de NO _x mesurées à partir de différents types de fours à chaux dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure).....
Figure 2.37 :	Emissions de SO ₂ mesurées à partir de différents types de fours à chaux utilisant des combustibles fossiles dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure)
Figure 2.38 :	Emissions de SO ₂ mesurées à partir de différents types de fours à chaux utilisant des combustibles fossiles et des déchets combustibles pour la cuisson dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure)
Figure 2.39 :	Emissions de CO par différents types de fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 2.40 :	Réactions chimiques et utilisation d'énergie dans un four vertical à alimentation mixte (réaction de Boudouard).....
Figure 2.41 :	Emissions de COT par différents types de fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 2.42 :	Emissions de HCl par différents fours à chaux dans l'UE des 27.....
Figure 2.43 :	Vue schématique d'un filtre électrostatique (ESP) classique.....
Figure 2.44 :	Schéma d'un filtre à manches à nettoyage par jets d'air pulsé
Figure 2.45 :	Vue schématique d'un exemple d'épurateur en voie humide de gaz d'exhaure à plusieurs étages.....
Figure 2.46 :	Coûts d'investissement en fonction de la capacité du four pour les filtres électrostatiques (ESP) et les filtres à manches – UE des 27.....
Figure 2.47 :	Simulation des coûts de dépoussiérage en fonction des limites d'émission de poussières pour un four rotatif (RK) équipé d'un filtre électrostatique (ESP) – UE des 27
Figure 2.48 :	Simulation des coûts de maintenance pour le dépoussiérage en fonction des limites d'émission de poussières pour un four à cycles alternés (PFRK) équipés de filtres à manches – UE des 27
Figure 2.49 :	Simulation des coûts de maintenance pour le dépoussiérage en fonction des limites d'émission de poussières pour des fours à cycles alternés équipés de filtres à manches en Italie en 2007.....
Figure 2.50 :	Réduction des NO _x en fonction de la température.....
Figure 2.51 :	Schéma de principe pour les émissions de PCDD/F dans des fours à chaux verticaux

Figure 2.52 :	Schéma de principe pour les émissions de PCDD/F dans des fours rotatifs
Figure 2.53 :	Four à lit fluidisé
Figure 2.54 :	Exemple de schéma de principe d'une technique de post-combustion
Figure 3.1 :	Sources d'oxyde de magnésium et pays producteurs à l'échelle mondiale
Figure 3.2 :	Production de magnésite brute dans l'UE des 25 et dans le monde.....
Figure 3.3 :	Production mondiale d'oxyde de magnésium modifié en 2003
Figure 3.4 :	Consommation mondiale de magnésie par secteur en 2003
Figure 3.5 :	Demande mondiale en magnésie pour la production des matériaux réfractaires utilisés dans l'industrie de l'acier
Figure 3.6 :	Schéma de traitement de la méthode normale de production de la magnésie.....
Figure 3.7 :	Exemple de schéma de traitement de la production de magnésie par voie sèche par une usine de magnésie surcuite
Figure 3.8 :	Parcours de la magnésite grossière et fine dans la fabrication de la magnésie
Figure 3.9 :	Principe de fonctionnement des fours rotatifs avec préchauffeur dans la fabrication de la magnésie.....
Figure 3.10 :	Principe de fonctionnement des fours longs rotatifs dans la fabrication de la magnésie.....
Figure 3.11 :	Principe de fonctionnement des fours verticaux dans la fabrication de la magnésie
Figure 3.12 :	Principe de fonctionnement des fours à double chambre utilisés dans la fabrication de la magnésie
Figure 3.13 :	Comparaison des combustibles en fonction des coûts spécifiques et de la teneur en soufre
Figure 4.1 :	Schéma de principe d'un système de récupération de chaleur à base d'eau en deux temps pour la cogénération d'énergie à la cimenterie suédoise de Slite.....
Figure 4.2 :	Schéma de principe d'un système de récupération de chaleur à base de pentane pour la cogénération d'énergie dans l'usine allemande de Lengfurt.....
Figure 4.3 :	Schéma de principe du procédé de fabrication du ciment à Slite (Suède)
Figure 4.4 :	Schéma de principe de l'injection d'une solution de NH_3 pour le procédé SNCR à la cimenterie suédoise de Slite.....
Figure 4.5 :	Schéma de principe et plan des tuyères pour l'injection d'une solution de NH_3 pour le procédé SNCR à la cimenterie suédoise de Skövde
Figure 4.6 :	Emissions de NO_x et consommation d'eau ammoniacale dans les cimenteries suédoises de Slite et de Skövde de 1995 à 2005
Figure 4.7 :	Emissions de NH_3 et consommation d'eau ammoniacale dans deux fours à ciment de la cimenterie suédoise de Slite de 1994 à 2005
Figure 4.8 :	SNCR à haut rendement et point d'injection d'eau ammoniacale par lance aux positions n° 21 à 26
Figure 4.9 :	Schéma de principe d'une installation de SCR type en Allemagne (Solnhofen Portland-Zementwerke).....
Figure 4.10 :	Répartition des concentrations en arsenic dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.11 :	Répartition des concentrations en cadmium dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.12 :	Répartition des concentrations en cobalt dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.13 :	Répartition des concentrations en chrome dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.14 :	Répartition des concentrations en cuivre dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.15 :	Répartition des concentrations en mercure dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.16 :	Répartition des concentrations en manganèse dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.17 :	Répartition des concentrations en nickel dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.18 :	Répartition des concentrations en plomb dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.19 :	Répartition des concentrations en antimoine dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.20 :	Répartition des concentrations en sélénium dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
Figure 4.21 :	Répartition des concentrations en étain dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27

Figure 4.22 : Répartition des concentrations en tellure dans les gaz résiduaux des fours à chaux dans l'UE des 27	
Figure 4.23 : Répartition des concentrations en thallium dans les gaz résiduaux des fours à chaux dans l'UE des 27	
Figure 4.24 : Répartition des concentrations en vanadium dans les gaz résiduaux des fours à chaux dans l'UE des 27	
Figure 4.25 : Répartition des concentrations en zinc dans les gaz résiduaux des fours à chaux dans l'UE des 27	
Figure 4.26 : Schéma de principe de la circulation des huiles usagées – de la réception au four vertical.....	
Figure 4.27 : Station de pompage numéro 2 avec filtre et conteneur à déchets pour le nettoyage du filtre.....	
Figure 4.28 : Station de mesure et de dosage à vannes pneumatiques	
Figure 4.29 : Position des points d'injection et de liaison pour le procédé SNCR à l'usine de chaux de Flandersbach, en Allemagne	

Liste des tableaux

Tableau 1.1 :	Production mondiale de ciment par régions géographiques en 2006
Tableau 1.2 :	Nombre de cimenteries dans l'UE des 27.....
Tableau 1.3 :	Consommation des marchés nationaux par type de ciment dans l'UE des 25
Tableau 1.4 :	Norme européenne de l'UE des 27 pour les types de ciment et leur composition.....
Tableau 1.5 :	Composition chimique du ciment gris
Tableau 1.6 :	Exemples de composition chimique du clinker de ciment blanc
Tableau 1.7 :	Consommation de combustible exprimée sous forme de pourcentage de la production thermique par l'industrie cimentière dans l'UE des 27
Tableau 1.8 :	Analyses chimiques des matières premières et du cru de ciment pour la fabrication de clinker
Tableau 1.9 :	Métaux présents dans les matières premières et dans le cru
Tableau 1.10 :	Exemples de composition chimique des matières premières pour la fabrication de clinker de ciment blanc
Tableau 1.11 :	Analyses chimiques des métaux présents dans le charbon
Tableau 1.12 :	Types de déchets les plus utilisés comme matières premières dans l'industrie européenne du ciment
Tableau 1.13 :	Liste type des déchets utilisés comme matières premières dans les fours à ciment de l'UE des 25, classés en fonction de leur composition chimique
Tableau 1.14 :	Différents types de déchets utilisés comme combustibles dans les fours à ciment de l'UE des 27 en 2003 et en 2004
Tableau 1.15 :	Consommation des matières premières utilisées pour la fabrication du ciment
Tableau 1.16 :	Classification chimique des déchets utilisés comme matières premières dans la fabrication du ciment dans l'UE des 27 en 2003 et en 2004
Tableau 1.17 :	Exemples des quantités d'énergie thermique nécessaires au séchage du cru
Tableau 1.18 :	Consommation d'énergie thermique dans la fabrication du ciment dans l'UE des 27
Tableau 1.19 :	Comparatif des techniques de broyage sur la base des caractéristiques principales
Tableau 1.20 :	Exemples du pouvoir calorifique de différents types de déchets utilisés comme combustible dans l'UE des 27
Tableau 1.21 :	Consommation de différents types de déchets utilisés comme combustible dans les fours à ciment de l'UE des 27 en 2003 et en 2004
Tableau 1.22 :	Substitution en déchets combustibles pour la fabrication du ciment dans les pays de l'UE des 23+.....
Tableau 1.23 :	Données sur les plages d'émission des fours à ciment européens
Tableau 1.24 :	Exemple des types de systèmes utilisés pour le dépoussiérage, données d'exploitation et besoins énergétiques
Tableau 1.25 :	Exemples de fréquences de pics de CO dans une cimenterie allemande
Tableau 1.26 :	Etude de la répartition des poussières fines dans les poussières totales émises par les fours à ciment allemands
Tableau 1.27 :	Exemples des concentrations de poussières dans le gaz brut selon le modèle RAINS
Tableau 1.28 :	Exemples de techniques de réduction des poussières et de leur efficacité selon le modèle RAINS
Tableau 1.29 :	Plages de concentrations en métaux lourds dans le gaz épuré, mesurées dans des fours à ciment entre 1996 et 1998.....
Tableau 1.30 :	Détail des informations relatives à chaque mesure ou technique décrite dans cette section
Tableau 1.31 :	Tableau synoptique des mesures/techniques de réduction des émissions de poussières dans le procédé de production du ciment
Tableau 1.32 :	Caractéristiques principales de différents éléments filtrants et coûts.....
Tableau 1.33 :	Mesures/techniques de réduction des émissions de NO _x utilisées dans l'industrie cimentière des pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
Tableau 1.34 :	Mesures/techniques de réduction des émissions de NO _x dans la fabrication du ciment
Tableau 1.35 :	Paramètres, émissions et coûts rapportés pour la SCR
Tableau 1.36 :	Tableau synoptique des techniques de régulation et de réduction des émissions de SO ₂
Tableau 1.37 :	Techniques de réduction des émissions de SO ₂ employées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ en 2008.....
Tableau 1.38 :	Exemple de mesures/techniques primaires pour empêcher les pics de CO liés aux filtres électrostatiques
Tableau 1.39 :	Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des poussières
Tableau 1.40 :	Exemples de coûts des mesures/techniques de réduction des NO _x

Tableau 1.41 :	Exemples de coûts des mesures/techniques de réduction des SO _x
Tableau 1.42 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les NO _x provenant des gaz résiduels de cuisson des fours/des procédés de préchauffage/précalcination dans l'industrie du ciment
Tableau 1.43 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les SO _x provenant des gaz résiduels de cuisson dans les fours/des procédés de préchauffage/précalcination dans l'industrie du ciment
Tableau 1.44 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les métaux provenant des gaz résiduels des procédés de cuisson dans les fours
Tableau 2.1 :	La chaux, un matériau polyvalent – quelques applications industrielles
Tableau 2.2 :	Meilleure estimation de la production mondiale de chaux vive et de dolomie en 2006 dans l'UE des 27, y compris la production de chaux intégrée.....
Tableau 2.3 :	Répartition de la chaux commerciale par secteur dans l'UE des 27 en 2004
Tableau 2.4 :	Comparatif 2003 – 2030 de l'utilisation du calcaire et de la dolomie en tant que matières premières
Tableau 2.5 :	Nomenclatures de la chaux, numéros CE et CAS
Tableau 2.6 :	Nombre d'usines à chaux non intégrée dans les Etats membres de l'UE des 27 dont la production dépasse 50 tonnes par jour – total 2003
Tableau 2.7 :	Nombre de fours à chaux en exploitation par type de four en 2004 dans l'UE des 27
Tableau 2.8 :	Nombre de fours à chaux par pays dans l'UE des 27 en 2003 pour la production de chaux et de dolime, à l'exclusion des fours intégrés
Tableau 2.9 :	Répartition des combustibles utilisés pour la cuisson de la chaux dans l'UE des 27 en 2003
Tableau 2.10 :	Teneur usuelle des impuretés et métaux rares présents dans le calcaire
Tableau 2.11 :	Types de combustibles utilisés dans différents types de fours à chaux dans l'UE des 27 en 2003
Tableau 2.12 :	Types de déchets combustibles utilisés dans différents pays européens
Tableau 2.13 :	Composantes des déchets combustibles liquides et solides
Tableau 2.14 :	Déchets combustibles utilisés dans différents types de four
Tableau 2.15 :	Paramètres opérationnels pour types de four à chaux
Tableau 2.16 :	Relation entre les fours et le type de chaux généralement produit dans ces fours
Tableau 2.17 :	Spécifications indicatives de la chaux par groupe de consommateurs
Tableau 2.18 :	Principales caractéristiques techniques des fours verticaux à alimentation mixte
Tableau 2.19 :	Caractéristiques techniques des fours verticaux à cycles alternés
Tableau 2.20 :	Caractéristiques techniques des fours verticaux annulaires
Tableau 2.21 :	Caractéristiques techniques des fours longs rotatifs
Tableau 2.22 :	Caractéristiques techniques des fours rotatifs avec préchauffeur
Tableau 2.23 :	Utilisation de chaleur et d'électricité habituelle par type de four dans l'UE des 27 pour la fabrication de chaux et de dolomite
Tableau 2.24 :	Exemples d'émissions types provenant des fours à chaux en Europe
Tableau 2.25 :	Facteurs d'émission de CO ₂ par différents types de fours dans l'industrie de la chaux
Tableau 2.26 :	Emissions moyennes de PCDD/F pour différents types de fours dans l'UE des 27
Tableau 2.27 :	Emissions types de HCl et de HF par différents types de fours à chaux dans l'UE des 27
Tableau 2.28 :	Nombre d'usines atteignant différents niveaux d'émissions de métaux dans l'UE des 27
Tableau 2.29 :	Résultats types d'analyse de la qualité des huiles usagées utilisées dans les fours verticaux en Allemagne
Tableau 2.30 :	Mesures d'émissions individuelles provenant d'un four vertical allemand utilisant de l'huile usagée
Tableau 2.31 :	Mesures d'émissions effectuées en continu en 2006 sur un four rotatif allemand utilisant des combustibles solides
Tableau 2.32 :	Mesures d'émissions individuelles effectuées périodiquement en 2006 sur un four rotatif allemand utilisant des combustibles solides
Tableau 2.33 :	Répartition des informations pour chaque mesure ou technique décrite dans cette section
Tableau 2.34 :	Vue d'ensemble des mesures/techniques applicables dans l'industrie de la chaux.....
Tableau 2.35 :	Solutions pour améliorer l'efficacité énergétique des fours à chaux
Tableau 2.36 :	Vue d'ensemble des techniques de contrôle des émissions de poussières dans le procédé de production de chaux
Tableau 2.37 :	Investissements et coûts des techniques de réduction de poussières.....
Tableau 2.38 :	Parts des différents types de coûts inclus dans les coûts d'exploitation des mesures/techniques de réduction

Tableau 2.39 :	Vue d'ensemble des mesures/techniques de réduction des NO _x dans l'industrie de la chaux
Tableau 2.40 :	Données d'exploitation théoriques pour le procédé SNCR
Tableau 2.41 :	Plages de température théoriques et taux de réduction nécessaires au procédé SCR.....
Tableau 2.42 :	Niveaux de consommation d'énergie thermique associés aux MTD dans l'industrie de la chaux et de la dolomie
Tableau 2.43 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les NO _x provenant des gaz résiduaire des procédés de cuisson du four dans l'industrie de la chaux.....
Tableau 2.44 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les SO _x provenant des gaz résiduaire des procédés de cuisson du four dans l'industrie de la chaux.....
Tableau 2.45 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour le CO provenant des gaz résiduaire des procédés de cuisson du four.....
Tableau 2.46 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les COT provenant des gaz résiduaire des procédés de cuisson du four.....
Tableau 2.47 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les métaux provenant des gaz résiduaire des procédés de cuisson du four
Tableau 2.48 :	Composition des gaz résiduaire surveillée pendant plusieurs heures
Tableau 3.1 :	Production mondiale de magnésite brute (carbonate de magnésium) de 2000 à 2005
Tableau 3.2 :	Production mondiale d'oxyde de magnésium/de magnésie clinkérisé(e) en 2003
Tableau 3.3 :	Producteurs de magnésie clinkérisée dans l'UE des 27
Tableau 3.4 :	Fabrication de magnésite et de magnésie à l'aide du procédé par voie sèche dans l'UE des 25 en 2003
Tableau 3.5 :	Quantités de magnésie et de dioxyde de carbone après décomposition
Tableau 3.6 :	Rendement en magnésie et en oxyde de carbone de la magnésite
Tableau 3.7 :	Combustible nécessaire à la fabrication d'une tonne de magnésie (MgO).....
Tableau 3.8 :	Exemples de la relation entre la granulométrie et la teneur en soufre des matières premières
Tableau 3.9 :	Concentrations des éléments constitutifs des émissions liées à l'industrie de l'oxyde de magnésium dans l'UE des 27
Tableau 3.10 :	Ventilation des informations relatives à chaque mesure ou technique décrite dans cette section
Tableau 3.11 :	Niveaux d'émission associés aux MTD pour les SO _x provenant des gaz résiduaire des procédés de chauffe du four dans l'industrie de la magnésie
Tableau 4.1 :	Regroupements des déchets combustibles selon le CEMBUREAU et selon le CED
Tableau 4.2 :	Types et quantités de déchets et de déchets combustibles utilisés dans les fours à ciment allemands en 2004
Tableau 4.3 :	Quantités de différents types de déchets combustibles utilisés dans l'industrie allemande du ciment
Tableau 4.4 :	Exemples des valeurs acceptées de différents paramètres pour l'utilisation de déchets industriels et de solvants
Tableau 4.5 :	Données d'exploitation d'un four à ciment allemand utilisant des combustibles résiduaire (moyenne des données sur trois jours).....
Tableau 4.6 :	Résultats des mesures des émissions liées à l'utilisation de déchets combustibles dans un four à ciment allemand
Tableau 4.7 :	Fiche technique de qualité pour un déchet combustible provenant d'Estonie
Tableau 4.8 :	Analyse des caractéristiques d'une cimenterie estonienne
Tableau 4.9 :	Critères de qualité pour des déchets provenant d'une cimenterie estonienne.....
Tableau 4.10 :	Consommation de déchets combustibles dans une cimenterie estonienne.....
Tableau 4.11 :	Valeurs limites des différentes autorisations et réglementations autrichiennes, suisses et allemandes relatives à l'utilisation de déchets
Tableau 4.12 :	Exemples des valeurs limites pour les déchets combustibles dans différents pays/régions en fonction des autorisations individuelles
Tableau 4.13 :	Exemples des valeurs limites pour des déchets destinés à être utilisés comme matière première dans différents pays/régions.....
Tableau 4.14 :	Exemples des plages de concentration types des métaux provenant de déchets combustibles
Tableau 4.15 :	Exemples des critères d'entrée pour l'utilisation appropriée des déchets dans les fours à ciment allemands
Tableau 4.16 :	Exemples des critères d'autorisation (valeurs maximales) pour les substances présentes dans les déchets utilisés par des cimenteries autrichiennes
Tableau 4.17 :	Exemples des critères d'autorisation (valeur moyenne et valeur du percentile 80) pour les substances présentes dans les déchets utilisés par des cimenteries autrichiennes
Tableau 4.18 :	Exemples des critères d'entrée pour les substances présentes dans les déchets

	combustibles utilisés dans des cimenteries titulaires d'une autorisation française
Tableau 4.19 :	Exemples des critères d'entrée pour les substances présentes dans les déchets combustibles utilisés dans des cimenteries espagnoles et polonaises
Tableau 4.20 :	Spécifications des critères d'entrée pour des exemples de déchets
Tableau 4.21 :	Consommation de combustibles dans l'industrie autrichienne du ciment
Tableau 4.22 :	Exemples de différentes données sur les émissions provenant d'une cimenterie estonienne en 2006 par rapport aux données sur les émissions autorisées
Tableau 4.23 :	Exemples d'émissions de poussières fines PM10 et PM2.5 mesurées dans des cimenteries irlandaises
Tableau 4.24 :	Quantités de polluants dans les eaux usées d'une cimenterie estonienne
Tableau 4.25 :	Hypothèses de base d'une usine de SCR en Allemagne
Tableau 4.26 :	Comparatif des coûts des techniques de réduction des NO _x entre le procédé SNCR et le procédé SCR selon l'UBA (agence fédérale de l'environnement) pour une usine allemande
Tableau 4.27 :	Calculs des coûts de réduction des NO _x par utilisation du procédé SCR pour une cimenterie allemande d'une capacité de 1 500 t/j.....
Tableau 4.28 :	Exemple de mesures/techniques primaires pour supprimer les pics de CO liés aux filtres électrostatiques
Tableau 4.29 :	Exemple de composition des matières premières utilisées dans une usine de chaux hongroise
Tableau 4.30 :	Teneur type en polluants acceptée pour les solvants et huiles usagées, graisses animales et farines animales (farines d'équarrissage) utilisés dans les usines allemandes de chaux
Tableau 4.31 :	Exemples des critères d'autorisation (valeurs moyennes et maximales) pour des substances présentes dans différents déchets combustibles utilisés dans les usines allemandes de chaux
Tableau 4.32 :	Données d'exploitation et demande spécifique en énergie des fours à chaux autrichiens en 2004
Tableau 4.33 :	Consommation d'énergie par différents types de fours à chaux en Espagne.....
Tableau 4.34 :	Exemples types des émissions liées aux fours à chaux en Allemagne
Tableau 4.35 :	Exemples des émissions de NO _x observées dans les Etats membres de l'Union européenne
Tableau 4.36 :	Emissions provenant de fours à chaux autrichiens
Tableau 4.37 :	Emissions de poussières, NO _x , SO _x , CO et CO ₂ provenant de plusieurs fours à chaux finlandais utilisant différents types de four à chaux entre 1998 et 2006
Tableau 4.38 :	Emissions de métaux provenant d'un four à chaux finlandais
Tableau 4.39 :	Liste des déchets pouvant être utilisés dans certains fours à chaux allemands
Tableau 4.40 :	Concentrations moyennes et maximales en métaux pour chaque type de déchet combustible.....
Tableau 4.41 :	Pouvoir calorifique net minimum et maximum pour chaque type de déchet combustible.....
Tableau 4.42 :	Exemples de mesures/techniques d'assurance de la qualité des déchets

PORTEE

Le présent document traite des activités industrielles mentionnées au paragraphe 3.1 de l'Annexe I de la Directive 2008/1/CE, à savoir :

« 3.1. Installations destinées à la production de clinker (ciment) dans des fours rotatifs avec une capacité de production supérieure à 500 tonnes par jour, ou de chaux dans des fours rotatifs avec une capacité de production supérieure à 50 tonnes par jour, ou dans d'autres types de fours avec une capacité de production supérieure à 50 tonnes par jour. »

Le présent document couvre les procédés mis en œuvre dans la fabrication du ciment et de la chaux ainsi que l'utilisation des déchets comme matières premières et/ou comme combustibles.

Il couvre, en outre, la fabrication de l'oxyde de magnésium par voie sèche à partir de magnésite naturelle extraite en carrière (carbonate de magnésium MgCO_3).

Le procédé par voie humide utilisant le chlorure de magnésium comme matière première de départ n'est pas abordé dans le présent document en raison des différences qu'il présente dans l'utilisation de la structure de procédé, des techniques et des matières premières. Ce procédé est traité dans le document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication des produits chimiques minéraux en grands volumes – solides et autres (LVICS) [108, Commission européenne, 2006].

La Directive sur l'incinération des déchets [59, Commission européenne, 2000] définit à l'article 3, paragraphe 5) une usine de co-incinération comme étant une installation fixe ou mobile dont l'objectif essentiel est de produire de l'énergie ou des produits matériels et :

- qui utilise des déchets comme combustible habituel ou d'appoint, ou
- dans laquelle les déchets sont soumis à un traitement thermique en vue de leur élimination.

Or, l'industrie cimentière est capable d'utiliser :

- des déchets combustibles dotés d'un fort pouvoir calorifique ; et
- des déchets dépourvus d'un fort pouvoir calorifique mais dotés d'éléments minéraux utilisés comme matières premières, qui participent à l'obtention du clinker intermédiaire ; et
- des déchets dotés à la fois d'un fort pouvoir calorifique et d'éléments minéraux [104, HOLCIM/GTZ, 2006].

Par conséquent, le terme « co-incinération » ne convient pas totalement aux besoins du présent document car il est susceptible de ne pas couvrir tous les modes d'utilisation des déchets au sein du secteur cimentier. L'expression « utilisation de déchets comme combustible et/ou matière première » est employée pour couvrir les trois procédés de récupération susmentionnés.

Outre les opérations de fabrication élémentaires des trois activités industrielles susmentionnées, en l'occurrence le ciment, la chaux et l'oxyde de magnésium, le présent document traite des activités annexes susceptibles d'avoir une incidence sur les rejets ou la pollution. Il inclut de ce fait des activités qui vont de la préparation des matières premières à l'expédition des produits finis.

Certaines activités, par exemple l'extraction en carrière et les fours verticaux utilisés dans la fabrication du clinker, ne sont pas abordées car on considère qu'elles ne sont pas directement liées à l'activité primaire.

Les principales opérations couvertes par les descriptions sont les suivantes :

- matières premières – stockage et préparation ;
- combustibles – stockage et préparation ;
- utilisation de déchets comme matières premières et/ou comme combustibles, exigences de qualité, contrôle et préparation ;
- systèmes de fours, procédés de chauffe du four et techniques de réduction des émissions ;
- produits – stockage et préparation ;
- conditionnement et expédition.

Il convient de noter qu'en 2006 pour les secteurs industriels couverts par le présent document (ciment, chaux et oxyde de magnésium), des données ont été collectées pour l'UE des 25. En outre, en 2007, ces renseignements et données ont été partiellement actualisés pour l'UE des 27.

Structure du présent document

En raison des différents produits et procédés utilisés, la structure du présent document est la suivante :

Partie préliminaire : Résumé, Préface, Portée du document
Chapitre 1 Description générale de l'industrie du ciment, comportant une partie générique, une partie sur les procédés et une partie sur les techniques émergentes ainsi qu'une partie finale avec des conclusions et des recommandations
Chapitre 2 Description générale de l'industrie de la chaux comportant une partie générique, une partie sur les procédés et une partie sur les techniques émergentes ainsi qu'une partie finale avec des conclusions et des recommandations
Chapitre 3 Description générale de l'industrie de la fabrication d'oxyde de magnésium par voie sèche, comportant une partie générique, une partie sur les procédés et une partie sur les techniques émergentes ainsi qu'une partie finale avec des conclusions et des recommandations
Partie supplémentaire : Références, Glossaire, Annexes

Dans les chapitres 1 à 3, les sections standards du BREF suivent le découpage indiqué dans la préface.

1 INDUSTRIE DU CIMENT

1.1 Informations générales sur l'industrie du ciment

Le ciment est une poudre finement broyée, non métallique et inorganique qui, une fois mélangée avec une adjonction d'eau, forme une pâte qui prend et durcit. Ce durcissement hydraulique est principalement dû à la formation d'hydrates de silicates de calcium sous l'effet de la réaction entre l'eau du mélange et les constituants du ciment. Dans le cas des ciments alumineux, le durcissement hydraulique est dû à la formation d'hydrates d'aluminates de calcium.

Le ciment est un matériau de base dans les secteurs du bâtiment et du génie civil. En Europe, l'utilisation du ciment et du béton (un mélange de ciment, de granulats, de sable et d'eau) dans les grands travaux de génie civil remonte à l'Antiquité. Le ciment Portland, le plus utilisé dans la construction en béton, a été breveté en 1824. La production de l'industrie du ciment est en relation directe avec l'état d'ensemble du secteur du bâtiment ce qui en fait un bon indicateur de la situation économique générale.

Comme le montre la Figure 1.1, la production mondiale de ciment progresse régulièrement depuis 1950. Elle ne cesse d'augmenter dans les pays en voie de développement en particulier en Asie, continent qui s'est taillé la part du lion dans l'augmentation de la production mondiale de ciment dans les années 1990.

(Titre : Production de ciment dans l'UE-27 et dans le monde depuis 1950)

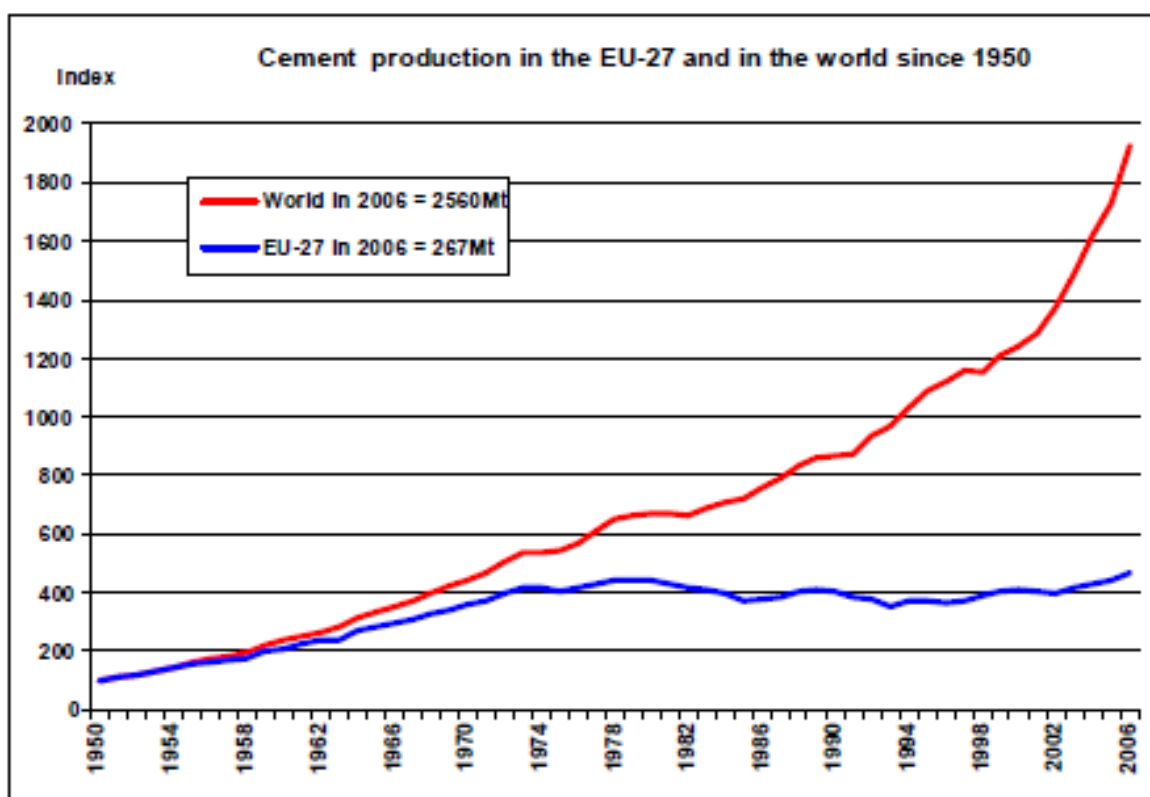


Figure 1.1 : Production de ciment dans l'UE des 27 et dans le monde de 1950 à 2006

[72, CEMBUREAU, 2006-2008,], [168, TWG CLM, 2007]

En 2006, la production mondiale de ciment a atteint 2540 millions de tonnes. Le Tableau 1.1 illustre sa répartition par régions géographiques.

Région	Unité	2006	Région	Unité	2006
Chine	%	47,4	États-Unis	%	3,9
Inde	%	6,2	Autres (continent américain)	%	5,8
Japon	%	2,7	Afrique	%	4,0
Autres (Asie)	%	13,2	CEI	%	3,4
UE (27 États membres)	%	10,5	Océanie	%	0,4
Autres (Europe)	%	2,5			

Tableau 1.1 : Production mondiale de ciment par régions géographiques en 2006

[72, CEMBUREAU, 2006-2008,]

La production de ciment de l'Union européenne est passée de 1 700 tonnes par homme et par an en 1970 à 3 500 tonnes en 1991. Cette augmentation de productivité est due à l'apparition d'unités de production de plus en plus grandes, à la mise en œuvre de la conduite automatique des procédés et à l'utilisation d'un personnel moins nombreux mais plus hautement qualifié requis par cette automatisation. L'industrie du ciment dans l'Union européenne (UE des 27) employait environ 54 000 salariés en 2005. La Figure 1.2 montre une estimation de l'évolution de la main-d'œuvre employée par cette industrie dans l'Union de 1975 à 1995, accompagnée des chiffres de l'emploi pour l'UE des 25. Les chiffres d'avant 1991 n'incluent pas les salariés de l'ex RDA.

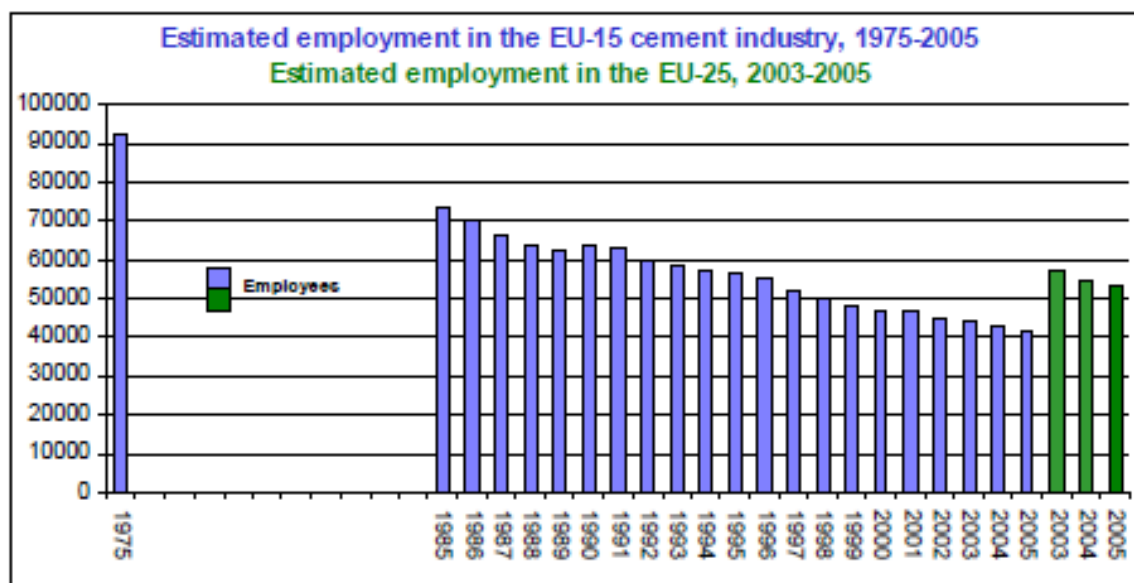


Figure 1.2 : Estimation de l'évolution de l'emploi dans l'industrie du ciment de l'Union européenne de 1975 à 2005

[72, CEMBUREAU, 2006-2008,]

En 2006, l'UE des 25 a produit 267,5 millions de tonnes de ciment et en a consommé 260,6 millions ; elle en a importé 38 millions de tonnes et exporté 32 millions de tonnes. Ces chiffres incluent les transactions commerciales entre les pays de l'Union.

La Figure 1.3 présente la production et la consommation de ciment dans l'UE des 25 en 2005.

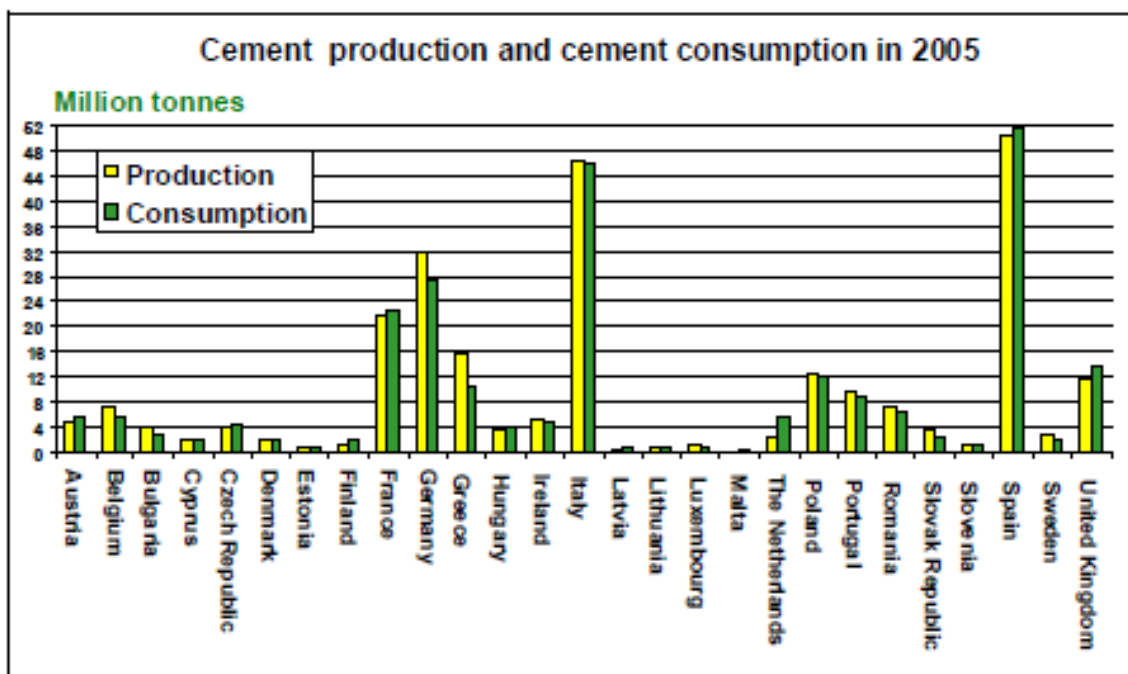


Figure 1.3 : Production de ciment, clinker d'exportation compris, et consommation de ciment dans l'UE des 25
[72, CEMBUREAU, 2006-2008,]

Les cinq plus gros producteurs de ciment de la planète sont Lafarge, Holcim, Cemex, HeidelbergCement et Italcementi. Outre le ciment, ces sociétés se sont diversifiées dans différents secteurs des matériaux de construction comme les granulats, les produits en béton, les plaques de plâtre, etc.

Au sein de l'Union, les producteurs de ciment livrent leurs clients principalement par transport routier. Dans des conditions commerciales normales, le périmètre de livraison est alors limité en raison du coût de ce type de transport et du prix de vente unitaire relativement bas du ciment. En règle générale, le ciment est transporté par route jusqu'à une distance comprise entre 200 et 300 km. Un transport sur de plus longues distances est toutefois plus courant lorsque les cimenteries se trouvent à proximité de l'eau (mer, voies navigables). En outre, un accès facilité au réseau ferré favorise dans certains cas un transport sur de plus longues distances. Il existe un commerce mondial et, dans certains cas, l'expédition internationale de ciment est économiquement viable. La présence de terminaux de ciment (par exemple des terminaux flottants) a favorisé l'augmentation des importations sur les marchés de l'UE de ciment extracommunautaire. La concurrence internationale est surtout une menace pour les usines au niveau individuel et, au sein même de l'Union, les importations croissantes en provenance de l'Europe de l'Est détériorent effectivement la situation des marchés locaux. D'après une estimation, la Grèce, l'Italie, le Portugal, l'Espagne, le sud de la France et le Royaume-Uni constituaient ensemble en 2007 des zones ouvertes aux importations. Ces zones représentent 60 % du volume de la production de ciment de l'Union. Le Danemark, la Norvège et la Suède sont également vulnérables. En 2005, 15,5 millions de tonnes ont été importées dans l'UE en provenance de pays sans contrainte carbone, contre 13,5 millions de tonnes en 2004.

L'UE des 27 compte 268 usines de fabrication de clinker et de ciment fini. Elle compte en outre deux usines de clinker (fours) sans broyeur et 90 stations de broyage (broyeurs à ciment) sans four (le présent document ne s'intéresse pas aux broyeurs à ciment sans four), comme indiqué dans le Tableau 1.2.

État membre de l'UE		Cimenteries – équipées de fours –	Cimenteries – équipées de broyeurs à ciment uniquement
Belgique ¹	BE	5	4
Bulgarie	BG	5	-
République tchèque	CZ	6	1
Danemark	DK	1	-
Allemagne	DE	38	20
Estonie	EE	1	-
Irlande	IE	4	-
Grèce	EL	8	-
Espagne	ES	37	13
France	FR	33	6
Italie	IT	59	35
Chypre	CY	2	-
Lettonie	LV	1	-
Lituanie	LT	1	-
Luxembourg ¹⁾	LU	1	1
Hongrie	HU	4	-
Malte	MT		
Pays-Bas	NL	1	2
Autriche	AT	9	3
Pologne	PL	11	1
Portugal	PT	6	2
Roumanie	RO	8	1
Slovénie	SI	2	-
Slovaquie	SK	6	-
Finlande	FI	2	-
Suède	SE	3	-
Royaume-Uni	UK	14	1
Total		268	90
1) Incluant une usine de clinker			

Tableau 1.2 : Nombre de cimenteries dans l'UE des 27
[72, CEMBUREAU, 2006-2008,]

Il existe 377 fours dans l'UE des 27, mais tous n'étaient pas en service en 2007. La capacité de production type d'un four a atteint ces dernières années près de 3 000 tonnes de clinker/jour et malgré la diversité des tailles et des heures de marche, rares sont ceux qui produisent moins de 500 tonnes par jour.

En 2007, près de 90 % de la production européenne de ciment était fabriquée par voie sèche, 7,5 % par voies semi-sèche et semi-humide et le reste de la production, soit 2,5 %, par voie humide. Le choix du procédé de fabrication dépend avant tout de la nature des matières premières disponibles.

La norme européenne (EN 197-1) sur les ciments courants répertorie 27 types différents de ciments classés en cinq groupes. De plus, il existe une gamme de ciments spécifiques destinés à des applications spéciales. Le Tableau 1.4 détaille les critères de la norme européenne s'appliquant aux ciments produits dans l'UE des 27, alors que le Tableau 1.3 indique le pourcentage de chaque type consommé par les marchés nationaux en 2005 dans l'UE des 25. Enfin, le Tableau 1.5 présente la composition type du ciment gris.

Type de ciment	Unité	2005
Ciment Portland composé CEM II	%	58,6
Ciment Portland CEM I	%	27,4
Laitier de haut fourneau CEM III	%	6,4
Ciment pouzzolanique CEM IV	%	6,0
Ciment composé et autres ciments CEM V	%	1,6

Tableau 1.3 : Consommation des marchés nationaux par type de ciment dans l'UE des 25
[72, CEMBUREAU, 2006-2008,]

Principaux types	Notation de 27 produits (types de ciments courants)		Composition (pourcentage massique ¹⁾)										Constituants additionnels mineurs
			Principaux constituants										
			Clinker	Laitiers de hauts fourneaux	Fumées de silice	Pouzzolane		Cendres volantes		Schistes calcinés	Calcaire		
						Naturelle	Naturelle calcinée	de silice	de calcaire				
			K	S	D ²⁾	P	Q	V	W	T	L ⁴⁾	LL ⁵⁾	
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95 – 100		-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEMII	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80 – 95	6	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65 – 79	21	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux fumées de silice	CEM II/A-D	90 – 94		6 – 10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland pouzzolane	CEM II/A-P	80 – 94		-	6 – 20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65 – 79		-	21 – 35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80 – 94		-	-	6 – 20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65 – 79		-	-	21 – 35	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80 – 94		-	-		6 – 20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65 – 79		-	-	-	21 – 35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80 – 94		-	-	-	-	6 – 20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65 – 79		-	-	-	-	21 – 35	-	-	-	0-5
	Ciment Portland aux schistes calcinés	CEM II/A-T	80 – 94		-	-	-	-	-	6 – 20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65 – 79		-	-	-	-	-	21 – 35	-	-	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80 – 94		-	-	-	-	-	-	6 – 20	-	0-5
		CEM II/B-L	65 – 79		-	-	-	-	-	-	21 – 35	-	0-5

Principaux types	Notation de 27 produits (types de ciments courants)		Composition (pourcentage massique ¹⁾)											
			Principaux constituants										Constituants additionnels mineurs	
			Clinker	Laitiers de hauts fourneaux	Fumées de silice	Pouzzolane		Cendres volantes		Schistes calcinés	Calcaire			
						Naturelle	Naturelle calcinée	de silice	de calcaire					
	K	S	D ²⁾	P	Q	V	W	T	L ⁴⁾	LL ⁵⁾				
	Ciment Portland composé	CEM II/A-LL	80 – 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 – 20	0 – 5	
		CEM II/B-LL	65 – 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 – 35	0 – 5	
		CEM II/A-M	80 – 94	6 – 20										0 – 5
		CEM II/B-M	65 – 79	21 – 35										0 – 5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35 – 64	36 – 65	-	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5	
		CEM III/B	20 – 34	66 – 80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5	
		CEM III/C	5 – 19	81 – 95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique ³⁾	CEM IV/A	65 – 89	-	11 – 35					-	-	-	0 – 5	
		CEM IV/B	45 – 64	-	36 – 55					-	-	-	0 – 5	
CEM V	Ciment composé ³⁾	CEM V/A	40 – 64	18 – 30	-	18 – 30			-	-	-	-	0 – 5	
		CEM V/B	20 – 38	31 – 50	-	31 – 50			-	-	-	-	0 – 5	
1) Dans ce tableau, les valeurs représentent la somme des constituants additionnels majeurs et mineurs. 2) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %. 3) Dans les ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, dans les ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B ainsi que dans les ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les principaux constituants autres que le clinker doivent être déclarés dans la désignation du ciment 4) Calcaire jusqu'à 50 % de COT 5) Calcaire jusqu'à 20 % de COT														

Tableau 1.4 : Norme européenne de l'UE des 27 pour les types de ciment et leur composition
[149, CEN/EN 197-1, 2000]

	Nomenclature IUPAC ¹⁾	Numéro CAS	Numéro EINECS	Formule moléculaire selon Hill	Masse moléculaire	Concentration type (% M/M)	Plage de concentration (% M/M)
Informations sur la composition – constituants principaux							
A	Silicate tricalcique	12168-85-3	235-336-9	3CaO•SiO ₂	228	65	40 – 80
B	Silicate bicalcique	10034-77-2	233-107-8	2CaO•SiO ₂	172	15	10 – 50
C	Aluminate tricalcique	12042-78-3	234-932-6	3CaO•Al ₂ O ₃	270	10	0 – 15
D	Aluminoferrite tétracalcique	12068-35-8	235-094-4	4CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃	486	10	0 – 20
Informations sur la composition – Impuretés et additifs							
E ²⁾	Oxyde de calcium	1305-78-8	215-138-9	CaO		1	0 – 3
F	Oxyde de magnésium	1309-48-4	215-171-9	MgO		2	0 – 5
G	Sulfate dipotassique	10233-01-9	233-558-0	K ₂ SO ₄		1	0 – 2
H	Sulfate disodique	7757-82-6	231-820-9	Na ₂ SO ₄		0.5	0 – 1
Nombre d'impuretés non spécifiées :							
Concentration totale d'impuretés non spécifiées :				<1 M/M %			
Additifs				non disponible			
1) Nomenclature de l'Union internationale de chimie pure et appliquée 2) Sous forme libre, l'oxyde de calcium correspond à la « chaux libre ». Le CaO est également présent combiné dans les quatre principales phases A-B-C-D Note : au contact avec l'eau, les ciments contenant du clinker Portland peuvent libérer des traces de chromate soluble. La Directive 2005/53/CE de la Commission du 16 septembre 2005 modifiant la Directive 91 /414/CEE du Conseil en vue d'y inscrire les substances actives chlorothalonil, chlorotoluron, cyperméthrine, daminozide et thiophanate-méthyle décrit les mesures visant à atténuer les effets dermatologiques nocifs.							

Tableau 1.5 : Composition chimique du ciment gris
[103, CEMBUREAU, 2006]

Outre le ciment Portland gris, d'autres ciments, comme le ciment blanc, sont également produits. Hormis la couleur, ce type de ciment présente des propriétés identiques à celles du ciment gris. Cependant, la production du ciment blanc ne fait intervenir que des matériaux n'ayant aucun effet négatif sur sa couleur. Le Tableau 1.6 fournit quelques exemples de paramètres relatifs au ciment blanc des marchés américain et européen. La blancheur exigée localement influence évidemment ces paramètres. En outre, la principale différence avec le ciment gris réside dans la teneur en Fe₂O₃.

Caractéristiques		Ciment blanc
Composition chimique (%)	SiO ₂	22,5 – 23,8
	Al ₂ O ₃	2,3 – 6,2
	Fe ₂ O ₃	0,19 – 0,4
	CaO	66,3 – 68,0
	MgO	0,48 – 1,0
	SO ₃	0,65 – 2,8
	F	0,24 – 0,85
	K ₂ O	0,12 – 0,14
Perte au feu (%)		0,50 – 1,7
Na ₂ O		0,17
Composition du composé potentiel (%)	C3S (3 CaO SiO ₂)	69,89
	C2S (2 CaO SiO ₂)	19
	C3A (3 CaO Al ₂ O ₃)	8,08
	C4AF (4 CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃)	1
Finesse Blaine (m2/kg)		464

Tableau 1.6 : Exemples de composition chimique du clinker de ciment blanc
[103, CEMBUREAU, 2006], [118, Allemagne, 2007], [119, Sobolev, 2001]

L'une des caractéristiques la plus importante de ce type de ciment est la blancheur. En fonction des normes propres à chaque pays, la blancheur de ce ciment répond à des spécifications différentes [118, Allemagne, 2007], [119, Sobolev, 2001].

L'industrie du ciment est une industrie à forte consommation d'énergie ; son coût représente généralement 40 % des coûts de production (c'est-à-dire hors coûts d'investissement, mais coûts de l'électricité compris). Le premier combustible fossile solide utilisé était en général le charbon, mais les fabricants font également appel à une large gamme d'autres combustibles fossiles solides, liquides ou gazeux tels que le coke de pétrole, le lignite, le gaz naturel et le fioul (lourd, moyen ou léger). Outre ces combustibles fossiles traditionnels, l'industrie du ciment brûle depuis plus de 15 ans de grandes quantités de déchets combustibles ou de biomasse.

Type de combustible	Unité	2006
Coke de pétrole (fossile)	%	38,6
Charbon (fossile)	%	18,7
Coke de pétrole et charbon (fossile) ¹⁾	%	15,9
Fioul, y compris HV ²⁾	%	3,1
Lignite et autres combustibles solides (fossiles)	%	4,8
Gaz naturel (fossile)	%	1,0
Déchets combustibles	%	17,9
Exclus : IE, CY, LT, SL Estimatif : IT, PT, SE 1) Rapporté par l'UE des 23 2) Fioul HV = fioul à haute viscosité		

Tableau 1.7 : Consommation de combustible exprimée sous forme de pourcentage de la génération de chaleur par l'industrie cimentière dans l'UE des 27
[72, CEMBUREAU, 2006-2008,], [168, TWG CLM, 2007]

Les principales émissions polluantes des cimenteries qui doivent être traitées sont celles de poussières, d'oxydes d'azote (NOx) et de dioxyde de soufre (SO₂), ainsi que celles de composés organiques volatils (COV), des polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD), des polychlorodibenzofuranes (PCDF) et de chlorure d'hydrogène (HCl). En outre, les émissions d'oxydes de carbone (CO, CO₂), de fluorure d'hydrogène (HF), d'ammoniac (NH₃), de benzène, toluène, éthylbenzène et xylène (BTEX), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH), de métaux et leurs composés, de bruit et d'odeurs peuvent être prises en considération dans des circonstances spéciales.

Les fabricants de ciment remplacent les matières premières et combustibles conventionnels par des produits provenant de déchets appropriés et/ou de la biomasse.

L'industrie du ciment est également une industrie nécessitant des investissements importants. Le coût d'une cimenterie neuve équivaut à trois années de chiffre d'affaires, ce qui classe cette industrie parmi celles à intensité capitalistique les plus fortes. Sa rentabilité se situe autour de 10 % de son chiffre d'affaires (sur la base des bénéfices avant impôts et avant remboursement des intérêts).

1.2 Procédés et techniques de fabrication du ciment

La réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3) en oxyde de calcium (CaO , chaux) accompagnée d'un dégagement de gaz carbonique (CO_2), à environ 900 °C. Ce procédé appelé calcination est suivi de la cuisson du clinker, ou clinkérisation, pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à une haute température (en général entre 1 400 et 1 500 °C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium composant le clinker. Celui-ci est ensuite broyé et mélangé à du gypse et à d'autres constituants ce qui permet d'obtenir le ciment.

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide.

- Dans la voie sèche, les matières premières broyées et séchées forment le cru, ou farine, qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four ou, plus rarement, dans un four tubulaire long en voie sèche.
- Dans la voie semi-sèche, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduites dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.
- Dans la voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.
- Dans la voie humide, les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four ou peut passer auparavant dans un sécheur.

Le choix du procédé dépend dans une large mesure de l'état des matières premières (sèches ou humides). Une grande partie de la production mondiale de clinker est toujours fabriquée en voie humide. Cependant, en Europe, plus de 90 % de la production de ciment est fabriquée en voie sèche en raison de la disponibilité des matières premières sèches. Les procédés humides consomment davantage d'énergie et sont donc plus coûteux. Les usines utilisant la voie semi-sèche se convertiront probablement aux techniques sèches à l'occasion d'une extension ou de travaux de modernisation importants. Normalement, les usines utilisant la voie humide ou semi-humide n'ont accès qu'à des matières premières humides, comme c'est le cas au Danemark et en Belgique et, dans une certaine mesure, en Grande-Bretagne.

Les opérations suivantes sont communes à tous les procédés :

- stockage et préparation des matières premières,
- stockage et préparation des combustibles,
- utilisation de déchets en tant que matières premières ou combustibles, ou les deux, exigences de qualité, de contrôle et de préparation,
- les fours, les procédés de chauffe du four et les techniques de réduction des émissions,
- stockage et préparation des produits,
- conditionnement et expédition.

Le procédé de fabrication du ciment blanc est tout à fait semblable à celui du ciment Portland gris. Le procédé inclut le choix des matières premières, le stockage et la préparation du mélange, le stockage et la préparation du combustible, la cuisson du clinker dans un four, le blanchiment et le refroidissement et le broyage dans des conditions parfaitement maîtrisées à chaque étape du procédé afin d'éviter toute contamination ou altération non désirée du produit. La principale différence technique réside toutefois dans le refroidissement et le blanchissement. Nécessaires, ces étapes ont pour but d'améliorer la blancheur de ce type particulier de ciment et de lui conférer une couleur uniforme.

La Figure 1.4 représente de manière schématique le procédé type d'une cimenterie.

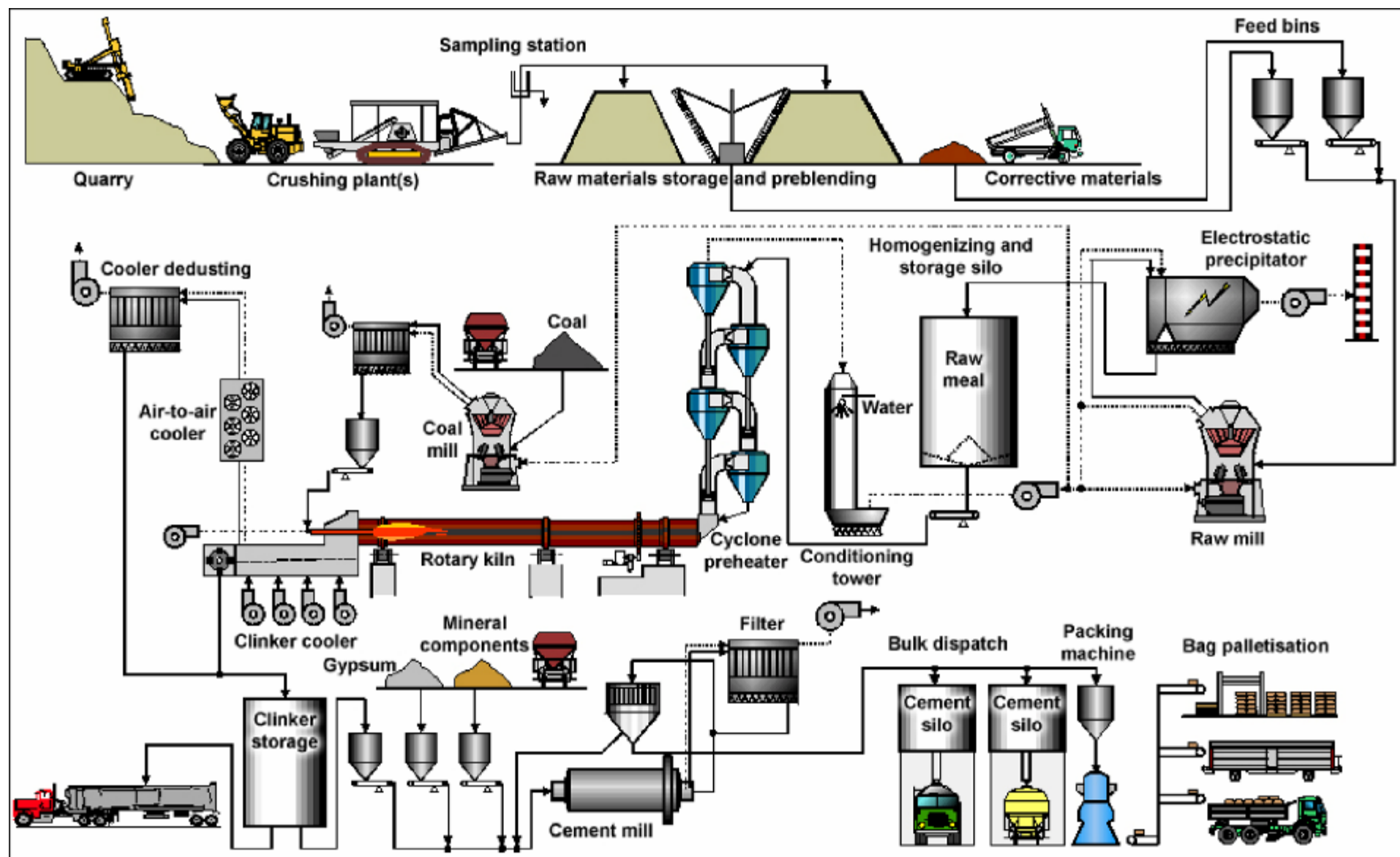


Figure 1.4 : Vue d'ensemble d'un procédé de fabrication de ciment
[103, CEMBUROU, 2006]

1.2.1 Les matières premières et leur extraction

Les gisements calcaires naturels comme les roches calcaires, les marnes ou la craie fournissent le carbonate de calcium. La silice, l'oxyde de fer et l'alumine sont présents dans différents minerais et minéraux comme le sable, les schistes argileux, l'argile et le minerai de fer.

La presque totalité des matières premières est extraite dans des mines ou des carrières, généralement à ciel ouvert. Les opérations nécessaires comportent : le forage dans la roche, l'abattage à l'explosif, l'excavation, le transport et le concassage. Le document de référence sur les meilleures techniques disponibles en matière de gestion des résidus et des stériles des activités minières fournit des informations utiles sur l'exploitation des mines et des carrières [47, Commission européenne, 2004].

Les principales matières premières (pierres calcaires, marnes crayeuses et schistes argileux ou argiles) sont extraites dans des carrières généralement proches de l'usine. Après un concassage primaire, les matières premières sont transportées vers l'usine où elles sont stockées et préparées. D'autres matériaux tels que la bauxite, le minerai de fer, le laitier de haut fourneau ou le sable de fonderie sont approvisionnés par d'autres sources.

Le procédé de cuisson du clinker impose aux matières premières de répondre à un certain nombre de critères quant à leurs caractéristiques et à leur composition chimique, lesquelles affecteront en outre le procédé de production et la qualité du clinker. Le tableau 1.8 fournit à titre indicatif les plages des valeurs des analyses chimiques et des caractéristiques des matières premières et des crus destinés à la production de clinker. En plus des principaux composants, ces matières premières contiennent également un certain nombre de métaux répertoriés dans le Tableau 1.9.

Composants	Calcaire, chaux marneuse, craie	Argile	Sable	CVP2)	Source de Fe	Cru
	(% masse)					
SiO ₂	0,5 – 50	33 – 78	80 – 99	40 – 60	0,5 – 30	12 – 16
Al ₂ O ₃	0,1 – 20	7 – 30	0,5 – 7	20 – 30	0,2 – 4	2 – 5
Fe ₂ O ₃	0,2 – 5,9	4,0 – 15	0,0 – 4	5 – 15	50 – 93	1,5 – 2,5
Mn ₂ O ₃	0,02 – 0,15	0,090	0,051	0,127	0,1 – 4	0,0 – 0,5
Fe ₂ O ₃ et Mn ₂ O ₃	0,1 – 10	2 – 15	0,5 – 2		19 – 95	<2
CaO	20 – 55	0,2 – 25	0,1 – 3	2 – 10	0,1 – 34	40 – 45
MgO	0,2 – 6	0,3 – 5	0,3 – 0,5	1,0 – 3	0,5 – 7	0,3 – 5
K ₂ O	0 – 3,5	0,4 – 5	0,2 – 3	1 – 5	0,1 – 1	0,1 – 1,5
Na ₂ O	0,0 – 1,5	0,1 – 1,5	0,0 – 1	0,2 – 1,5	0,1 – 1	0,1 – 0,5
SO ₃ ¹⁾	0,0 – 0,7	0,0 – 4	0,0 – 0,5	0,0 – 1	0 – 3	0 – 1,5
Cl	0,0 – 0,6	0,0 – 1	Traces		0,0 – 0,5	0,0 – 0,3
TiO ₂	0,0 – 0,7	0,2 – 1,8	0,0 – 0,5	0,5 – 1,5	0,0 – 3	0,0 – 0,5
P ₂ O ₅	0,0 – 0,8	0,0 – 1,0	0,0 – 0,1	0,5 – 1,5	0,0 – 1	0,0 – 0,8
ZrO ₂		0,02				
CaCO ₃	96					
Perte au feu (CO ₂ +H ₂ O), LOI 9503)	2–44	1 – 20	<5	6,74	0,1 – 30	32 – 36
1) Teneur totale en soufre, exprimé en SO ₂ 2) Cendres volantes pulvérisées 3) LOI 950 = Perte au feu						

Tableau 1.8 : Analyses chimiques des matières premières et du cru de ciment pour la fabrication de clinker

[60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [81, Castle Cement UK, 2006], [90, Hongrie, 2006], [103,

Éléments		Argile et argilite	Calcaire, marne et craie	Cru
		mg/kg MS ¹⁾		
Antimoine	Sb	Aucune donnée disponible	1 – 3	<3
Arsenic	As	13 – 23	0,2 – 20	1 – 20
Béryllium	Be	2 – 4	0,05 – 2	0,1 – 2,5
Plomb	Pb	10 – 40	0,3 – 21	4 – 25
Cadmium	Cd	0,02 – 0,3	0,04 – 0,7	0,04 – 1
Chrome	Cr	20 – 109	1,2 – 21	10 – 40
Cobalt	Co	10 – 20	0,5 – 5	3 – 10
Cuivre	Cu	Aucune donnée disponible	3 – 12	6 – 60
Manganèse	Mn	Aucune donnée disponible	<250	100 – 360
Nickel	Ni	11 – 70	1,5 – 21	10 – 35
Mercure	Hg	0,02 – 0,15	<0,01 – 0,13	0,01 – 0,5
Sélénium	Se	Aucune donnée disponible	1 – 10	<10
Tellure	Te	Aucune donnée disponible	<4	<4
Thallium	Tl	0,7 – 1,6	0,05 – 1,6	0,11 – 3
Vanadium	V	98 – 170	4 – 80	20 – 102
Étain	Sn	Aucune donnée disponible	<1 – 5	<10
Zinc	Zn	59 – 115	10 – 40	20 – 47

1) MS : matière sèche

Tableau 1.9 : Métaux présents dans les matières premières et dans le cru
[60, VDI 2094 Allemagne, 2003]

Les matières premières conventionnelles peuvent également être remplacées par des déchets dont l'utilisation sera abordée dans la Section 1.2.4.2.

Dans la production de ciment blanc, il est essentiel de disposer de matières premières d'une grande pureté, notamment le Si, le Ca et l'Al. Les matières premières telles que le calcaire très pur, les types de craies blanches, le kaolin, le sable de quartz, le feldspath et la terre de diatomée sont sélectionnées avec une faible teneur en métaux (fer et manganèse). Les oxydes de métaux comptent parmi les facteurs déterminants pour la blancheur du produit. La composition chimique des matières premières est essentielle dans la production de ciment blanc de qualité supérieure. La Tableau 1.10 en fournit quelques exemples. Ces composants doivent toutefois être en quantité suffisante pour satisfaire aux exigences du procédé de cuisson. Des minéralisateurs sont parfois utilisés pour améliorer l'aptitude à la cuisson du cru. Les minéralisateurs connus et utilisés sont des agents fluxants comme les fluorures (généralement CaF₂) [119, Sobolev, 2001], [120, Espagne, 2007].

Matières premières	Composants chimiques des matières premières (%)						
	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃
Calcaire	<0,15	<0,015					
Argile	<1,0	Traces	65 – 80	<0,8			
Kaolin (approprié)	0,4 – 1,0	0	70 – 73	0 – 0,80	18 – 20		
Sable de quartz (pur)	<0,2		<96				
Autres ¹⁾	<0,5	<3,0		<0,2		<30 ppm	<0,05

1) Italie

Tableau 1.10 : Exemples de composition chimique des matières premières pour la fabrication de clinker de ciment blanc
[119, Sobolev, 2001], [120, Espagne, 2007], [138, Italie, 2007]

1.2.2 Stockage et préparation des matières premières

Intervenant avant la cuisson du cru dans le four, la préparation des matières premières est une opération très importante, car elle garantit la constance de la composition chimique du cru et permet d'obtenir une poudre de la finesse requise.

1.2.2.1 Stockage des matières premières

L'utilisation de halls de stockage dépend des conditions climatiques et de la quantité de matière fine (farine ou cru) produite par l'installation de concassage. Pour une usine d'une capacité de production de 3 000 tonnes/jour, ces bâtiments peuvent contenir de 20 000 à 40 000 tonnes de matériaux. La Figure 1.5 montre un exemple de hall de stockage de matières premières.



Figure 1.5 : Exemple de hall de stockage de matières premières
[81, Castle Cement UK, 2006]

La composition chimique des matières premières introduites dans le four doit être la plus homogène possible, ce qui est obtenu en contrôlant la charge dans le broyeur à cru. Si la qualité des matériaux extraits des carrières est variable, il est possible de procéder à un pré-mélange en les disposant en couches successives selon la longueur ou la circonférence du hall de stockage et en les prélevant perpendiculairement à l'axe des couches. Quand la composition chimique des matériaux extraits est relativement homogène, des systèmes plus simples de stockage et de reprise sont suffisants.

Les matières premières utilisées en faibles quantités, les additions minérales par exemple, peuvent être stockées dans des silos ou dans des stockages souterrains. Toutes les matières premières potentiellement nocives pour la santé des personnes ou l'environnement doivent être stockées et préparées dans les conditions particulières appropriées.

1.2.2.2 Broyage des matières premières

Le pesage et le dosage précis des matériaux introduits dans le broyeur sont importants, car ils déterminent la constance de la composition chimique du cru, essentielle pour la stabilité de fonctionnement du four et pour l'obtention d'un ciment de qualité. Le pesage et le dosage jouent aussi un rôle important pour l'efficacité énergétique de l'installation de broyage. Le plus utilisé des équipements de pesage et de dosage des matières premières alimentant les installations de broyage est le tablier d'alimentation suivi par le tapis peseur.

Dans la production du ciment blanc, les opérations de broyage doivent faire l'objet d'une attention particulière afin d'éviter que des morceaux ou de petites quantités de métaux colorants n'entrent dans la préparation. Le choix des corps broyants et du blindage du broyeur est également important, car il convient d'éviter toute contamination du cru avec du fer. Ainsi, les principales pièces de l'équipement sont en acier spécial ou en céramique. Le contrôle de l'humidité du cru permet d'améliorer la blancheur, tout comme la réduction de la durée de broyage grâce à l'utilisation d'accélérateurs/d'agents tensio-actifs qui peuvent toutefois se distinguer des adjuvants de broyage disponibles dans le commerce [120, Espagne, 2007].

Un équipement de granulation est recommandé dans certains cas à l'étape finale du procédé de préparation du cru, notamment lorsque la cuisson s'effectue dans un four à lit fluidisé [119, Sobolev, 2001].

1.2.2.2.1 Broyage des matières premières pour procédés en voie sèche et semi-sèche

Les matières premières, dans des proportions soigneusement contrôlées, sont broyées et homogénéisées de façon à former un mélange de composition chimique requise. Dans la voie sèche et semi-sèche, elles sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur. Un four auxiliaire peut être nécessaire pour fournir le complément de chaleur nécessaire si les matières premières contiennent une forte proportion d'humidité et pour le démarrage du four.

Les broyeurs types utilisés en voie sèche sont :

- le tube broyeur avec sortie centrale,
- le tube broyeur à courant d'air,
- le broyeur vertical à rouleaux,
- le broyeur horizontal à rouleaux (quelques installations en service uniquement).

D'autres systèmes de broyage sont un peu moins utilisés, comme :

- le tube broyeur avec sortie en bout en circuit fermé,
- le broyeur autogène,
- la presse à rouleaux avec ou sans broyeur (sècheur).

La finesse et la répartition granulométrique du produit issu du broyage des matières premières jouent un rôle important dans l'opération suivante, la cuisson. Le réglage des paramètres du séparateur utilisé pour trier le produit à la sortie du broyeur permet d'obtenir les valeurs requises. Les matériaux secs sont triés avec des séparateurs aérauliques. Les séparateurs de nouvelle génération, type cage de rotor, présentent plusieurs avantages :

- le broyeur consomme moins d'énergie (moins de surbroyage),
- la production de l'installation augmente (séparation efficace des particules),
- la répartition granulométrique et la régularité des produits sont meilleures.

1.2.2.2.2 Broyage des matières premières préparées en voie humide ou semi-humide

Le broyage humide est réservé aux matières premières préparées en voie humide ou semi-humide. Leurs composants sont broyés avec de l'eau pour former une pâte. Pour obtenir le degré de finesse requis et satisfaire aux critères de qualité actuels, les industriels privilégient l'utilisation d'installations de broyage en circuit fermé.

Normalement, la voie humide est réservée à la préparation des matières premières contenant plus de 20 % d'eau en masse. Les matériaux comme la craie, les marnes ou l'argile qui sont collants et contiennent naturellement beaucoup d'eau sont mous et peuvent, au premier stade de leur préparation, être broyés avec de l'eau. Le mélange est envoyé dans un délayeur où il est déchiqueté et écrasé par des herses rotatives ce qui le transforme en une pâte. Quand celle-ci est suffisamment fine, elle passe dans des tamis montés dans la paroi du broyeur puis elle est pompée et stockée dans des cuves. Il faut souvent la broyer une nouvelle fois pour obtenir une granulométrie satisfaisante, en particulier si on lui ajoute une autre matière première comme le sable.

Pour réduire la consommation de combustibles dans le four, l'addition d'eau au cours du broyage des matières premières est contrôlée et réduite au minimum nécessaire pour que la pâte ait la fluidité voulue et qu'elle réponde aux critères de pompabilité requis (32 à 40 % d'eau en masse). L'utilisation d'additifs chimiques peut permettre de la fluidifier et de réduire sa teneur en eau.

1.2.2.2.3 Homogénéisation et stockage du cru ou de la pâte

En sortant du broyeur, le cru ou la pâte doivent être malaxés et homogénéisés une nouvelle fois pour que le mélange acquière sa rhéologie optimale avant introduction dans les différents types de four. Le cru est homogénéisé et stocké dans des silos, la pâte dans des cuves ou dans des silos.

Des systèmes pneumatiques et mécaniques assurent le transport du cru dans les silos de stockage. Les convoyeurs mécaniques exigent en général un investissement élevé, mais leur coût d'exploitation est très inférieur à celui des systèmes pneumatiques. Le système le plus couramment utilisé associe des aéroglossières ou des convoyeurs à vis ou à chaîne à un tapis élévateur à godets.

1.2.3 Stockage et préparation des combustibles

Différents combustibles (conventionnels et résiduaires) peuvent fournir la chaleur et l'énergie nécessaires au procédé. Les différents types de combustibles conventionnels les plus utilisés dans les fours à clinker sont :

- les combustibles solides, par exemple le charbon, mais aussi le coke de pétrole, le lignite et, dans certains cas, les schistes bitumineux,
- les combustibles liquides, comme le fioul, notamment le fioul à haute viscosité,
- les combustibles gazeux, comme le gaz naturel.

Les cendres produites par la combustion de ces produits sont majoritairement formées de silice et d'alumine, et peuvent également contenir des traces de métaux, qui se combinent avec les matières premières et deviennent partie intégrante du clinker. Cela doit être pris en compte dans le calcul de la proportion de matières premières : il est donc souhaitable d'utiliser un combustible dont la teneur en cendres soit régulière et appropriée, ce qui ne signifie pas forcément faible. Le Tableau 1.11 présente des exemples d'analyses chimiques des métaux présents dans le charbon utilisé en Allemagne.

Éléments		Houille/Lignite
		mg/kg MS ¹⁾
Antimoine	Sb	0,4 – 2
Arsenic	As	1 – 50
Béryllium	Be	<0,1 – 3,3
Plomb	Pb	1,5 – 273
Cadmium	Cd	<0,1 – 10
Chrome	Cr	1,5 – 81
Cobalt	Co	<1 – 40
Cuivre	Cu	1 – 100
Manganèse	Mn	82 – 250
Nickel	Ni	<1 – 100
Mercuré	Hg	0,1 – 3,3
Sélénium	Se	0,6 – 2
Tellure	Te	0,2 – 1
Thallium	Tl	0,1 – 5,5
Vanadium	V	1 – 200
Etain	Sn	0,8 – 2,3
Zinc	Zn	6 – 220
1) MS : matière sèche		

Tableau 1.11 : Analyses chimiques des métaux présents dans le charbon [60, VDI 2094 Allemagne, 2003]

Le coke de pétrole et le charbon sont les principaux combustibles fossiles utilisés dans l'industrie du ciment en Europe. Du fait de leurs coûts élevés, le gaz naturel ou le fioul sont normalement exclus, mais le choix du combustible dépend de la situation locale (mines de charbon en exploitation dans un pays donné, par exemple). Cependant, comme la température dans les fours est très élevée et que les temps de séjour y sont longs, les fours ont une capacité de destruction des matières organiques considérable (cf. Section 1.2.4.1) ce qui permet d'utiliser toute une variété de combustibles moins chers et en particulier différents types de déchets. Ces dernières années ont vu une augmentation de l'utilisation des déchets (cf. Section 1.2.4).

Pour minimiser les déperditions de chaleur, l'excès d'oxygène dans les fours est le plus faible possible. Le dosage du combustible doit donc être extrêmement uniforme et fiable et il doit se présenter sous une forme permettant une combustion facile et rapide. Tous les combustibles liquides et gazeux remplissent ces conditions. En cas d'utilisation de combustibles solides pulvérisés, les trémies, convoyeurs et distributeurs doivent être conçus en fonction de ces critères de combustion. La plus grande partie du combustible utilisé (65 à 85 %) est formée de combustible brûlant facilement, le reste (15 à 35 %) peut être constitué de matériaux grossièrement concassés ou en morceaux.

Dans le cas du ciment blanc, le choix du combustible doit faire l'objet d'une attention particulière, car des éléments contenus dans ses cendres peuvent contaminer le clinker et par conséquent altérer la couleur désirée du ciment. En 2007, les producteurs de ciment blanc n'ont utilisé que de manière limitée des déchets combustibles sélectionnés.

1.2.3.1 Stockage des combustibles conventionnels

Le charbon brut et le coke de pétrole sont stockés dans les mêmes conditions que les matières premières, c'est-à-dire le plus souvent à l'abri, dans un espace couvert. La constitution à l'extérieur de stocks compactés et volumineux est réservée au stockage de longue durée. Ces stockages de matières premières sont parfois semés d'herbe pour prévenir l'érosion par la pluie et le vent. Leurs eaux de ruissellement posent un problème, mais elles peuvent être recueillies et traitées grâce à la construction de radiers étanches en béton. Le respect des règles normales relatives au compactage et à la hauteur des stocks de charbon à teneur relativement élevée en matières volatiles permet d'éviter le risque d'une inflammation spontanée en cas de stockage prolongé.

Le charbon et le coke de pétrole pulvérisés sont stockés uniquement en silos. Pour des raisons de sécurité (danger d'explosion en cas de feu couvant ou de décharge d'électricité statique) ces silos doivent être munis d'un système d'extraction de matière et être équipés des systèmes de sécurité standard.

Le fioul est stocké dans des cuves verticales en acier parfois isolées pour qu'il reste à une température permettant de le pomper (50 à 60 °C). Les points de soutirage peuvent aussi être équipés d'un système de chauffage qui maintient le fioul à la bonne température localement.

Le gaz naturel n'est pas stocké sur le site de production du ciment. Le réseau international de distribution de gaz haute pression constitue le système de stockage.

1.2.3.2 Préparation des combustibles conventionnels

Les combustibles solides conventionnels sont généralement préparés sur le site (concassage, broyage, séchage). Le charbon et le coke de pétrole sont pulvérisés dans les installations de broyage équipées d'équipements similaires à ceux des stations de broyage des matières premières jusqu'à ce que leur finesse soit comparable à celle du cru. La finesse du combustible pulvérisé est importante, car s'il est trop fin, la flamme risque d'être beaucoup trop chaude et s'il ne l'est pas assez, la combustion sera de mauvaise qualité. Les combustibles solides peu volatils ou contenant peu de substances volatiles doivent être broyés plus finement. Si le four et le refroidisseur ne fournissent pas assez d'air chaud pour sécher le cru, il peut être nécessaire d'installer un four auxiliaire. Ces installations doivent être équipées de dispositifs de protection anti-incendie et antidéflagrants.

Trois types d'équipements sont utilisés pour broyer le charbon :

- le tube broyeur à courant d'air,
- le broyeur vertical à rouleaux ou le broyeur à boulets,
- le broyeur à percussion.

A la sortie du broyeur, le combustible solide peut être brûlé directement dans le four, mais dans les installations modernes, il est généralement stocké dans des silos pour permettre l'utilisation de brûleurs avec un meilleur rendement thermique (chauffe indirecte) alimentés avec peu d'air primaire.

Les équipements servant à broyer, stocker et brûler les combustibles solides doivent être conçus et utilisés pour prévenir tout risque d'incendie ou d'explosion. Les précautions élémentaires consistent à bien contrôler la température de l'air et à éviter l'accumulation de matières fines dans des recoins exposés à la chaleur.

Préparation du fioul : pour faciliter son dosage et sa combustion, il est porté à une température de 120 à 140 °C, ce qui abaisse sa viscosité à 10 – 20 cSt. De plus, il est mis sous une pression de 20 à 40 bars.

Préparation du gaz naturel : la pression de gaz dans le réseau d'alimentation est de 30 à 80 bars ; avant combustion, elle doit être abaissée à la pression du réseau de l'usine (3 à 10 bars) puis à la pression d'alimentation du brûleur, soit environ 1 bar (surpression). La pression est abaissée une première fois dans la station de transfert du gaz où se trouve également le système de mesure de consommation. Pour éviter que l'équipement gèle sous l'action de l'effet Joule-Thomson ou effet isenthalpique, le gaz naturel est préchauffé avant de passer dans le détendeur.

Il est également possible d'abaisser la pression du gaz en le faisant passer dans une turbine à expansion raccordée à une génératrice ce qui permet de valoriser une partie de l'énergie nécessaire à la compression du gaz.

1.2.4 Utilisation des déchets

En Europe, l'industrie du ciment utilise une quantité importante de combustibles dérivés de déchets qui peuvent, dans certaines usines, remplacer les combustibles fossiles jusqu'à hauteur de 80 %. Ainsi, l'industrie du ciment peut apporter sa contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la diminution de la consommation des ressources naturelles.

L'interdiction de la mise en décharge des déchets non traités dans certains États membres de l'Union a donné lieu à l'ouverture d'un nombre croissant d'usines de traitement mécanique et biomécanique des déchets. Par conséquent, l'utilisation de fractions de déchets prétraités fait l'objet d'une attention de plus en plus grande. Après un traitement approprié, des fractions de déchets peuvent satisfaire aux exigences de valorisation respectueuse de l'environnement dans des cimenteries. Cela fait de nombreuses années que l'industrie du ciment de l'UE des 27 participe à la valorisation de flux de déchets sélectionnés dans les cimenteries. Traditionnellement grosse consommatrice de ressources naturelles non renouvelables, de minéraux et de combustibles fossiles, l'industrie du ciment s'est engagée à la fois à utiliser les déchets pour la conservation de ces ressources et à ne produire aucun déchet ultime [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

Étant donné que le traitement des déchets n'est pas abordé dans ce document, pour des informations utiles concernant le traitement des déchets, se reporter au document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les industries de traitement des déchets [48, Commission européenne, 2005]. Il convient en outre de prendre en considération les exigences des réglementations européennes et nationales existantes. Par exemple, lors de la co-incinération des déchets, il convient de respecter les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets [59, Commission européenne, 2000].

1.2.4.1 Généralités

Dans la fabrication du ciment, il est possible de remplacer des matières premières primaires par différents types de déchets de manière à préserver les ressources naturelles. En fait, les caractéristiques de la cuisson même du clinker rendent possibles des applications bénéfiques pour l'environnement du recyclage des déchets en énergie ainsi qu'en matière. La liste ci-dessous résume les caractéristiques essentielles du procédé permettant l'utilisation des déchets :

- températures maximales d'environ 2 000 °C (combustion principale, température de la flamme) dans les fours rotatifs,
- temps de séjour des effluents gazeux d'environ 8 secondes à des températures supérieures à 1 200 °C dans les fours rotatifs,

- températures du matériau d'environ 1 450 °C dans la zone de clinkérisation du four rotatif,
- atmosphère gazeuse oxydante dans le four rotatif,
- temps de séjour des effluents gazeux dans l'installation de combustion secondaire de plus de 2 secondes à des températures supérieures à 850 °C ; dans le précalcinateur, les temps de séjour sont proportionnellement plus longs et les températures plus élevées,
- températures du solide de 850 °C dans l'installation de combustion secondaire ou le calcinateur, ou les deux,
- conditions de combustion uniformes pour les fluctuations de charge en raison de températures élevées à des temps de séjour suffisamment longs,
- destruction des polluants organiques en raison de températures élevées à des temps de séjour suffisamment longs,
- sorption des composants gazeux comme le HF, le HCl ou le SO₂ sur des réactifs alcalins,
- grande capacité de rétention des métaux lourds liés aux particules,
- temps de séjour courts des gaz d'exhaure dans la plage de températures connue pour entraîner la synthèse de novo des PCDD/F,
- utilisation complète des cendres du combustible en tant que composants du clinker permettant à la fois un recyclage de la matière (par exemple également en tant que composant de la matière première) et une valorisation énergétique,
- aucun déchet spécifique au produit n'est généré en raison d'une utilisation complète des matériaux dans la matrice du clinker ; cependant, certaines cimenteries européennes se débarrassent des poussières du bypass,
- incorporation chimico-minéralogique de métaux lourds non volatils dans la matrice du clinker [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

Les études montrent que les substances dangereuses sont mieux absorbées par le matériau et le clinker dans les fours rotatifs que dans d'autres types de fours, par exemple les fours verticaux [75, Estonie, 2006], [76, Allemagne, 2006].

De nombreux types de déchets différents sont utilisés en tant que matières premières ou combustibles, ou les deux. Avant d'envisager l'utilisation des déchets, il convient de tenir compte de plusieurs principes fondamentaux comme la sélection appropriée des déchets et une analyse approfondie de la procédure d'admission et de prétraitement des déchets. Afin de maintenir les niveaux de qualité du clinker qui capture les cendres du combustible, il convient de traiter ces déchets. Il n'existe pas de réponse unique quant au choix du type de déchet pouvant finalement être utilisé dans une usine donnée.

L'étude et les décisions dépendront du procédé de production du clinker et des conditions d'exploitation, des matières premières et de la composition des combustibles, des points d'alimentation, de la technique d'épuration des gaz résiduels utilisée, des problèmes donnés de gestion des déchets ainsi que des exigences des réglementations européennes et nationales existantes, par exemple la Directive sur l'incinération des déchets [59, Commission européenne, 2000].

En règle générale, les déchets pouvant servir de combustible ou de matières premières, ou les deux, doivent apporter la valeur ajoutée suivante au four à ciment :

- pouvoir calorifique du déchet,
- valeur matière du déchet.

Il convient en outre de tenir compte des volumes et des catégories des déchets ainsi que de leur composition et de leurs caractéristiques physiques et chimiques et de leurs éléments polluants. Les combustibles dérivés de déchets utilisés dans l'industrie du ciment proviennent exclusivement de flux de déchets sélectionnés qui requièrent généralement un prétraitement (par exemple déchiquetage, mélange, broyage et homogénéisation) et une assurance qualité appropriée. Ce sont généralement les usines de traitement des déchets qui s'occupent de la préparation des déchets.

Points d'alimentation pour l'insertion des déchets dans le four

Les déchets utilisés comme matières premières sont habituellement introduits dans le four de la même manière que les matières premières conventionnelles, c'est-à-dire par le point d'alimentation normal du cru.

Comme l'explique la Section 1.2.5.1, il est possible d'utiliser différents points d'alimentation pour introduire les combustibles dans le four à ciment. Ces points d'alimentation peuvent également servir à introduire les déchets utilisés comme combustible ou matières premières, ou les deux, dans le procédé de production du ciment. Il a été remarqué que le mode d'introduction des combustibles dans le four est très important en raison de l'effet qu'il peut avoir sur les émissions. Parmi ces points d'alimentation, il n'existe en général qu'un seul moyen de faire traverser les gaz résiduels des combustibles par la zone de plus haute température du four, à savoir à travers le brûleur principal. Pour ce qui est des autres points d'alimentation, la température et le temps de séjour dépendent de la conception et de la conduite du four, comme décrit ci-dessus.

Les déchets et résidus qui alimentent le brûleur principal sont décomposés dans la zone de chauffe primaire où la température élevée de la flamme peut atteindre 2 000 °C. Des brûleurs à plusieurs canaux sont conçus pour l'utilisation de différents types de combustibles, y compris de déchets combustibles. Les déchets alimentant un brûleur auxiliaire, un préchauffeur ou un précalcinateur brûlent à une température plus basse parfois insuffisante pour détruire les matières organiques halogénées. Les composés volatils présents dans les déchets introduits avec la matière ou les déchets solides peuvent se vaporiser. Ils ne traversent pas la zone de chauffe primaire et peuvent ne pas être décomposés ou ne pas s'intégrer chimiquement au clinker. L'incinération de déchets contenant des métaux volatils (mercure, cadmium, thallium) ou des composés organiques volatils peut donc entraîner une augmentation des émissions de ces substances si leur mise en œuvre est inappropriée. Il convient de prêter une attention particulière aux déchets contenant des composants pouvant se volatiliser à des températures moins élevées avant la zone de décarbonatation (par exemple hydrocarbures, solvants, huiles usagées). En effet, ceux-ci doivent être introduits dans les zones de température élevée adéquates du four.

Efficacité énergétique en utilisant des déchets

L'industrie du ciment est parvenue à améliorer l'efficacité énergétique des combustibles utilisés dans la fabrication du ciment et poursuit ses efforts dans ce sens. Cependant, le pouvoir calorifique des déchets combustibles utilisés dans le procédé constitue un critère de qualité très important pour bénéficier d'une amélioration de l'efficacité énergétique et apporter un intrant positif au procédé thermique qui supporte la calcination [76, Allemagne, 2006], [89, ERFO, 2005], [103, CEMBUREAU, 2006].

Les impacts de l'utilisation des déchets

La Section 1.3.4.13 de ce document comporte des informations sur les impacts de l'utilisation des déchets sur le comportement des émissions et la Section 1.3.4.14 traite des impacts sur la qualité du produit.

La Section 1.3.9 traite de la mesure et du contrôle des paramètres et des émissions des déchets ou de matières premières, ou les deux. En outre, la Section 4.2.2 de ce document présente des données spécifiques aux usines, par exemple sur l'utilisation de déchets.

1.2.4.2 Utilisation de déchets comme matières premières

L'adéquation de la composition chimique des déchets utilisés comme matières premières est importante, car les déchets doivent apporter les constituants nécessaires à la production du clinker. Les principaux éléments chimiques recherchés sont la chaux, la silice, l'alumine et le fer ainsi que le soufre, des éléments alcalins et d'autres éléments pouvant être classés dans différents groupes en fonction de leur composition chimique. L'utilisation de déchets en tant que matières premières dans la cuisson du clinker suppose la substitution du soufre et des oxydes contenus dans ces déchets. Il s'agit de l'oxyde de calcium (CaO), de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3) ou de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) respectivement pour chaque constituant de la matière première. Les cendres de centrales thermiques (cendres volantes), les laitiers de hauts fourneaux et autres résidus industriels peuvent remplacer en partie les matières premières naturelles. Le Tableau 1.12 indique les types de déchets les plus utilisés en 2006 comme matières premières dans la fabrication du ciment en Europe.

Cendres volantes	Laitiers de hauts fourneaux	Fumées de silice
Scories sidérurgiques	Boues papetières	Cendres de pyrites
Sable de fonderie usé	Terre polluée par les hydrocarbures	
Gypse artificiel (venant de la désulfuration des gaz résiduaires et de la fabrication de l'acide phosphorique)		

Tableau 1.12 : Types de déchets les plus utilisés comme matières premières dans l'industrie européenne du ciment

[8, CEMBUREAU, 2001], [91, CEMBUREAU, 2006]

Les broyeurs sont en outre alimentés par d'autres déchets servant de produits d'addition pour le « broyage mixte ». Les cendres volantes peuvent être utilisées aussi bien en tant que matières premières dans la fabrication du clinker qu'en tant que produits d'addition de broyage mixte pour le ciment. Les cendres volantes peuvent remplacer jusqu'à 50 % du clinker Portland, mais elles peuvent toutefois contenir du mercure. De plus, un gypse industriel adapté se prête bien à une utilisation en tant que composant sulfaté. Le Tableau 1.13 fournit une vue d'ensemble des déchets utilisés comme matières premières classés dans différents groupes selon leur composition chimique.

Groupe de matière première	Exemple de déchets utilisés comme matières premières
Groupe Ca	Chaux industrielle (calcaire de rebut) Lait de chaux Boue de carbure Boue du traitement de l'eau potable
Groupe Si	Sable de fonderie usé Sable
Groupe Fe	Laitier de haut fourneau et scories de convertisseur Cendres de pyrites Hématite synthétique Boue rouge
Groupe Al	Boues industrielles
Groupe Si-Al-Ca	Cendres volantes Scories Matières fines de broyeur Terre
Groupe S	Gypse industriel
Groupe F	CaF_2 Boues de filtration

Tableau 1.13 : Liste type des déchets utilisés comme matières premières dans les fours à ciment de l'UE des 25, classés en fonction de leur composition chimique

[76, Allemagne, 2006], [91, CEMBUREAU, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006]

Tout comme celles provenant des combustibles conventionnels, les cendres des déchets combustibles apportent des composants minéraux au clinker. Le diagramme ternaire de la Figure 1.6 montre la composition de différentes cendres de combustible et de différents déchets utilisés comme matières premières dont la teneur en CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3 , leurs principaux composants, est représentée. On peut donc voir que le clinker présente une composition définie qui détermine les propriétés hydrauliques caractéristiques du ciment.

Cela signifie que pour obtenir la composition de clinker désirée, il convient de prêter une attention particulière à l'association de l'ensemble des matières premières et des cendres de combustibles en tenant compte de leur composition minérale et du débit d'alimentation.

Les déchets utilisés comme matières premières entrent dans la cuisson du clinker ou le calcinateur en suivant le même parcours que le cru ou par l'entrée du four ou le calcinateur, ou les deux. Le cru entrant dans le four peut libérer des composants organiques pendant la phase de préchauffage dans le préchauffeur en raison de températures plus basses parfois insuffisantes pour détruire les matières organiques halogénées. Les émissions potentielles de composants organiques volatils des déchets utilisés comme matières premières doivent être vérifiées et il convient de sélectionner le point d'alimentation, par exemple le brûleur du four, en conséquence.

Le sable de fonderie usé à teneur relativement élevée en matières volatiles doit par exemple être introduit par l'entrée du four. Les liants organiques résiduels utilisés dans les produits moulés en sable lié chimiquement peuvent se décomposer dans le préchauffeur. Cependant, un court temps de séjour du matériau dans la phase de basse température du préchauffeur assure que les volatils ne sont pas émis. Un prétraitement du sable de fonderie usé, comme la séparation des poussières, peut en réduire la teneur en métaux lourds. Lorsque du gypse industriel et des cendres volantes sont utilisés, le gypse est introduit à la station de broyage. Le pouvoir calorifique valorisable des cendres riches en carbone, c'est-à-dire jusqu'à 20 % de carbone autorisé, peut être utilisé dans le procédé de production du clinker [76, Allemagne, 2006], [91, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

Les critères suivants sont à considérer dans le choix et l'utilisation de déchets en tant que matières premières :

- le déchet est principalement composé des composants du clinker,
- faible concentration en métaux lourds volatils, c'est-à-dire qu'il convient de prendre en compte la teneur en mercure, en thallium et en autres types de métaux,
- contrôle régulier des matières entrantes, par exemple échantillonnage et analyse des déchets utilisés.

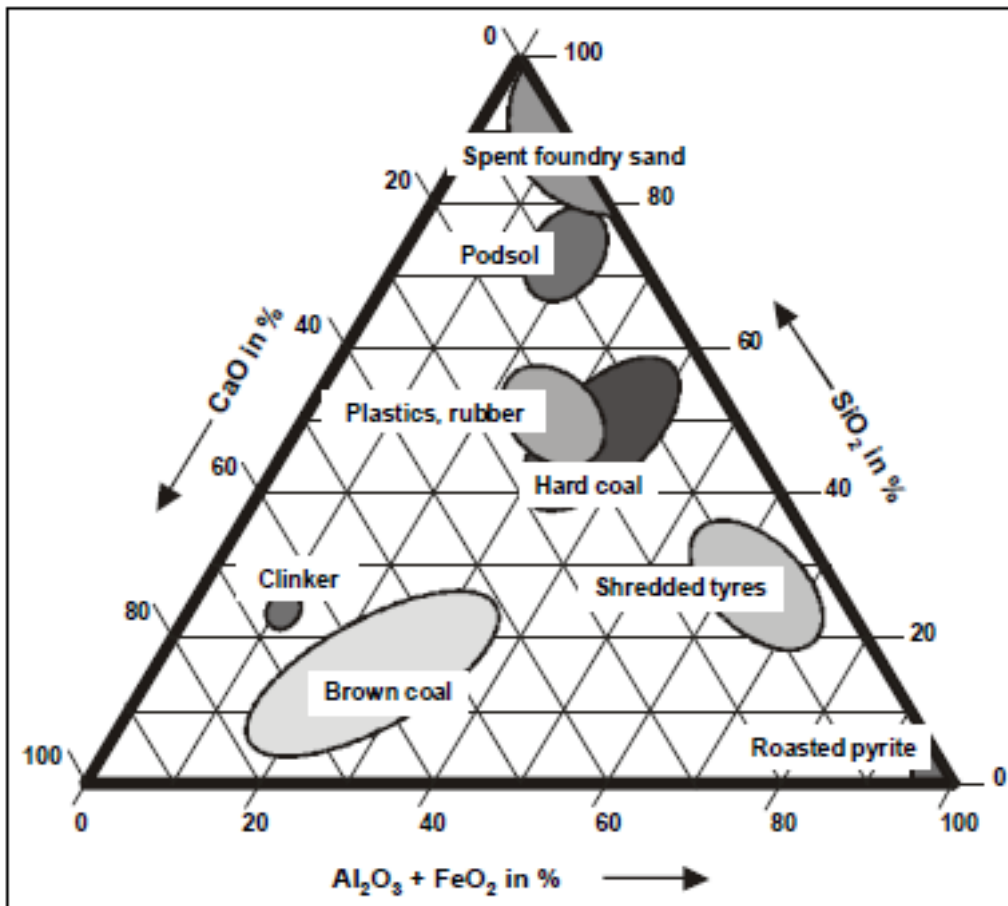


Figure 1.6 : Diagramme ternaire CaO , SiO_2 et $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ du clinker et des cendres des différents combustibles et matières premières [76, Allemagne, 2006]

1.2.4.3 Utilisation de déchets comme combustible

Il est possible de remplacer les combustibles conventionnels par des déchets combustibles, c'est-à-dire issus de fractions de déchets prétraités et triés, y compris par des combustibles solides et liquides valorisés ou de la biomasse, ou les deux. De nombreux types de déchets différents sont utilisés en tant que combustibles, y compris les cendres résiduelles. Qu'ils se présentent sous forme solide, liquide ou pâteuse, les déchets sont définis par leur origine, par exemple industrielle, agricole et urbaine. La Section 1.3.3.3 décrit l'utilisation des déchets combustibles et des impacts sur le comportement des émissions sont présentés dans la Section 1.3.4.13.

1.2.4.3.1 Types de déchets combustibles

Les conditions de la cuisson du clinker sont idéales pour l'utilisation de différents types de déchets à la place des combustibles conventionnels (cf. Section 1.2.4.1). Le Tableau 1.14 répertorie différents types de déchets, dangereux ou non, utilisés comme combustible dans les fours à ciment européens. Étant donné que ces déchets calorifiques peuvent se substituer au combustible principal, il est essentiel que leur qualité soit régulière (par exemple pouvoir calorifique adéquat, teneur en métaux, en composés halogénés (par exemple chlore) et en cendres). De plus, les déchets doivent être compatibles avec les brûleurs. Les déchets combustibles sont de plus en plus utilisés dans la production de clinker. Cependant, cette augmentation concerne davantage les déchets non dangereux que les déchets dangereux [74, CEMBUREAU, 2006], [75, Estonie, 2006], [76, Allemagne, 2006], [92, Autriche, 2006].

Le Tableau 1.14 fournit une liste des déchets combustibles utilisés, classés en 14 groupes. Ces groupes recouvrent plusieurs rubriques du CED (Catalogue Européen des Déchets). Le Tableau 4.1 de la Section 4.2.1 fournit une liste complète des différents groupes ainsi que des catégories de déchets et leur description. En outre, le Tableau 1.20 de la Section 1.3.3.3 fournit des exemples de pouvoir calorifique de plusieurs types de déchets [74, CEMBUREAU, 2006], [98, Commission européenne, 2000], [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

N° de groupe.1)	Types de déchets combustibles (dangereux et non dangereux)
1	Bois, papier, carton
2	Textiles
3	Plastiques
4	Fractions traitées (par exemple RDF)
5	Caoutchouc/Pneus
6	Boues industrielles
7	Boues de stations d'épuration municipales
8	Farines, graisses animales
9	Déchets de charbon/carbone
10	Déchets agricoles
11	Déchets solides (sciures imprégnées)
12	Solvants et déchets associés
13	Déchets de pétrole et huileux
14	Autres
1) Chaque groupe recouvre plusieurs rubriques du CED, voir Tableau 4.1 de la Section 4.2.1	

Tableau 1.14 : Différents types de déchets utilisés comme combustible dans les fours à ciment de l'UE des 27 en 2003 et en 2004

[74, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

1.2.4.3.1.1 Déchets combustibles solides

Tous les déchets solides combustibles ne conviennent pas pour la cuisson du clinker. Les déchets solides peuvent constituer un mélange homogène ou non composé d'éléments très différents de diverses origines, par exemple :

- fractions combustibles, par exemple papier, carton, plastiques, caoutchouc et résidus de bois,
- différentes quantités de matières internes contenant des fractions organiques, par exemple sable, pierre, céramique, métaux ferreux/non ferreux et matières organiques humides,
- fractions dangereuses, par exemple goudron, sciures imprégnées ou matières non dangereuses.

Les déchets tels que les déchets municipaux mélangés, les déchets industriels mélangés ou les déblais mélangés ainsi que certains déchets dangereux solides doivent être prétraités dans des installations de gestion des déchets avant d'être utilisés comme combustible. Le niveau de traitement des déchets (tri, broyage et granulation) dépend de la destination du combustible qui en est issu.

Les techniques de préparation du combustible solide varient considérablement en fonction de la source et du type de déchet ainsi que des exigences de l'industrie du ciment. L'installation de transfert et le système de chauffe utilisés détermineront des conditions importantes pour transporter le déchet combustible dans le four :

- l'installation de combustion principale (en entrée/sortie de four, injection des déchets combustibles à l'aide de lances) : des déchets extrêmement abrasifs, comme des boues déshydratées, ainsi que des formes et des tailles de particules inhabituelles peuvent entraîner des problèmes de fonctionnement. Lorsque le déchet combustible solide est acheminé dans le four par des systèmes de transfert pneumatiques, il est possible d'éviter l'obstruction et la détérioration des pièces rotatives. Le volume d'air de transport injecté dans le four avec les déchets est négligeable pour la stœchiométrie de la combustion du four. Des particules de plus grosse taille exigent de plus grandes lignes de convoyeur pneumatique et de plus grandes soufflantes. Par conséquent, la réduction de la taille et la granulation douce du combustible résiduaire constituent des étapes de traitement importantes. (La taille des particules ne doit généralement pas excéder les 25 mm). Un compactage par granulation douce présente l'avantage d'améliorer les caractéristiques de flux et de dosage du combustible ;
- l'installation de combustion secondaire (le combustible est introduit par l'entrée du four, la conduite montante entre l'entrée du four rotatif et l'étage cyclonique le plus bas ou le calcinateur) : la restriction de taille des déchets combustibles solides n'est pas importante pour l'installation de combustion secondaire. Il est possible d'introduire même des pneus entiers par l'entrée du four ou par la technologie en milieu de four. Il est en outre possible d'utiliser des déchets à haute teneur en cendres.

Différents types de déchets solides sont utilisés, par exemple :

- déchets non dangereux répertoriés dans le Tableau 1.14, numéro de groupe 1 à 10,
- déchets dangereux répertoriés dans le Tableau 1.14, numéro de groupe 11 à 13.

Les Figures 1.7, 1.8 et 1.9 montrent des exemples de mélanges de déchets prétraités utilisés dans les cimenteries, par exemple :

- déchets dangereux, sciures imprégnées,
- combustibles issus de papiers, textiles, déjà utilisés ou non, fabriqués à partir de film en polyéthylène, de film photo, de papier, de polypropylène, de matières d'emballage et de plastiques,
- combustibles issus de déchets ménagers, de papier trié, de carton, de bois, de tapis, de textiles et de plastiques constituant un combustible solide, propre et non dangereux.

Les déchets sont analysés et préparés spécifiquement pour être utilisés dans des fours à ciment [45, Schorcht, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [107, Belgique, 2006].



Figure 1.7 : Déchets dangereux - Sciure de bois imprégnée
[168, TWG CLM, 2007]



Figure 1.8 : Déchets combustibles spécifiquement préparés à base de papier, de matières plastiques et de textiles
[81, Castle Cement 11K, 2006]



Figure 1.9 : Déchets ménagers spécifiquement préparés utilisés comme combustible dans les fours à ciment
[82, CEMEX Rugby, Royaume-Uni. 2006]

1.2.4.3.1.2 *Déchets combustibles liquides*

La préparation des déchets combustibles liquides peut s'effectuer en mélangeant ou en prétraitant dans des installations de gestion des déchets spéciaux différents déchets, comme des solvants usés, des résidus de peinture ou de l'huile usagée présentant un pouvoir calorifique adapté. Pour plus d'informations utiles concernant le traitement des déchets, se reporter au document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les industries de traitement des déchets [48, Commission européenne, 2005].

Lors de la manipulation de déchets combustibles liquides, par exemple durant le stockage et l'introduction dans le four, il convient de prêter attention à certains déchets dangereux (par exemple les solvants) afin d'éviter toute émission de composés organiques. Plusieurs techniques, par exemple la récupération des vapeurs, peuvent être utilisées lorsque nécessaire. Les systèmes de récupération des vapeurs fonctionnent de manière à ne permettre la circulation du flux de matières organiques que lorsqu'ils sont connectés et à ne rejeter, eux-mêmes ainsi que leurs installations connexes, aucun gaz dans l'air pendant leur fonctionnement normal, à l'exception des rejets nécessaires pour des raisons de sécurité [76, Allemagne, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

1.2.4.3.2 **Exigences de qualité des déchets et contrôle des matières entrantes**

La qualité constante des déchets utilisés comme matières premières ou combustibles, ou les deux, dans les fours à ciment est essentielle. Étant donné qu'ils sont entièrement absorbés par le clinker, ils doivent atteindre différents niveaux de qualité et il convient également de réduire au minimum leurs effets négatifs en matière d'émissions atmosphériques. Un système d'assurance qualité est nécessaire de manière à garantir les caractéristiques du déchet combustible ; il doit notamment contenir des dispositions concernant l'échantillonnage, la préparation des échantillons, l'analyse et le contrôle extérieur. Les spécifications techniques du Comité européen de normalisation, comme le CEN/TC 343 « Combustibles solides de récupération », fournissent des informations détaillées. Il convient en outre de tenir compte des exigences des réglementations européennes et nationales existantes. Lors de la co-incinération de déchets, il convient de respecter les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets ; l'exploitant doit par exemple suivre une procédure de réception lorsqu'il utilise des déchets dangereux [59, Commission européenne, 2000]. En règle générale pour les exigences de qualité, les déchets pouvant servir de combustible ou matières premières, ou les deux, doivent apporter les valeurs ajoutées suivantes au four à ciment :

- pouvoir calorifique du déchet,
- valeur matière du déchet.

Les déchets présentant un pouvoir calorifique adéquat peuvent remplacer le combustible principal dans les fours à ciment. Il convient de noter que le pouvoir calorifique de ces déchets est très variable (cf. Section 1.3.3.3).

Les déchets combustibles ou les déchets comportant des fractions calorifiques séparables utilisés comme combustible sont généralement préparés à l'extérieur de la cimenterie. Ces déchets sont normalement préparés par le fournisseur ou par les organismes spécialisés dans le traitement des déchets dans des installations de gestion des déchets spéciaux de manière à pouvoir être utilisés dans des fours à ciment sans aucun traitement supplémentaire à la cimenterie. De plus, les déchets livrés sont également contrôlés et régulièrement analysés par le personnel de la cimenterie avant d'être utilisés dans le four à ciment. Différents critères de qualité sont contrôlés à l'aide d'un équipement de laboratoire spécial.

Les techniques de préparation et de mélange de certaines qualités de déchets combustibles dépendent des caractéristiques des matières entrantes ainsi que des exigences des utilisateurs. Même les déchets spécifiques d'une production sont traités et mélangés avant leur utilisation dans des centres de traitement afin de produire un mélange homogène aux qualités presque constantes, notamment en ce qui concerne les propriétés thermiques et leur composition chimique. Il n'existe que certains cas où les déchets peuvent être utilisés directement, tels que livrés, sans aucun traitement, par exemple les pneus et les huiles usagées. Les déchets hétérogènes, comme les déchets solides mélangés provenant de différentes sources ou de fractions triées de déchets municipaux en mélange, requièrent une surveillance accrue afin d'atteindre une qualité fiable avec un faible apport de substances polluantes constant.

Pour les déchets combustibles, le pouvoir calorifique ainsi que la teneur en eau, en cendres, en soufre, en chlore et en métaux lourds (notamment le mercure, le cadmium et le thallium) constituent des caractéristiques et des paramètres importants. Leur compatibilité avec les brûleurs est en outre essentielle. Le chlore peut avoir un impact négatif sur le procédé de production. La concentration en chlore admissible dépend donc des particularités de chaque site ; elle doit toutefois être maintenue au niveau le plus bas possible afin d'éviter les problèmes de fonctionnement à l'intérieur du four, comme un colmatage dans le préchauffeur. Lorsqu'une grande quantité de chlore est introduite, il peut être nécessaire d'utiliser un bypass pour le chlore afin d'éviter la corrosion, les colmatages, les arrêts, etc. (cf. Section 1.2.5.4.1). Les concentrations en chlore sont généralement comprises entre 0,5 et 2 %. L'UE des 27 a défini ses propres systèmes et spécifications visant à évaluer et à contrôler si les déchets combustibles sont aptes à être utilisés. Des listes de concentrations maximales de polluants ont par exemple été dressées pour les déchets sélectionnés pour la cuisson du clinker. Les particularités de l'usine ont été prises en considération dans les spécifications qui s'appuient tant sur les exigences de procédé propres à l'usine que sur les permis. Les spécifications déterminent en outre les normes techniques pour la production de déchets combustibles liquides. La Section 4.2.2.1 et le Tableau 4.9 contiennent un exemple de spécifications internes relatives aux déchets combustibles. En outre, la Section 4.2.2.1.1 fournit des exemples de critères quant à la teneur en différentes substances des déchets combustibles appropriés acceptées dans certains pays de l'Union.

Les autres systèmes en utilisation s'intéressent principalement à la teneur en métaux (cf. Section 1.2.4.3.2.1). Il convient de remarquer que d'autres matériaux qui ne répondent pas à l'ensemble de ces conditions peuvent également être utilisés. Si des boues d'épuration ou des résidus de bois sont utilisés, la quantité de mercure introduite doit être régulièrement surveillée en raison des possibles émissions.

Les déchets combustibles doivent en outre être disponibles en quantité suffisante. Pour les mono-flux, la sélection à la source est la première mesure à prendre de manière à limiter les matériaux susceptibles de provoquer des problèmes de fonctionnement ou de qualité dans la production du ciment.

Le choix des combustibles (conventionnels ou déchets) doit tenir compte des exigences de qualité des produits. Des limites, qui dépendent essentiellement des particularités de chaque site, sont donc imposées aux types et aux quantités de déchets combustibles utilisables dans la production de ciment [75, Estonie, 2006], [76, Allemagne, 2006], [89, ERFO, 2005], [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

Pour des informations utiles concernant le traitement des déchets, se reporter au document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les industries de traitement des déchets, notamment des exemples de spécifications d'un déchet acceptable comme combustible dans les fours à ciment de certains pays [48, Commission européenne, 2005].

1.2.4.3.2.1 Concentrations en métaux des déchets

Les concentrations en métaux sont variables selon l'origine des déchets. Les autorités réglementaires et les professionnels de nombreux pays européens ont dressé des listes des teneurs maximales admissibles de différentes substances dans les déchets utilisables comme combustible ou matières premières, ou les deux. La Section 4.2.2.1.1 fournit des exemples provenant de différents pays européens de plages standard de concentration en métaux et de critères types quant à la teneur en différentes substances pour les déchets combustibles appropriés. Il est également possible de trouver différentes valeurs relatives à d'autres performances environnementales maximales admissibles pour des déchets spécifiques. Il n'existe toutefois aucune valeur seuil convenue, car les critères appliqués varient d'un endroit à l'autre. Les critères applicables peuvent inclure les éléments suivants :

- politiques et législation environnementales nationales,
- importance de l'impact de l'industrie du ciment sur le développement industriel régional,
- efforts d'harmonisation des lois et des normes environnementales régionales,
- niveaux des substances dans les matières premières traditionnelles et dans les déchets,
- situation et émissions de l'usine,
- autres solutions de traitement pour les déchets disponibles,
- pouvoir calorifique minimum requis,
- exigences de qualité du ciment.

1.2.4.3.3 Stockage et manutention des déchets

Les déchets combustibles sont généralement préparés dans des installations spéciales de gestion des déchets. Les déchets livrés doivent être stockés dans la cimenterie, puis dosés en respectant les proportions requises avant d'être brûlés dans le four. Comme les approvisionnements en déchets pouvant servir de combustible sont variables dans un contexte de développement rapide des marchés des déchets, il est recommandé de concevoir des unités de stockage et de préparation polyvalentes.

Les déchets combustibles liquides proviennent principalement de déchets dangereux. Ceci doit donc être pris en compte lors de leur manipulation, par exemple pour le stockage et l'alimentation (cf. Section 1.2.4.3.1.2) [76, Allemagne, 2006]. Il est en outre possible de prendre en considération la gestion de la sécurité relative aux matériaux potentiellement auto-inflammables lors de l'utilisation de combustibles issus de fractions de déchets triés et prétraités.

Le document de référence sur les meilleures techniques disponibles en ce qui concerne les émissions dues au stockage fournit des informations utiles sur ce point [96, Commission européenne, 2006].

1.2.5 Cuisson du clinker

Il s'agit de l'opération la plus importante du procédé de fabrication en termes de potentiel d'émissions, de qualité et de coût du produit. Le cru (ou la pâte pour la voie humide) est introduit dans le four où il est séché, décarbonaté et clinkérisé pour donner le clinker, lequel est refroidi par de l'air avant d'être stocké.

Pendant la cuisson du clinker, de hautes températures sont requises pour transformer le cru en clinker. La température de la charge du four dans la zone de clinkérisation des fours rotatifs doit impérativement être maintenue entre 1 400 et 1 500 °C et celle de la flamme à 2 000 °C environ. Le clinker doit également cuire en milieu oxydant ; c'est pourquoi un excès d'air est requis dans la zone de clinkérisation d'un four à ciment.

Pour la production de ciment blanc, le procédé de chauffe fait monter les températures de la zone de clinkérisation jusqu'à 1 600 °C, en fonction de la composition du cru et de la composition recherchée du produit final. Des températures de flamme supérieures à 2 000 °C sont requises en raison de l'absence dans les matières premières d'éléments de fusion susceptibles d'altérer la couleur du produit.

Une atmosphère réductrice est généralement maintenue de manière à éviter l'oxydation de certains éléments susceptibles de colorer le clinker. En outre, le choix d'un combustible sans cendres et de réfractaires à base de talc-magnésite, ou une autre magnésite, avec un liant spinelle est indispensable pour éviter la contamination de clinker. La qualité du ciment blanc dépend considérablement de sa technique de production [119, Sobolev, 2001], [120, Espagne, 2007], [138, Italie, 2007].

Depuis son apparition vers 1895, le four rotatif est devenu l'élément central de toutes les installations modernes de production de clinker. Les fours verticaux sont encore utilisés pour la calcination de la chaux, mais seuls quelques pays continuent d'y préparer le clinker et ce sont des installations de petite taille.

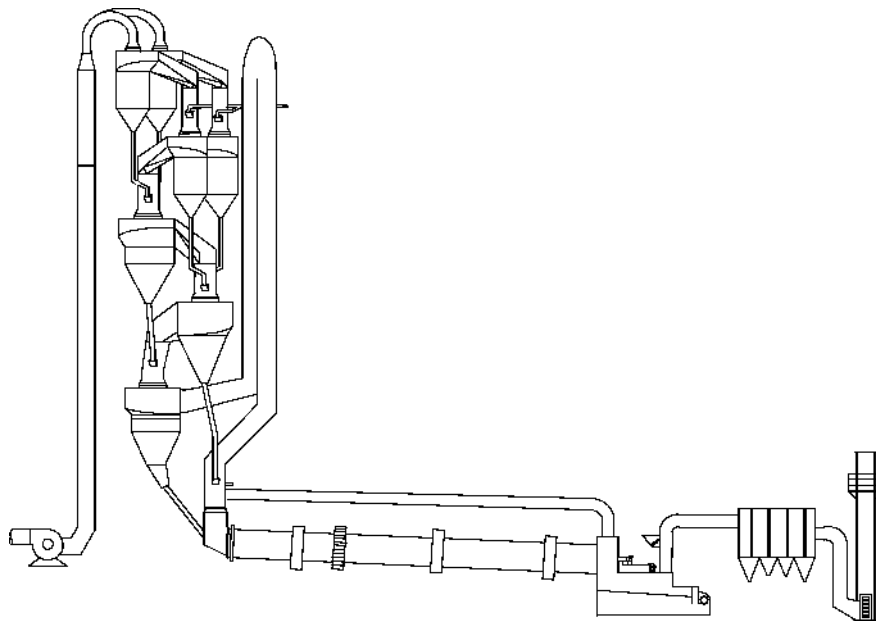


Figure 1.10 : Vue schématique d'un four équipé d'un préchauffeur/précalcinateur/refroidisseur à grilles
[72, CEMBUREAU, 2006-2008,]

Les premiers fours rotatifs étaient des fours longs en voie humide. Toutes les opérations utilisant la chaleur se déroulaient dans le four. Avec l'introduction de la voie sèche, l'optimisation des opérations a permis de mettre au point des techniques permettant d'effectuer le séchage, le préchauffage et la décarbonatation dans un équipement fixe et non dans le four rotatif comme le montre la Figure 1.10 ci-dessus.

Un four rotatif se compose d'un cylindre en acier dont le rapport longueur diamètre est compris entre 10:1 et 38 : 1. Il est supporté par plusieurs appuis (de deux à sept, ou plus) et est incliné selon une pente de 2,5 à 4,5 % ; un mécanisme d'entraînement lui fait effectuer de 0,5 à 5,0 tours par minute autour de son axe. L'association rotation-pente fait lentement progresser la matière dans le four. Pour résister aux pointes de température très élevées, l'intérieur du four est revêtu de briques réfractaires. Tous les fours longs et certains fours plus courts sont dotés d'éléments internes (chaînes, croisillons, releveurs) destinés à améliorer les échanges de chaleur.

Selon le procédé utilisé, la consistance des matières premières, etc., il peut arriver que des matières s'accumulent de temps à autre sur la paroi interne du four. Ces concrétions en forme d'anneaux peuvent se former à l'entrée du four côté matière (anneaux de sulfate), près de la zone de clinkérisation (anneaux de clinker) ou à la sortie (anneaux de cendres). Les deux derniers types de concrétions peuvent se fragmenter brutalement ; dans ce cas, une grande quantité de matière de mauvaise qualité à haute température est délivrée à la sortie du four. Elle peut être retraitée ou doit être mise au rebut en tant que déchet de fabrication. Les cyclones et les grilles des fours équipés de préchauffeurs peuvent aussi faire l'objet d'une accumulation de matière qui peut conduire à des colmatages.

Pour ces types de fours, il convient de remarquer que des problèmes peuvent survenir lors de l'introduction en excès d'éléments en circulation (chlorures, soufre, éléments alcalins) provenant du combustible ou des matières premières (cf. Sections 1.2.4.3.2 et 1.2.5.3.4).

1.2.5.1 Chauffage du four

Le combustible qui alimente le brûleur principal produit une flamme dont la température atteint 2 000 °C. Pour des raisons d'optimisation du procédé, la longueur de la flamme doit pouvoir être réglée dans certaines limites. Dans un brûleur moderne à cuisson indirecte, l'air primaire (10 à 15 % de l'air comburant) détermine la forme et la longueur de la flamme.

Il existe plusieurs points d'alimentation en combustible d'un four :

- via le brûleur principal à la sortie du four rotatif,
- via une trémie d'alimentation dans la chambre de transition à l'entrée du four rotatif côté matière (combustibles en morceaux),
- via les brûleurs secondaires dans le conduit ascendant,
- via les brûleurs du précalcinateur,
- via une trémie d'alimentation au précalcinateur (combustibles en morceaux),
- via un sas en milieu de four pour les fours longs en voie humide et sèche (combustibles en morceaux),
- via l'extrémité de la grille Lepol.

Les fours chauffés au charbon ou au coke de pétrole peuvent être à cuisson directe ou indirecte. Les fours à cuisson directe ne nécessitent ni installations de stockage ni équipements de dosage de fines de charbon. Le combustible pulvérisé est directement entraîné dans le four par le courant d'air qui circule dans le broyeur ; ce courant d'air détermine la forme de la flamme et sert d'air primaire. Les fours à combustion directe présentent certains inconvénients ; en particulier, les déperditions de chaleur y atteignent 200 à 250 MJ/tonne de clinker (6 à 8 % de plus que dans les fours modernes), ce qui explique que ce système soit rarement installé de nos jours.

Le fioul, dont la pression et la viscosité doivent être correctes, est pulvérisé dans le four par une buse d'atomisation. Sa combustion produit la flamme principale dont la forme est déterminée par une série d'injecteurs à plusieurs canaux entourant la buse d'atomisation de fuel.

Les brûleurs à gaz naturel comportent aussi plusieurs canaux ; le gaz remplace non seulement le charbon ou le fioul mais aussi l'air primaire.

Des brûleurs à plusieurs canaux sont également conçus pour l'utilisation de différents types de déchets combustibles (cf. Section 1.2.4). La Figure 1.11 montre un exemple.



Figure 1.11 : Exemple de brûleur multicanaux
[107, Belgique, 2006]

1.2.5.2 Fours longs rotatifs

Les fours longs rotatifs peuvent cuire aussi bien la pâte que les gâteaux de filtres-presses, les granules ou le cru et sont donc adaptés à tous les procédés. Les fours longs les plus gros ont un rapport longueur/diamètre de 38 : 1 et peuvent atteindre plus de 200 m de long. Ces énormes installations produisent près de 3 600 tonnes par jour en voie humide (Belgique, États-Unis, Communauté des États Indépendants (CEI)). Ils sont prévus pour sécher, préchauffer, calciner et clinkériser ; il suffit donc de les compléter avec une alimentation et un refroidisseur. La partie amont des fours longs est équipée de rideaux de chaînes et d'éléments fixes qui améliorent les échanges thermiques.

Les fours en voie humide, utilisés depuis 1895, sont les types de fours rotatifs de clinkérisation les plus anciens. La matière a d'abord été préparée en voie humide, car il était plus facile d'homogénéiser une pâte. Le cru traité dans les fours en voie humide contient en général de 32 à 40 % d'eau en masse, ce qui est nécessaire au maintien de ses propriétés de viscosité. L'eau doit ensuite être évaporée dans une zone de séchage spéciale aménagée à l'entrée du four, ce qui consomme une grande partie de la chaleur produite par la combustion. Cette technique consomme une grande quantité de chaleur et produit donc beaucoup de gaz de combustion et de vapeur d'eau.

Les fours longs en voie sèche ont été mis au point aux États-Unis à partir d'installations d'homogénéisation par lot et en voie sèche utilisées pour la préparation des matières premières. Ils sont peu nombreux en Europe, car très gourmands en énergie.

1.2.5.3 Fours rotatifs avec préchauffeurs

Les fours rotatifs avec préchauffeurs ont un rapport longueur/diamètre caractéristique compris entre 10:1 et 17:1. Il existe des préchauffeurs à grilles et des préchauffeurs à suspension.

1.2.5.3.1 Technique du préchauffeur à grilles

La technique du préchauffeur à grilles, peut-être plus connue sous le nom de fours Lepol, a été inventée en 1928. Elle représentait la première tentative pour exécuter une partie du procédé de clinkérisation dans une installation extérieure au four. Elle a permis de raccourcir les fours rotatifs et donc de réduire les déperditions de chaleur tout en augmentant l'efficacité énergétique du four.

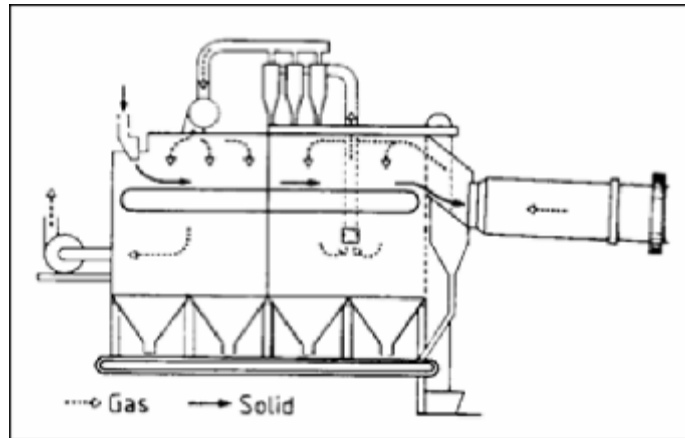


Figure 1.12 : Préchauffeur à grilles
[39, Ullmann's, 1986]

Dans le préchauffeur à grilles (voir Figure 1.12) les granules fabriqués à partir de la matière sèche avec l'assiette du granulateur (voie semi-sèche) ou par extrusion de gâteaux de filtres-presses obtenus à partir de la pâte (voie semi-humide) sont déposés sur une grille mobile horizontale qui se déplace dans un tunnel fermé. Une cloison munie d'une ouverture permettant le passage de la grille divise le tunnel en deux parties : une chambre chauffée par les gaz résiduels et une chambre de séchage. Un ventilateur envoie les gaz qui s'échappent du four dans la partie supérieure du préchauffeur où ils traversent la couche de granules présente dans la chambre chaude puis les cyclones du collecteur de poussières intermédiaire. Les particules de poussière les plus grosses qui détériorent le ventilateur y sont collectées. Le ventilateur suivant dirige les gaz vers le bas de la chambre de séchage où ils traversent la couche humide de granules puis il les envoie dans le collecteur de poussières. Pour un rendement thermique optimal, les préchauffeurs à grilles en voie semi-humide peuvent être équipés de circuits triple passes, les calories rejetées par le refroidisseur étant utilisées pour sécher les matières premières. Le plus gros préchauffeur existant a une capacité de production de 3 300 tonnes/jour et a été construit pour un four en voie semi-humide.

Les gaz qui s'échappent des fours rotatifs entrent dans le préchauffeur à une température comprise entre 1 000 et 1 100 °C. Après avoir traversé la couche de matière qui se trouve dans la chambre chaude, ils ne sont plus qu'à 250-300 °C et à la sortie de la chambre de séchage, leur température est comprise entre 90 et 150 °C. La température des matières à calciner est portée à près de 150 °C dans la chambre de séchage et à 700-800 °C dans la chambre de chauffage.

1.2.5.3.2 Technique du préchauffeur à suspension

L'invention du préchauffeur à suspension au début des années trente a marqué un progrès certain. Le préchauffage et même la calcination partielle de la farine (voie sèche et semi-humide) se déroulent en maintenant le cru en suspension dans les gaz chauds qui s'échappent du four rotatif. La surface de contact augmente considérablement ce qui permet théoriquement un échange de chaleur presque total.

Il existe différents types de préchauffeurs à suspension. Les Figures 1.13 et 1.14 en donnent des exemples. Ils comportent en général de quatre à six cyclones empilés les uns au-dessus des autres et forment une tour de 50 à 120 m de haut. L'étage le plus haut peut comporter deux cyclones montés en parallèle pour améliorer la séparation des poussières. Les gaz d'exhaure du four rotatif traversent les cyclones du bas vers le haut. La matière broyée en une poudre sèche est introduite dans les gaz d'exhaure du four avant le dernier étage cyclonique, le plus haut. Elle est séparée des gaz dans les cyclones et est réintégrée avant de passer dans le cyclone suivant. Cette opération se répète à chaque étage et à la sortie du dernier étage, la matière est introduite dans le four rotatif. Cette succession de mélange, séparation et reconstitution du mélange à une température plus élevée est nécessaire pour optimiser l'échange de chaleur.

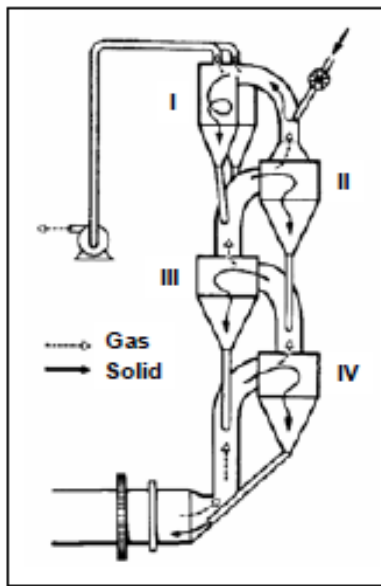


Figure 1.13 : Préchauffeur à suspension
[39, Ullmann's, 1986]

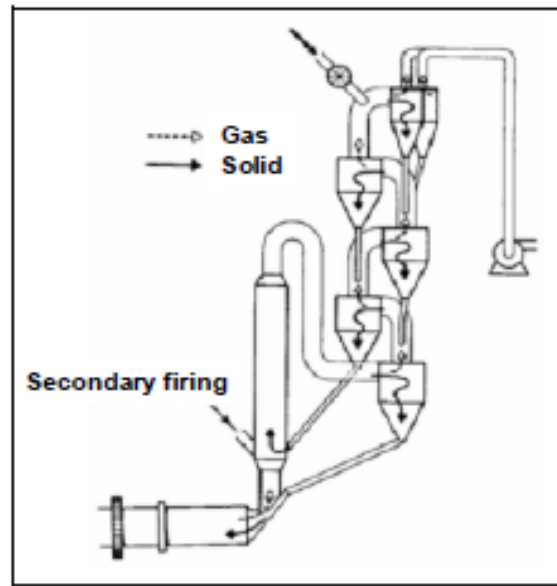


Figure 1.14 : Préchauffeur à suspension
équipé d'un précalcinateur
[39, Ullmann's, 1986]

1.2.5.3.3 Préchauffeurs droits

De très nombreux préchauffeurs droits ont été construits après l'apparition de la technique des préchauffeurs à suspension, car les échanges de chaleur y étaient théoriquement meilleurs. En effet, la difficulté d'obtenir une répartition uniforme de la farine dans les gaz a eu pour conséquence une performance réelle bien inférieure à celle attendue et la technique utilisant des étages droits seuls a été finalement abandonnée au profit de systèmes mixtes à plusieurs étages cycloniques ou de véritables préchauffeurs multicyclones. Certaines de ces installations hybrides sont encore utilisées, mais la plupart ont été converties en préchauffeurs à cyclones.

Un étage droit est beaucoup moins sensible aux problèmes de colmatage qu'un étage cyclonique, ce qui peut être un avantage pour l'étage inférieur quand des quantités excessives d'éléments (chlorures, soufre et éléments alcalins) sont présentes. Les préchauffeurs hybrides équipés d'un étage inférieur droit sont toujours disponibles pour des unités nouvelles.

La capacité de production type des fours avec préchauffeur droit ne dépasse pas 1 500 tonnes/jour alors que les systèmes hybrides peuvent atteindre ou dépasser 3 000 tonnes/jour.

1.2.5.3.4 Préchauffeur à quatre étages de cyclones

Le four avec préchauffeur à quatre étages de cyclones (préchauffeur à suspension, cf. Figure 1.13) était la norme dans les années soixante-dix, période où de nombreuses usines d'une capacité de production de 1 000 à 3 000 tonnes/jour ont été construites. Les gaz résiduels, qui sont à une température d'environ 300 - 400 °C à l'étage de cyclone le plus haut du préchauffeur, sont en général utilisés pour sécher le cru.

Quand celui-ci entre dans le four rotatif, 30 % de la calcination est déjà terminée, car il a déjà été chauffé à une température d'environ 850 °C par les gaz résiduels. Par le passé, de gros problèmes ont été posés par les préchauffeurs à quatre étages lors de l'introduction en excès d'éléments en circulation (chlorures, soufre, éléments alcalins) provenant du combustible ou des matières premières, ou des deux. Quand le cru était trop riche en éléments de ce type, il s'accumulait dans les cyclones et sur les parois des canalisations ce qui provoquait fréquemment des colmatages entraînant l'arrêt des fours pendant plusieurs jours. Le by-pass des gaz du four, c'est-à-dire la mise en dérivation d'une partie des gaz chargés en particules qui sort du four pour éviter son passage dans les cyclones a souvent été utilisé pour remédier à ce problème. Les gaz en dérivation sont refroidis pour provoquer la condensation des éléments alcalins puis ils traversent un collecteur de poussières avant d'être rejetés à l'extérieur. Dans certaines régions, il est nécessaire, pour maintenir à un niveau correct la teneur en éléments alcalins du clinker, d'envoyer les poussières collectées dans les gaz du by-pass et une partie des poussières du four en décharge ; dans tous les autres cas, elles sont recyclées dans le procédé de production du ciment.

Pratiquement tous les préchauffeurs à suspension à quatre étages sont associés à des fours rotatifs à trois appuis. Cette configuration est devenue la norme dans les années soixante-dix. On a construit des fours de 3,5 à 6 m de diamètre avec un rapport longueur/diamètre compris entre 13:1 et 16:1. Mécaniquement plus simple que le four long en voie sèche et humide, c'est sans doute le type de four le plus utilisé à l'heure actuelle.

1.2.5.4 Fours rotatifs avec préchauffeur et précalcinateur

La technique de la précalcination est à la disposition des industriels du ciment depuis 1970 environ. Dans ce procédé, la cuisson se fait en deux points. La combustion primaire du combustible a lieu dans le foyer du four ; une cuisson secondaire se déroule dans une chambre de combustion spéciale située entre le four rotatif et le préchauffeur. Dans un four à précalcinateur type, 65 % de la totalité du combustible peut être brûlée dans cette zone. Cela s'explique par le temps de séjour considérablement prolongé du cru chaud, par les gaz qui s'échappent du four en bas du préchauffeur à cyclones et par l'utilisation d'air tertiaire en plus. L'énergie sert principalement à calciner le cru qui est déjà presque entièrement cuit quand il entre dans le four. Il est possible d'atteindre des niveaux de calcination bien supérieurs à 90 %. De l'air chaud du refroidisseur est utilisé pour la combustion dans le calcinateur. La matière est à 870 °C environ à la sortie du calcinateur. La Figure 1.15 illustre les profils des températures du gaz et des éléments solides dans un four avec préchauffeur à cyclones.

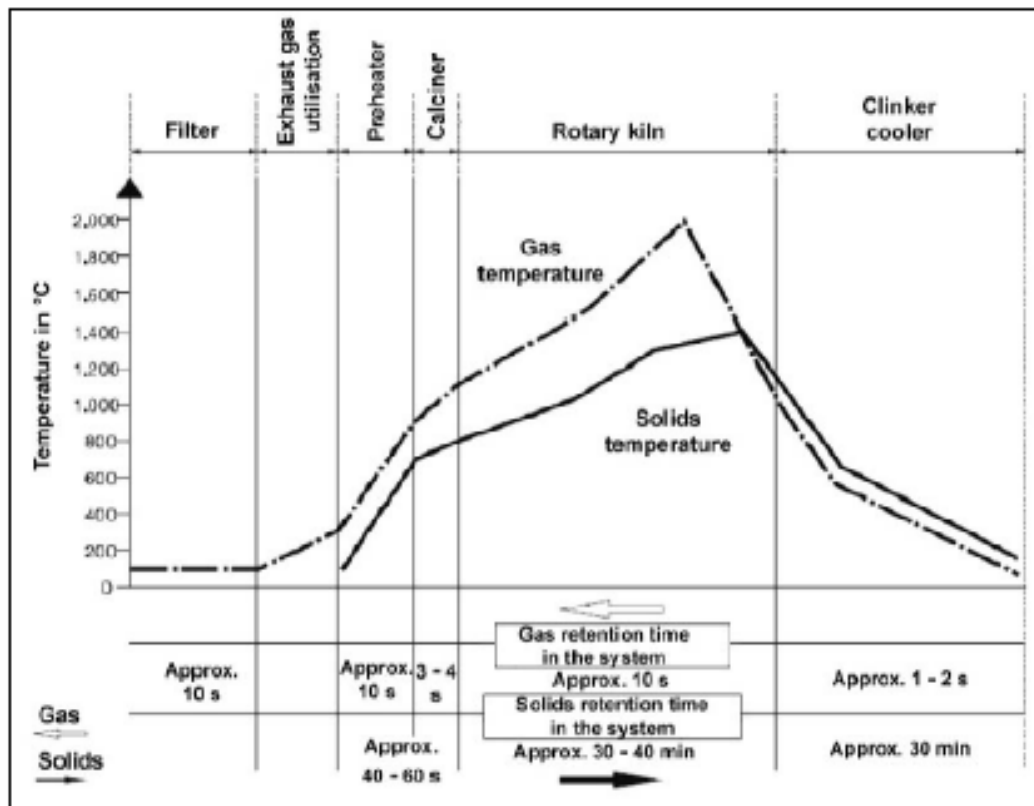


Figure 1.15 : Profils des températures des gaz et des solides dans un four avec préchauffeur à cyclones

[60, VDI 2094 Allemagne, 2003]

La Figure 1.14 illustre l'application de ce procédé à un four avec préchauffeur à suspension. En principe, la cuisson secondaire peut aussi s'appliquer dans un four équipé d'un préchauffeur à grilles. La précalcination augmente la capacité de production de clinker des fours rotatifs.

Les fours avec préchauffeur jusqu'à cinq étages de cyclones et précalcinateur sont considérés comme la norme pour les usines neuves en voie sèche. La Figure 1.16 en fournit un exemple. La Figure 1.17, quant à elle, illustre la technique du calcinateur dans le cas de l'utilisation de déchets comme combustible.

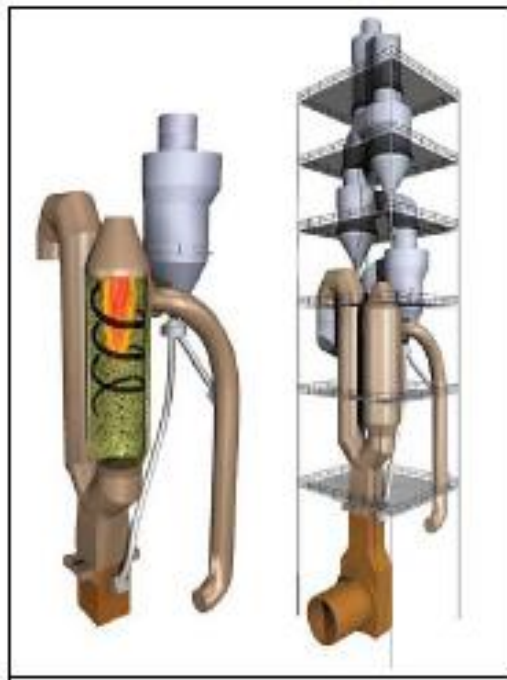


Figure 1.16 : Exemple de tirage inversé avec séparation ligne / calcineur

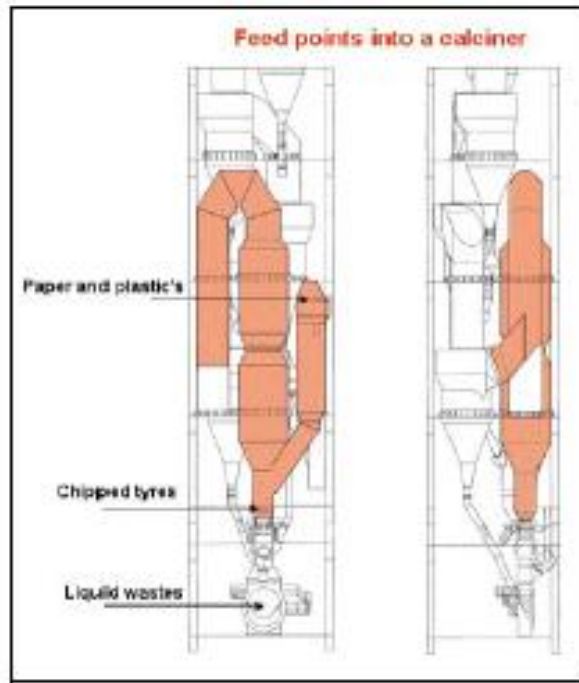


Figure 1.17 : Exemple de points d'alimentation en déchets d'un calcineur

La taille d'une usine neuve dépend avant tout des prévisions de développement du marché mais aussi des économies d'échelle. La capacité de production type des usines neuves en Europe est actuellement de 3 000 à 5 000 tonnes/jour. Des unités plus importantes capables de produire 15 000 tonnes/jour sont techniquement concevables et plusieurs fours produisant chacun 10 000 tonnes/jour alimentaient en 2007 les marchés asiatiques.

Les premiers précalcinateurs n'avaient que quatre étages de préchauffage ; la température des gaz résiduels et la consommation de combustible étaient donc plus élevées. Quand la teneur naturelle en humidité des matières premières est faible, le choix d'un préchauffeur à six étages peut être privilégié, en particulier quand il est associé à un filtre à manches.

En cas d'introduction en excès d'éléments en circulation, il faut équiper les fours d'un bypass des gaz pour leur permettre de fonctionner sans s'arrêter. Cependant, comme les caractéristiques des gaz sont variables, un bypass sur un four à précalcineur est bien plus efficace que sur un four simplement équipé d'un préchauffeur.

Bien que le cru soit déjà calciné de 75 à 95 % quand il entre dans le four, la plupart des fours à précalcineur sont encore des fours rotatifs comportant une zone de décarbonatation, c'est-à-dire qu'ils ont un rapport L/D compris entre 13:1 et 16:1 comme les fours simplement équipés d'un préchauffeur.

1.2.5.4.1 Systèmes de bypass

Lorsque le four est alimenté avec des matières premières et des combustibles (y compris des déchets) contenant du chlore, du soufre et des éléments alcalins, la circulation interne entre le four et le préchauffeur agit comme un cycle d'enrichissement. A des niveaux de concentration supérieurs, un tel cycle entraîne la formation de dépôts dans la zone d'entrée du four, du calcinateur et des deux étages inférieurs. Il convient toutefois d'éviter les arrêts causés par la formation de dépôts étant donné qu'une production de clinker économe en énergie repose essentiellement sur un fonctionnement régulier du four avec le moins de dérèglements possible. Par conséquent, une circulation importante d'éléments alcalins, de chlore et, dans une moindre mesure, de soufre impose l'utilisation d'un bypass des gaz à l'entrée du four. L'élimination d'une partie des gaz du procédé permet d'évacuer non seulement le chlore, le soufre et les éléments alcalins mais aussi d'autres substances. L'élimination de matières premières chaudes et de gaz chaud augmente par conséquent la consommation d'énergie spécifique d'environ 6 - 12 MJ/tonne de clinker par pourcent de gaz éliminé à l'entrée du four. Les pourcentages de bypass standard peuvent atteindre 15 % pour le chlore et 70 % pour le soufre. L'épuration inhérente des SO_x extraits avec le gaz de bypass est déterminée par :

- la quantité de chaux réactive,
- le temps de séjour à des températures supérieures à 300 °C,
- le temps de séjour à des températures inférieures à 200 °C en présence d'eau (vapeur).

Le bypass peut entraîner d'autres émissions selon sa configuration et une énergie thermique supplémentaire peut être utilisée [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [89, ERFO, 2005], [103, CEMBUREAU, 2006].

1.2.5.5 Fours verticaux

Il existe quelques fours verticaux de fabrication de ciment en Europe. Ils se composent d'un cylindre vertical de 2 à 3 m de diamètre et de 8 à 10 m de haut revêtu d'un matériau réfractaire. Ils sont alimentés à leur partie supérieure par des granules de cru et par des granules de coke ou de charbon. La matière à cuire traverse une zone de clinkérisation de faible longueur située dans la partie haute légèrement évasée du four. Elle est ensuite refroidie par l'air comburant qui provient de la base du four et sort en partie inférieure du four sur une grille de défournement, sous la forme de clinker.

Les fours verticaux produisent moins de 300 tonnes de clinker par jour. Ils ne sont rentables que pour les petites unités de production ce qui explique que leur nombre diminue.

1.2.5.6 Gaz résiduaux des fours

Dans tous les fours, les gaz résiduaux traversent un équipement de réduction de la pollution de l'air (filtre électrostatique ou filtre à manches) avant d'être envoyés vers la cheminée principale.

Dans la voie sèche, la température des gaz peut être relativement haute et cette chaleur peut être réutilisée dans le broyeur à cru quand il est en marche (fonctionnement compound). Quand il est arrêté (fonctionnement direct), les gaz passent en général dans une tour de conditionnement où ils sont refroidis par un brouillard d'eau avant de passer dans le collecteur de poussières, à la fois pour réduire leur volume et pour améliorer leur aptitude à la séparation.

1.2.5.6.1 Pics de CO

Tous les composants organiques des matières premières peuvent libérer du monoxyde de carbone mais celui-ci peut aussi apparaître en cas de combustion incomplète du combustible. Les matières premières rejettent du monoxyde de carbone pendant le préchauffage ; ce gaz est rejeté avec les gaz résiduels du four.

Il est indispensable de maîtriser les niveaux de CO dans les fours à ciment (et à chaux) si les poussières sont collectées dans des filtres électrostatiques afin de s'assurer que les concentrations demeurent très inférieures à la limite inférieure d'explosivité. Si le niveau de CO dans le filtre électrostatique augmente au-delà d'un certain niveau comme indiqué dans le Tableau 1.38 (cf. Section 1.4.5.3), l'alimentation électrique est coupée sur déclenchement de la sécurité « pics de CO » pour éliminer le risque d'explosion, ce qui provoque le rejet hors du four de grandes quantités de poussières non traitées. La sécurité « pics de CO » peut se déclencher en cas d'instabilité de fonctionnement ce qui peut arriver en cas d'utilisation de combustibles solides ; les systèmes d'alimentation doivent donc être conçus pour éviter l'afflux brutal de combustible dans le brûleur. De ce point de vue, la teneur en eau de ce type de combustible est très importante ; elle doit être soigneusement contrôlée pour empêcher l'encrassement et le colmatage des systèmes de préparation et d'alimentation en combustible.

La Section 4.2.6 fournit des recommandations quant au contrôle des pics de CO.

1.2.5.7 Refroidisseurs à clinker

Le refroidisseur à clinker fait partie intégrante du four et a une influence déterminante sur les performances et l'économie de l'installation de préparation à hautes températures. Sa fonction est double : valoriser le maximum de chaleur dans le clinker chaud (1 450 °C) pour la recycler dans le procédé et abaisser la température du clinker à un niveau compatible avec le bon fonctionnement des équipements aval.

La chaleur est valorisée en préchauffant l'air utilisé pour la combustion principale et la combustion secondaire au plus près de la limite thermodynamique. Ceci est rendu difficile par les températures élevées, le très haut pouvoir abrasif du clinker et la granulométrie très variée. En refroidissant le clinker rapidement, on fige sa composition minéralogique ce qui augmente son aptitude au broyage et optimise la réactivité du ciment.

Les problèmes types posés par les refroidisseurs à clinker concernent les points suivants : dilatation thermique, usure, débits d'air incorrects et faible disponibilité, ce qui va à l'encontre des exigences indiquées ci-dessus. Il existe deux grands types de refroidisseurs : rotatifs et à grilles.

Dans la fabrication du ciment blanc, on utilise d'autres types de refroidisseurs adaptés aux spécificités de l'usine de manière à maintenir l'atmosphère réductrice pendant le refroidissement du clinker. Une atmosphère non oxydante (absence d'oxygène) dans la première étape du blanchiment et le refroidissement rapide par jet d'eau sont utilisés pour l'amélioration de la qualité de clinker. Le refroidissement rapide à l'eau du ciment blanc améliore considérablement la blancheur. La contamination du ciment blanc par des éléments chromophores et une forte oxydation pendant la phase de refroidissement doivent être évitées [119, Sobolev, 2001], [120, Espagne, 2007], [138, Italie, 2007].

1.2.5.7.1 Refroidisseurs rotatifs

1.2.5.7.1.1 Refroidisseurs tubulaires

Le refroidisseur tubulaire est basé sur le même principe que le four rotatif mais l'échange de chaleur se fait en sens inverse. Un second tube rotatif possédant son propre système d'entraînement est implanté à la sortie du four, souvent de façon inversée, c'est-à-dire sous le four. Après sa sortie du four, le clinker traverse un capot intermédiaire puis entre dans le refroidisseur où des releveurs le dispersent dans le courant d'air. Le débit d'air de refroidissement dépend de la quantité d'air nécessaire pour brûler le combustible. Exception faite de la vitesse, les performances du refroidisseur ne dépendent que de ses équipements internes. L'optimisation des releveurs doit tenir compte de l'échange de chaleur (modèle de dispersion) en fonction du cycle des poussières dans le four.

1.2.5.7.1.2 Refroidisseurs planétaires (ou à satellites)

Le refroidisseur planétaire ou « à satellites » est un type particulier de refroidisseur rotatif. Plusieurs tubes de refroidissement, en général de 9 à 11, sont montés du côté défournement du four rotatif comme l'illustre la Figure 1.18. Le clinker chaud entre par des orifices disposés en cercle sur la carcasse du four en regard des différents points de raccordement des tubes de refroidissement. La quantité d'air de refroidissement dépend du volume d'air nécessaire pour brûler le combustible ; cet air pénètre dans chaque tube du côté de la sortie du four, ce qui donne lieu à un échange de chaleur à contre courant. Comme dans les refroidisseurs tubulaires, les équipements internes de relevage et d'étalement du clinker sont essentiels. Il n'y a pas de paramètres opératoires variables. Une forte usure et un choc thermique ainsi que des cycles de poussières signifient que les températures de sortie du clinker sont élevées et que la valorisation de chaleur n'est pas optimale, ce qui n'est pas inhabituel. Seule l'injection d'eau dans les tubes du refroidisseur ou sur la virole du four peut permettre d'abaisser encore la température de sortie du clinker.

Comme il est pratiquement impossible d'extraire l'air tertiaire, le refroidisseur planétaire n'est pas adapté à la précalcination. Une combustion secondaire avec 25 % de combustible au voisinage de la conduite montante du four est cependant possible.



Figure 1.18 : Exemple de refroidisseur planétaire
[45, Schorcht, 2006], [90, Hongrie, 2006]

1.2.5.7.2 Refroidisseurs à grilles

Dans ce type d'équipement, on refroidit la couche de clinker déposée sur une grille perméable à l'air en la balayant par un courant d'air ascendant. Le clinker peut être transporté par une grille mobile ou par des grilles de retournement (par étapes, avec dispositifs pousseurs).

Comme l'air chaud provenant de la zone de refroidissement secondaire n'est pas utilisé pour la combustion, il peut servir au séchage (matières premières, constituants du ciment ou charbon). S'il n'est pas utilisé pour le séchage, cet effluent doit être correctement dépoussiéré avant rejet à l'air libre.

1.2.5.7.2.1 Refroidisseurs à grille mobile

Dans ce type de refroidisseur, le clinker est transporté par une grille mobile dont les caractéristiques techniques sont les mêmes que celles de la grille du préchauffeur (Lepol). Des ventilateurs soufflent l'air de refroidissement dans des compartiments placés sous la grille. Cette configuration permet de ne pas modifier la couche de clinker (pas d'escalier) et de changer les plaques sans arrêter le four. Cependant elle a cessé d'être mise en œuvre dans les nouvelles installations vers 1980, car, outre sa complexité mécanique, la valorisation de la chaleur était médiocre du fait de l'épaisseur limitée de la couche de clinker (due à la difficulté d'obtenir une réelle étanchéité entre la grille et les parois).

1.2.5.7.2.2 Refroidisseurs à grille de retournement

Dans un refroidisseur à grille à retournement, le transport du clinker est effectué pas à pas sous l'action du front avant d'une série de plaques qui le poussent par un mouvement alternatif. Le mouvement relatif du front avant est provoqué par des systèmes d'entraînement hydrauliques ou mécaniques (vilebrequin) couplés à chaque deuxième rangée. Le clinker se déplace de l'entrée vers la sortie, mais la grille ne bouge pas.

Les grilles sont en acier moulé réfractaire, elles font en général 300 mm de large et sont percées de trous permettant la circulation de l'air.

L'air de refroidissement est fourni par des ventilateurs d'une capacité de 300 à 1 000 mm de colonne d'eau via des compartiments situés sous la grille. Ces compartiments sont isolés les uns des autres pour maintenir la pression à la valeur correcte. On peut distinguer deux zones de refroidissement :

- la zone de récupération où l'air chaud venant de l'échangeur est réutilisé pour brûler le combustible du brûleur principal (air secondaire) et celui du précalcinateur (air tertiaire) ;
- la zone de refroidissement secondaire où un apport supplémentaire d'air de refroidissement permet d'abaisser encore la température du clinker.

Les points clés de cette technique moderne sont (selon le fournisseur) les suivants :

- des plaques modernes à dispositifs donnant une perte de charge variable ou permanente, perméables à l'air mais pas au clinker,
- la ventilation forcée des plaques par gaines et poutres,
- le réglage individuel des zones de ventilation,
- une entrée fixe,
- des grilles moins nombreuses et plus larges,
- un broyeur à cylindres,
- des boucliers thermiques.

Les plus grandes unités en service ont une surface active de près de 280 m² et peuvent refroidir 10 000 tonnes de clinker par jour. Les difficultés de fonctionnement classiques posées par ces refroidisseurs sont la ségrégation et la mauvaise répartition du clinker ce qui entraîne un déséquilibre air-clinker, la fluidisation de la poudre de clinker (raies de clinker mal refroidies), des accumulations (chandelles) et une usure rapide des plaques.

1.2.5.7.2.3 Refroidisseurs à grilles de troisième génération

C'est aux alentours de 1983 que la technique moderne des refroidisseurs à grille de retournement est apparue et s'est développée. La conception avait pour objectif de supprimer les difficultés posées par les refroidisseurs classiques : les échanges de chaleur devaient se rapprocher de la valeur optimale pour un encombrement plus faible, des besoins réduits en air de refroidissement et des installations de dépoussiérage plus petites.

Dans les années 2000, l'industrie du ciment a vu émerger une nouvelle génération de refroidisseurs proposant une approche entièrement nouvelle du refroidissement du clinker. L'idée de départ consistait à mettre au point un refroidisseur dans lequel le convoyeur de clinker et le système de distribution de l'air sont séparés et optimisés. A la différence des refroidisseurs à grille de retournement, l'air de retenue est éliminé et la distribution de l'air est optimisée quel que soit le mode de fonctionnement.

Exemples d'éléments caractéristiques de ces types de refroidisseurs (selon le fournisseur) :

- une grille fixe inclinée ou horizontale,
- transport du clinker par des traverses, des chenilles, des planchers mobiles ou des dispositifs similaires, séparé de la distribution de l'air,
- le clinker est maintenu en place et ne tombe pas dans les compartiments situés sous la grille,
- élimination de l'air de retenue et commande automatique de la distribution de l'air,
- amélioration de l'efficacité de transport du clinker grâce à une meilleure maîtrise des difficultés liées à la fluidisation de la poudre de clinker (raies de clinker mal refroidies).

Ces types de refroidisseurs sont tout à fait compatibles avec les plus grandes capacités de production de clinker des fours à ciment.

1.2.5.7.3 Refroidisseurs verticaux

Un refroidisseur secondaire ne contenant pas de poussières aussi appelé refroidisseur par gravité ou refroidisseur G a été mis au point pour être installé après un refroidisseur planétaire ou un récupérateur/refroidisseur à grille courte. L'air de refroidissement n'est jamais en contact avec le clinker, car l'échange de chaleur se produit au moment où le produit retombe sur des tubes d'acier transversaux placés dans la couche de clinker ; les tubes sont traversés par le courant d'air qui les refroidit.

1.2.5.8 Cogénération

Il est possible dans les cimenteries de générer de l'électricité et d'utiliser le surplus de chaleur du procédé de production du ciment.

La plus grande partie de la chaleur émise par un four à ciment est normalement utilisée pour les procédés de séchage et de broyage en voie sèche ci-après :

- séchage et broyage de la matière première,
- séchage du laitier,
- séchage du sable,

- séchage et broyage du combustible.

La conception des installations à préchauffeur à cyclones (avec ou sans précalcinateur) tient compte de la nature des matières premières disponibles. Lorsque les matières premières sont très humides, l'effluent gazeux du refroidisseur de clinker à grilles est également utilisé pour le traitement de la matière.

La déshumidification des matières premières à base de chaux requiert différents niveaux de chaleur en fonction de la géologie et des précipitations saisonnières. Cependant, ce procédé produit parfois un surplus de chaleur. Il convient de noter que la disponibilité de surplus de chaleur et, par la suite, la technique de valorisation de la chaleur doivent prendre en compte cette variabilité.

En plus du chauffage urbain, le surplus de chaleur peut également être utilisé pour générer de l'électricité. Dans ce cas, ces procédés doivent généralement utiliser de l'eau qui doit être maintenue à une température/pression de vapeur relativement élevée de façon économique.

Pour la première fois dans un four à ciment allemand, le cycle de Rankine à cycle organique (ORC) a été utilisé pour la cogénération d'électricité à partir d'une chaleur résiduelle de faible température. Le fluide employé dans ce procédé est le pentane qui s'évapore à des températures bien inférieures à l'eau. Ce procédé présente notamment l'avantage d'être simple à appliquer, de s'appuyer sur une structure compacte et de permettre de parvenir à des niveaux d'efficacité relativement élevés avec des sources de chaleur inférieures à 275 °C. Par conséquent, la génération d'électricité à partir du surplus de chaleur du procédé de production du ciment peut être envisagée comme une alternative techniquement faisable aux centrales électriques à vapeur d'eau si certains préalables sont remplis.

Les résultats disponibles d'une cimenterie allemande montrent qu'il est ainsi possible de générer 1,1 MW de puissance électrique. Un refroidisseur à clinker avec une production de chaleur résiduelle de l'air d'exhaure de 14 MW et une température des gaz résiduels de 300 °C a rendu cela possible [76, Allemagne, 2006], [78, E. Baatz + G. Heidt, 2000], [79, Allemagne, 2001], [133, CEMBUREAU/Federhen, 2007].

Les Sections 1.4.2.4 et 4.2.3 présentent des installations de référence ainsi que plus d'informations sur la valorisation du surplus de chaleur des refroidisseurs à clinker ou des effluents gazeux des fours pour le chauffage urbain, sur la cogénération d'électricité suivant le procédé conventionnel à cycle de vapeur ainsi que sur le procédé ORC en service.

1.2.6 Broyage et stockage du ciment

1.2.6.1 Stockage du clinker

Le clinker et les autres constituants du ciment sont stockés dans des silos ou dans des hangars fermés. Si les stocks sont très importants, ils peuvent être entreposés à l'extérieur à condition de prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter l'envol de poussières.

Les types de stockage du clinker les plus courants sont les suivants :

- stockage longitudinal avec extraction par gravité (stock utile limité),
- stockage circulaire avec extraction par gravité (stock utile limité),
- stockage du clinker en silos (stock utile volumineux ; l'extraction du clinker peut faire vibrer le sol selon son niveau dans le silo),
- stockage du clinker en silo dôme (stock utile limité).

1.2.6.2 Broyage du ciment

Le ciment Portland est obtenu par broyage et mélange de clinker et de sulfates comme le gypse et l'anhydrite. Les ciments composés contiennent d'autres constituants comme du laitier granulé de haut fourneau, des cendres volantes, des pouzzolanes naturelles ou artificielles, des calcaires ou des fillers inertes. Ces constituants sont broyés avec le clinker ou doivent être séchés et broyés séparément (les stations de broyage peuvent être implantées ailleurs que sur le site de production du clinker).

Le type de ciment à fabriquer détermine le choix du procédé et celui de l'installation de broyage. L'aptitude au broyage, l'humidité et le comportement à l'abrasion des constituants du type de ciment fabriqué sont tous particulièrement importants.

Les stations de broyage fonctionnent généralement en circuit fermé c'est-à-dire qu'elles peuvent séparer le ciment présentant le niveau de finesse requis et renvoyer le ciment insuffisamment broyé dans le broyeur.

Le broyage final est une des étapes les plus essentielles du procédé de fabrication du ciment blanc. Le choix approprié de gypse ayant une grande pureté est également important à ce stade. L'utilisation d'un agent de mouture approprié (jusqu'à 1 %) peut être recommandée pour augmenter la finesse et pour diminuer le temps de broyage ; ce qui entraînerait une augmentation de 5-7 % de la blancheur. De plus, des micro-fillers finement broyés comme le marbre blanc ou le quartz, le gel de silice pur, le mica ou le talc, le kaolin (ou le méta-kaolin) ou des poudres avec des traces de TiO_2 , peuvent être utilisés dans des proportions relativement faibles [119, Sobolev, 2001].

1.2.6.2.1 Pesage et dosage des matériaux broyés

La précision et la fiabilité du pesage et du dosage des matériaux introduits dans le broyeur sont déterminantes pour le maintien d'une bonne efficacité énergétique de l'atelier de broyage. De ce point de vue, le tapis d'alimentation peseur est l'équipement le plus important pour l'alimentation de la station de broyage.

1.2.6.2.2 Broyage du ciment

Compte tenu de la diversité des types de ciment demandés par le marché, les dernières stations de broyage équipées d'un séparateur aéraulique dynamique sont les plus répandues.

Les installations de broyage les plus courantes sont les suivantes :

- les tubes broyeurs en circuit fermé (additions minérales relativement limitées, sauf si elles sont pré-séchées ou sèches),
- les broyeurs verticaux à galets (bien adapté aux additions minérales importantes du fait de leur capacité de séchage ainsi qu'au broyage séparé des additions minérales),
- les presses à rouleaux (additions minérales relativement limitées, si non sèches ou pré-séchées).

Parmi les autres systèmes de finissage, on peut citer :

- le tube broyeur à sortie en bout, en circuit ouvert,
- le tube broyeur à sortie en bout, en circuit fermé avec séparateur aéraulique mécanique ou séparateur à cyclones (plus anciens),
- les broyeurs horizontaux à rouleaux.

Les *broyeurs à boulets* (type de *tube broyeur*) peuvent se présenter avec des tubes de diamètre allant jusqu'à 6 m et de longueur pouvant atteindre 20 m. Des boules en acier de différentes tailles sont utilisées en fonction de la finesse recherchée. Offrant des niveaux de fiabilité et de disponibilité élevés, ce type de broyeur est relativement facile à faire fonctionner à un régime de fonctionnement stable. Des additions minérales avec un certain taux d'humidité peuvent également, dans une certaine mesure, être séchées alors qu'elles traversent les gaz chauds en direction du broyeur ainsi qu'au moyen de la chaleur dégagée par le broyage. Comparés aux autres types de broyeurs, les broyeurs à boulets consomment cependant davantage d'énergie spécifique et sont les moins bien classés en termes d'efficacité énergétique.

Le principe de fonctionnement du *broyeur vertical à galets* repose sur l'action de deux à quatre galets montés sur des bras articulés et se déplaçant sur une table ou dans un bol de broyage horizontal. Il est plus particulièrement adapté au broyage et au séchage simultanés des matières premières du ciment ou du laitier, car il peut traiter des matières dont le taux d'humidité est relativement élevé. Le temps de passage des matières dans le broyeur est suffisamment court pour éviter la pré-hydratation du clinker, comme par exemple dans le cas du broyage du ciment au laitier.

Le *broyeur haute pression à rouleaux* demande pour sa part une maintenance relativement importante. Ce type de broyeur est souvent utilisé en association avec des broyeurs à boulets.

Le *broyeur horizontal à rouleaux* est une évolution plus récente. Il se compose d'une courte virole horizontale supportée par des paliers hydrodynamiques ou hydrostatiques. La virole est mise en rotation par un engrenage périphérique. Un rouleau horizontal tournant librement et monté à l'intérieur de la virole peut être appliqué contre celle-ci par un mécanisme hydraulique. Les matériaux à broyer entrent dans la virole par l'une des extrémités, ou par les deux et passent plusieurs fois entre elle et le rouleau. Après broyage, ils sont transportés vers un séparateur ; les matériaux dont la granulométrie est trop forte reviennent dans le broyeur.

Le Tableau 1.19 dans la Section 1.3.3.2 compare les caractéristiques essentielles des techniques de broyage.

1.2.6.2.3 Broyage des additions minérales

Les additions minérales sont généralement broyées avec le gypse et le clinker. La décision de les broyer séparément dépend des facteurs suivants :

- du pourcentage d'additions minérales dans le produit final et dans la production de ciment dans son ensemble,
- de la disponibilité d'un second broyeur,
- de la différence de broyabilité entre le clinker et les additions minérales,
- de l'humidité des additions minérales.

En cas de nécessité, les gaz qui s'échappent du four, l'air d'exhaure du refroidisseur (ou les deux) ou bien encore une source indépendante de gaz chauds peuvent servir au séchage préalable des additions minérales.

Installations de broyage et mélange

Toutes les installations décrites ci-dessus qui servent à broyer des matières premières sèches et semi-sèches peuvent être utilisées pour broyer les additions minérales avec le clinker et le gypse. Cependant elles sont généralement limitées par l'humidité des matières qui ne doit pas dépasser un certain seuil : 2 % au maximum ou 4 % en cas d'utilisation d'une source de gaz chauds.

Si leur teneur en humidité est supérieure, les additions minérales doivent subir un séchage préalable, sauf en cas d'utilisation d'un broyeur vertical à rouleaux qui peut traiter des matières dont la teneur en humidité peut atteindre 20 %, mais qui nécessite malgré tout une source de gaz chauds.

Broyage séparé

Les installations de broyage des matières premières sèches ou semi-sèches peuvent être utilisées pour broyer séparément les additions minérales. Cependant, les impératifs liés à l'humidité des matières premières s'appliquent également à ces installations et il peut être nécessaire d'effectuer un séchage préalable.

1.2.6.2.4 Séparation en fonction de la répartition granulométrique

La répartition granulométrique du produit à la sortie du broyeur est déterminante pour la qualité du ciment. Le réglage du séparateur permet de respecter ces paramètres. Les derniers séparateurs de type à cage de rotor présentent plusieurs avantages sur les configurations plus anciennes, entre autres :

- une consommation d'énergie spécifique plus faible (moins de surbroyage),
- l'augmentation de la productivité de l'installation (rendement),
- la possibilité de refroidir le produit,
- une plus grande souplesse de réglage de la finesse de la mouture,
- un meilleur contrôle de la répartition granulométrique, une meilleure homogénéisation du produit.

1.2.6.2.5 Réduction des chromates – chrome (VI)

Parce qu'il est produit à partir de matières premières naturelles, le ciment contient nécessairement du chrome dont la teneur peut être très variable selon les cas. Dans le ciment Portland, les principales sources de chrome sont les matières premières naturelles telles que le calcaire, le sable et tout particulièrement l'argile. Les combustibles (conventionnels, c'est-à-dire fossiles, et déchets) en sont également une source, bien qu'en moindre mesure. La composition chimique de la croûte terrestre étant naturellement variable, il est donc logique que la teneur en chrome le soit également. Une partie de ce chrome, le chrome dit hexavalent (chrome (VI)), se présentera sous forme soluble dans l'eau.

En 2003, le *National Institute of Occupational Health* a réalisé une étude épidémiologique portant sur la prévalence des dermatites allergiques chez les ouvriers du bâtiment liées à la teneur en chrome (VI) du ciment. L'étude avançait que « le chrome dans le ciment fini provient essentiellement des matières premières, des briques réfractaires du four et des corps broyants contenant du chrome. La contribution relative de ces sources est variable selon la teneur en chrome des matières premières et les conditions de fabrication. Dans une étude sur le broyage du clinker au moyen de boules en alliage de chrome, avec une teneur en chrome de 17 à 28 %, la quantité de chrome hexavalent présent dans le ciment était deux fois plus importante que dans le clinker d'origine. »

Lorsque dissous dans l'eau, le chrome (VI) peut pénétrer une peau non protégée. Ce chrome (VI) soluble dans l'eau peut être à l'origine d'une dermatite allergique, appelée la « dermatite des cimentiers ». La « dermatite des cimentiers » inclut également un autre type de dermatite, la dermatite irritante, laquelle est causée par la nature alcaline du ciment mélangé à l'eau.

La Directive européenne sur les chromates (2003/53/CE) a restreint la commercialisation et l'utilisation des ciments contenant plus de 0,0002 % (2 ppm) de chrome (VI) soluble. Il est généralement impossible pour l'industrie du ciment de réduire la teneur en chromates du ciment à la phase d'introduction, car les matières premières en sont la principale source. Par conséquent, l'unique manière de réduire le chrome (VI) soluble dans l'eau dans le ciment était en 2007 d'ajouter un réducteur aux produits finis. Les principaux réducteurs utilisés en Europe sont le sulfate ferreux et le sulfate d'étain [86, EURITS, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006], [111, Commission européenne, 2003].

1.2.6.3 Stockage du ciment

Des systèmes de transport mécaniques et pneumatiques peuvent être utilisés pour acheminer le ciment jusqu'aux silos de stockage. En règle générale, les premiers exigent des investissements plus importants que les seconds, mais leur coût d'exploitation est bien inférieur. Le système le plus couramment utilisé associe des aéroglossières ou des convoyeurs à vis ou à chaîne à un élévateur à godets.

Les différents types de ciments sont stockés dans des silos différents, mais il faut souvent plusieurs silos pour stocker un type donné de ciment. Cependant grâce aux nouvelles conceptions, il devient possible de stocker des ciments différents dans un même silo. Les configurations utilisées sont les suivantes :

- silos à compartiment unique avec trémie d'extraction,
- silos à plusieurs compartiments avec sortie centrale,
- silos à plusieurs compartiments,
- silos dômes avec sortie centrale.

De l'air comprimé injecté par des caissons situés en partie basse du silo permet d'initier et de réaliser l'extraction du ciment.

1.2.7 Conditionnement et expédition

Le ciment est chargé directement en vrac dans des camions citernes, des péniches ou des wagons ou envoyé dans un atelier d'ensachage.

1.3 Niveaux de consommation et d'émission actuels

Sauf mention contraire, il convient de noter que pour cette section relative à l'industrie du ciment, les conditions standard des mesures des débits volumétriques et des concentrations des gaz résiduels sont conformes aux définitions suivantes figurant également dans le glossaire.

m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le document, le débit volumétrique se réfère à 10 % en volume d'oxygène et à l'état normal
mg/Nm ³	Concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations des substances ou des mélanges gazeux se réfèrent à des gaz résiduels secs à 10 % en volume d'oxygène et à l'état normal
Etat normal	Correspond à une température de 273 K, à une pression de 1013 hPa et à un gaz sec

Il convient en outre de noter que les plages d'émission se rapportent à un niveau d'oxygène de référence de 10 %. Toutefois, le niveau d'oxygène réel du procédé de cuisson est bien inférieur à 10 %, par exemple 3 %. La formule pour le calcul de la concentration d'émission est la suivante :

$E_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} * E_M$	
<p>E_R (mg/Nm³) : concentration d'émission rapportée au niveau d'oxygène de référence O_R O_R (% vol) : niveau d'oxygène de référence E_M (mg/Nm³) : concentration d'émission rapportée au niveau d'oxygène mesuré O_M O_M (% vol) : niveau d'oxygène mesuré</p>	

Pour plus d'informations utiles concernant la surveillance, se reporter au document de référence sur les Principes généraux de surveillance [151, Commission européenne, 2003].

Les principales questions environnementales posées par la fabrication du ciment sont liées aux rejets de polluants dans l'air et à l'utilisation de l'énergie. Les rejets d'eaux usées se limitent en général aux eaux de ruissellement en surface et à l'eau de refroidissement et ne contribuent pas de manière substantielle à la pollution de l'eau. Le stockage et la manutention des combustibles sont des sources potentielles de pollution des sols et des eaux souterraines.

L'objet d'un bilan massique est d'évaluer les éléments de masse qui entrent dans le système et en sortent en tenant compte de la loi de la conservation massique. L'évaluation de l'ensemble des éléments du bilan massique exige de connaître au préalable les données relatives au procédé, comme la composition des matières premières et du combustible, les flux de gaz, les données atmosphériques, etc. Dans une cimenterie équipée d'un broyeur à cru, d'un préchauffeur, d'un four et d'un refroidisseur, les flux d'entrée et de sortie ci-après sont importants :

- flux d'entrée :
 - les matières premières (conventionnelles ou issues de déchets, ou les deux),
 - l'énergie (combustibles (fossiles et/ou déchets et/ou biomasse), énergie électrique),
 - l'eau (y compris l'humidité du combustible, l'humidité de la matière première, l'humidité de l'air et l'injection d'eau dans le broyeur à cru),
 - l'air (air primaire, air de transport, air de refroidissement et air de fuite),
 - les éléments auxiliaires (additions minérales, emballage).
- flux de sortie :
 - le clinker,
 - les pertes/déchets de procédé (poussières filtrées),
 - les émissions dans l'air (par exemple : poussières, NO_x, SO_x ; cf. également la Figure 1.19 pour le bilan massique),
 - les émissions dans l'eau (dans de rares cas).

Les données d'entrée sont les suivantes :

- en voie sèche ; préchauffeur à cinq étages, précalcinateur, refroidisseur à grilles, broyeur à cru vertical,
- combustible : 100 % de coke de pétrole
- consommation calorifique : 3300 kJ/kg de clinker
- pouvoir calorifique (inférieur) du coke de pétrole (PCI) 33 500 kJ/kg de combustible
- cru introduit dans le four : 1,66 kg/kg de clinker ; composition chimique standard du cru,
- facteur matière première : 1,52 kg/kg de clinker et 5 % d'humidité
- l'humidité de l'air : 1 %
- broyeur à cru :
 - air de fuite : 30 %
 - injection d'eau : 0,5 % du cru
- facteur clinker/ciment : 0.8.

La Figure 1.19 représente le bilan massique de la production de 1 kg de ciment fabriqué en voie sèche avec du coke de pétrole comme combustible.

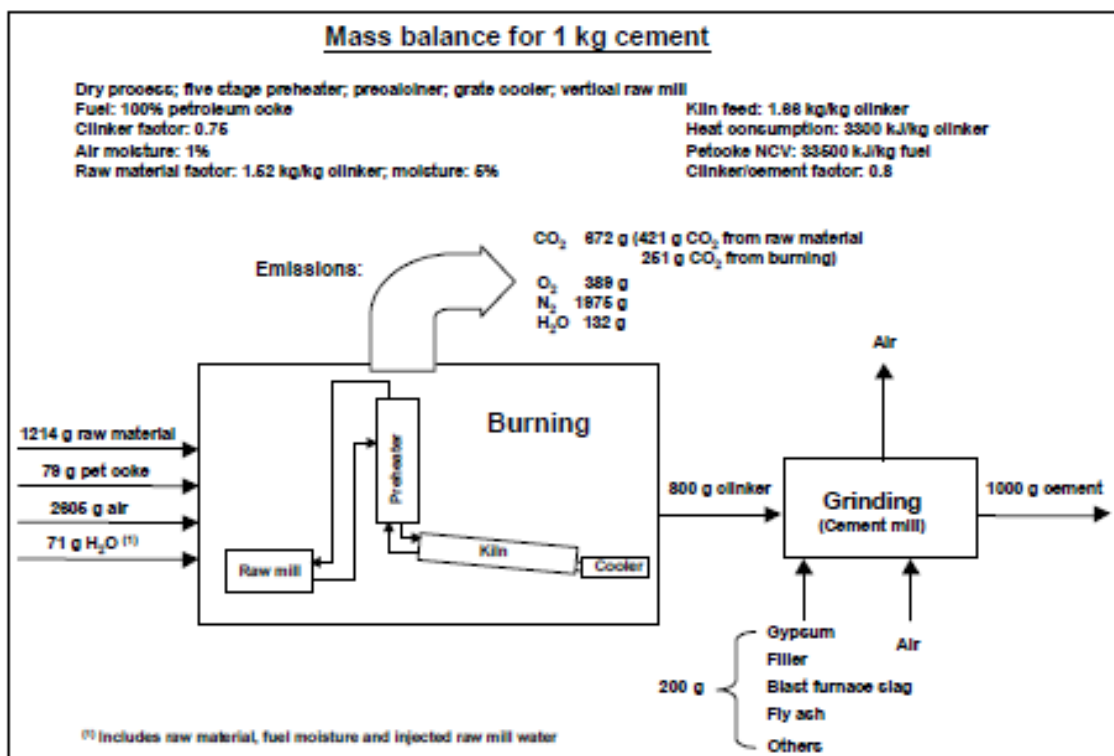


Figure 1.19 : Bilan massique pour la production de 1 kg de ciment en voie sèche [103, CEMBUREAU, 2006]

1.3.1 Consommation d'eau

L'eau est utilisée à plusieurs étapes de la production. Elle n'est utilisée que dans quelques cas seulement pour la préparation de la matière première, dans la cuisson et le refroidissement du clinker, comme le refroidissement des gaz, ainsi que dans le procédé technique de production de la pâte. En voie semi-sèche, l'eau est mélangée à la farine pour former des granules. Les usines utilisant la voie humide consomment plus d'eau (par tonne de ciment produit) dans la préparation de la pâte, une consommation d'eau standard de 100 à 600 litres d'eau par tonne de clinker étant rapportée. De plus, dans des applications spéciales, l'eau est utilisée pour refroidir le clinker et une consommation d'eau d'environ 5 m³/heure a été signalée. Dans la plupart des cas, l'eau consommée est de l'eau non potable [45, Schorcht, 2006], [75, Estonie, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [103, CEMBUROU, 2006], [120, Espagne, 2007].

1.3.2 Consommation de matières premières

La fabrication du ciment met en jeu de très gros volumes de matériaux. Les chiffres du Tableau 1.15 représentent les consommations moyennes types des matières premières utilisées pour fabriquer le ciment dans l'Union. Les chiffres de la dernière colonne s'appliquent à une usine produisant 3 000 tonnes/jour de clinker ou 1 million de tonnes/an, soit 1,23 million de tonnes de ciment par an sur la base du pourcentage moyen de clinker contenu dans le ciment européen.

Matériaux (voie sèche)	Par tonne de clinker	Par tonne de ciment	Par an par Mt de clinker
Calcaire, argile, schistes argileux, marnes, autres	1,57 t	1,27 t	1 568 000 t
Gypse, anhydrite	-	0,05 t	61 000 t
Additions minérales	-	0,14 t	172 000 t

Tableau 1.15 : Consommation des matières premières utilisées pour la fabrication du ciment
[9, CEMBUROU, novembre 1997]

1.3.2.1 Consommation de déchets comme matières premières

Il est possible de remplacer une quantité relativement importante de matières premières en utilisant des déchets comme matières premières dans la cuisson du clinker (cf. Section 1.2.4). Depuis 2001, les quantités de déchets utilisés comme matières premières dans la production du clinker ont plus que doublé. En 2004, l'utilisation de déchets en tant que matières premières dans la production du clinker a permis à l'industrie du ciment de réaliser une économie directe de près de 14 millions de tonnes de matières premières conventionnelles, soit environ 6,5 % des matières premières naturelles nécessaires.

Cependant, le procédé de cuisson du clinker impose aux déchets utilisés en tant que matières premières de répondre à un certain nombre de critères quant à leurs caractéristiques et à leur composition chimique. Ces déchets peuvent avoir un impact sur le comportement des émissions du procédé et un effet sur les émissions. Les impacts sur les émissions seront abordés dans la Section 1.3.4.13. Le Tableau 1.16, résume sur la base de leurs composants chimiques, les déchets utilisés comme matières premières consommés dans l'UE des 27 en 2003 et en 2004 pour la production du clinker. La Figure 1.20 montre la part utilisée par 20 pays de l'UE des 27.

Déchets utilisés comme matières premières			
Éléments chimiques (principaux) recherchés	Exemples de flux de déchets	Quantités en 2003 (million(s) de tonnes)	Quantités en 2004 (million(s) de tonnes)
Si	Sable de fonderie usé	1,52	1,50
Ca	Chaux industrielle Laits de chaux Boue de carbure Boue du traitement de l'eau potable	2,20	2,44
Fe	Cendres de pyrite Hématite synthétique Boue rouge	3,29	3,37
Al		0,71	0,69
Si-Al-Ca-Fe	Cendres volantes Scories Matières fines de broyeur	3,37	3,78
Terre		0,45	0,50
Groupe S	Gypse, sous-produit industriel		
Groupe F	CaF2 Boues de filtration		
Autres		1,56	1,71
Total		13,10	13,89

Tableau 1.16 : Classification chimique des déchets utilisés comme matières premières dans la fabrication du ciment dans l'UE des 27 en 2003 et en 2004
[74, CEMBUREAU, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006]

La consommation de déchets comme matières premières a augmenté pour le broyage du ciment. Entre 2000 et 2005, l'utilisation des cendres volantes de schiste bitumeux a doublé pour atteindre une consommation annuelle de 100 000 t, comme il a été par exemple signalé [75, Estonie, 2006].

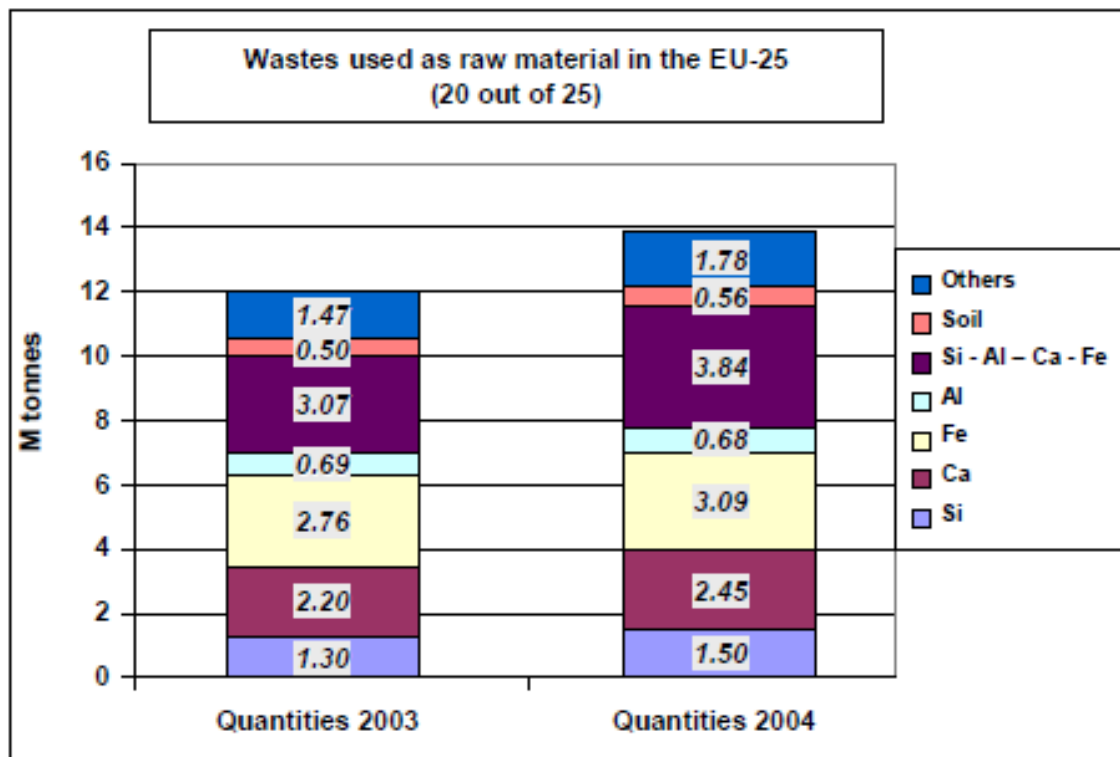


Figure 1.20 : Déchets utilisés comme matières premières dans 20 pays de l'UE des 27
[74, CEMBUREAU, 2006]

1.3.3 Utilisation de l'énergie

L'industrie du ciment est, selon le procédé utilisé, un secteur très gourmand en énergie. Deux principaux types d'énergie interviennent dans la fabrication du ciment : les combustibles et l'électricité. En Europe, cela fait plusieurs décennies que l'industrie du ciment a fait de l'efficacité énergétique (tant thermique qu'électrique) une priorité dans le cadre de décisions professionnelles globales déterminées par des besoins économiques et technologiques [103, CEMBUREAU, 2006].

1.3.3.1 Besoins en énergie thermique

La demande théorique en énergie (combustible) thermique pour la production du clinker est déterminée par l'énergie requise pour les réactions chimiques/minéralogiques de la cuisson du clinker (1 700 à 1 800 MJ/tonne de clinker) et par l'énergie thermique requise pour le séchage et le préchauffage de la matière première. Cette dernière exigence dépend principalement du taux d'humidité de la matière première comme indiqué dans les exemples du Tableau 1.17. Dans les fours à préchauffeur modernes, le nombre de cyclones peut être limité par la composition chimique de la matière première.

Caractéristiques	Unité	Taux d'humidité dans la matière première (% M/M)			
		3	6	9	12
Nombre d'étages cycloniques	-	6	5	4	3
Enthalpie requise pour le séchage	MJ/t _{clinker}	150	290	440	599

Tableau 1.17 : Exemples des quantités d'énergie thermique nécessaires au séchage du cru
[137, Klein/Hoenig, 2006]

Les besoins thermiques (combustibles) réels pour des fours de divers types et tailles se situent dans les plages indiquées dans le Tableau 1.18, tout comme la consommation d'énergie thermique pour la production de ciments spéciaux. L'expérience montre que la consommation d'énergie des usines utilisant la voie sèche, avec préchauffeurs multicyclones et fours à précalcinateur, est comprise entre 3 000 et plus de 3 800 MJ/tonne de clinker (moyenne annuelle). Les variations sont dues aux arrêts et aux démarrages des fours et, par exemple, aux différentes propriétés des matières premières. Le Tableau 1.17 propose une estimation de l'influence du taux d'humidité dans la matière première sur les besoins en énergie thermique pour les fours avec préchauffeur à cyclones.

Besoins en énergie thermique spécifiques (MJ/tonne le clinker)	Procédé
3 000 – <4 000	Pour les fours avec précalcinateurs et préchauffeurs à plusieurs étages de cyclones (trois à six étages) (voie sèche)
3 100 – 4 200	Pour les fours rotatifs avec préchauffeurs à cyclones (voie sèche)
3 300 – 5 400	Pour les fours en voie semi-sèche /semi-humide (four Lepol)
jusqu'à 5 000	Pour les fours longs, en voie sèche
5 000 – 6 400	Pour les fours longs, en voie humide
3 100 – 6 500 et plus	Pour les fours verticaux et pour la production des ciments spéciaux

Tableau 1.18 : Consommation d'énergie thermique dans la fabrication du ciment dans l'UE des 27
[75, Estonie, 2006], [76, Allemagne, 2006], [84, CEMBUREAU, 2006], [92, Autriche, 2006],
[120, Espagne, 2007], [168, TWG CLM, 2007]

La Figure 1.21 montre la consommation d'énergie thermique de l'industrie du ciment de l'UE des 27 en 2004 sans distinction de procédé (voie sèche, semi-sèche/humide ou humide) et de combustible utilisé (fossile ou déchet, ou les deux). Environ 30 cimenteries de l'UE des 27 sont de grosses consommatrices d'énergie thermique avec plus de 5 000 MJ/tonne de clinker, par exemple pour la production de ciments spéciaux comme le ciment blanc (cf. également le Tableau 1.18). La consommation d'énergie pour la production de ciment blanc est affectée par une température requise pour la production de ce type de clinker plus élevée par rapport à la production d'autres types de clinker (gris) [75, Estonie, 2006], [84, CEMBUREAU, 2006], [120, Espagne, 2007].

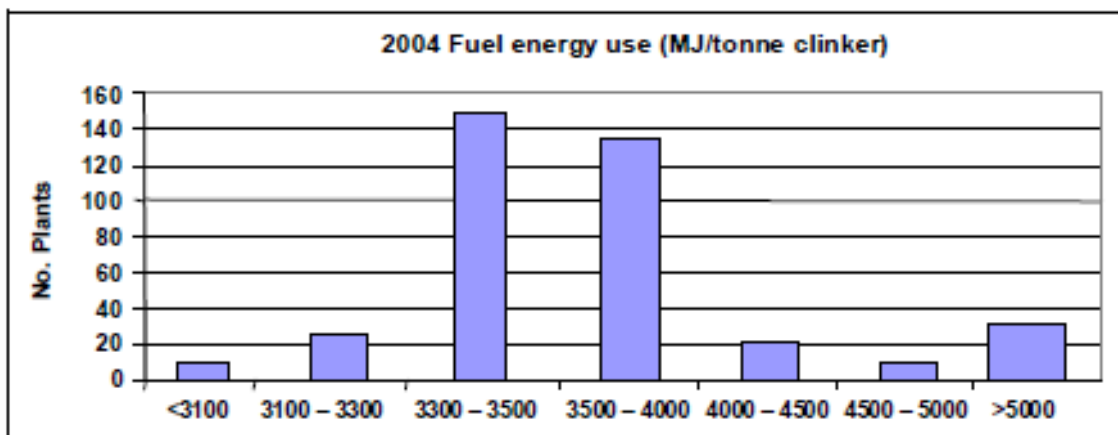


Figure 1.21 : Consommation d'énergie thermique dans l'industrie du ciment de l'UE des 25 en 2004 [84, CEMBUREAU, 2006]

Différents paramètres peuvent influencer la consommation d'énergie spécifique, notamment [92, Autriche, 2006] :

- la taille et la conception de l'unité,
 - trois à six étages cycloniques,
 - le calcinateur,
 - l'air tertiaire,
 - le fonctionnement compound du broyeur,
 - le rapport longueur/diamètre du four,
 - le type de refroidisseur à clinker,
- la production du four,
- la teneur en humidité des matières premières et des combustibles,
- les propriétés des matières premières, comme leur aptitude à la cuisson,
- le pouvoir calorifique spécifique des combustibles,
- le type de clinker,
- l'homogénéisation et le pesage précis du cru et des combustibles,
- l'optimisation de la conduite, y compris le refroidissement de la flamme,
- le taux de bypass.

Tout changement de la combinaison de combustibles utilisée peut modifier la consommation d'énergie spécifique par tonne de clinker en fonction du type de combustibles (conventionnels ou déchets), de leurs paramètres, par exemple la teneur en humidité, de la réactivité ou de la granulométrie, et du pouvoir calorifique des combustibles utilisés.

C'est principalement la préparation des combustibles fossiles qui a le plus d'impact sur la consommation d'énergie. Dans de nombreux cas, le séchage du charbon ou du lignite se fait partiellement ou entièrement hors du four, voire à l'extérieur de la cimenterie. Le lignite, par exemple, tel qu'il est extrait, peut présenter une teneur en humidité supérieure à 50 % et doit donc être séché avant sa livraison à la cimenterie. Lorsque les combustibles séchés sont remplacés par des combustibles présentant une plus grande teneur en humidité, le four peut enregistrer une augmentation de la consommation d'énergie par tonne de clinker. Celle-ci peut toutefois être globalement compensée par le gain d'énergie sur le séchage et le transport des combustibles fossiles ainsi évités.

En ce qui concerne la question de l'humidité du combustible, le séchage est d'une efficacité variable selon la méthode utilisée, comme le séchage du combustible au moyen de la chaleur résiduelle du procédé ou le séchage du combustible à l'intérieur du four qui exigera davantage d'énergie pour parvenir à en supprimer la teneur en humidité. Comme la matière première, certains combustibles contiennent également quelques minéraux humides. Ces minéraux sont séchés dans le four, ce qui peut également faire augmenter la consommation d'énergie spécifique par tonne de clinker.

De plus, comme le montrent des exemples fournis par l'Autriche et le Royaume-Uni, un taux de substitution élevé par des déchets combustibles conjugué à différents paramètres tels que les pouvoirs calorifiques inférieurs de ce type de combustibles, leur forte teneur en humidité et la conception de l'installation, peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie (cf. Section 1.3.3.3). Dans les cas où les installations ont été spécifiquement conçues pour permettre la co-incinération de certains types de déchets combustibles, la consommation d'énergie thermique peut toujours être maintenue entre 3 120 et 3 400 MJ/t de clinker. Des cimenteries autrichiennes ont communiqué les résultats d'un test de 48 heures dans lequel une consommation de 3 400 MJ/t de clinker a été atteinte avec une grande quantité de déchets à faible pouvoir calorifique composés essentiellement de plastiques humides. D'autre part, une consommation d'énergie de 3 473 kJ/kg a été signalée au Royaume-Uni pour un four équipé d'un précalcinateur à cinq étages. Une marge d'amélioration potentielle a toutefois été identifiée [81, Castle Cement UK, 2006], [92, Autriche, 2006], [163, Castle Cement UK, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [171, A TEC, 2007].

1.3.3.2 Besoins en énergie électrique

Les principaux consommateurs d'électricité sont les broyeurs (ciment et cru) et les ventilateurs extracteurs (fours/broyeurs cru et broyeurs ciment) qui consomment à eux seuls 80 % de l'électricité utilisée. Le coût de l'énergie sous forme de combustible et d'électricité représente en moyenne 40 % du coût de production total d'une tonne de ciment. L'électricité représente jusqu'à 20 % des besoins globaux en énergie. La consommation électrique est comprise entre 90 et 150 kWh/tonne de ciment. Entre 2004 et 2006, la part des coûts de l'électricité dans le coût de production total du ciment est passée de 14 % à 25 %. La voie humide consomme davantage d'énergie que la voie semi-humide ou sèche [20, Rother, janvier 1996,], [84, CEMBUREAU, 2006].

La nature des produits, avec leurs propres exigences de broyage, détermine également la consommation d'électricité. Dans certains cas, il a suffi de remplacer les anciens broyeurs à cru par des neufs pour réduire la consommation d'électricité. Le Tableau 1.19 fournit une comparaison de la consommation d'énergie des différentes techniques de broyage. Il convient de noter qu'il n'est pas toujours possible de remplacer un broyeur par un autre. Il convient en outre de mentionner qu'une évaluation de la technique de broyage la plus appropriée doit toujours tenir compte également des aspects économiques.

Technique de broyage	Consommation d'énergie	Exigences en matière de maintenance	Capacité de séchage	Aptitude pour un broyage d'une grande finesse
Broyeur à boulets	100 %	Mineures	Moyenne	Bonne
Broyeur à rouleaux Gutbett	65 à 50 %	Mineures à majeures	Faible ¹⁾	Moyenne
Broyeur vertical à rouleaux	75 à 70 %	Moyenne	Élevée	Moyenne
1. séchage dans classificateur				

Tableau 1.19 : Comparatif des techniques de broyage sur la base des caractéristiques principales [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006]

1.3.3.3 Consommation de déchets combustibles

Tant les déchets combustibles que les combustibles conventionnels sont utilisés pour couvrir les besoins énergétiques. Cependant, la consommation des déchets combustibles n'a cessé d'augmenter ces dernières années. En 2004, l'Europe a utilisé 6,1 millions de tonnes de déchets de différents types en tant que combustibles dans les fours à ciment. Sur cette quantité, près d'un million de tonnes étaient des déchets dangereux. On constate dans les pays de l'UE des 23+ (cf. Glossaire) une augmentation considérable de la substitution des combustibles traditionnels par des déchets combustibles, passant de 3 % en 1990 à environ 17 % en 2007, soit une économie d'environ 4 millions de tonnes de charbon [74, CEMBUREAU, 2006].

De grandes différences peuvent toutefois être observées d'un État membre à l'autre malgré des possibilités similaires d'augmenter le taux de substitution. En 2007, certaines usines atteignaient déjà des taux de substitution supérieurs à 80 %. Les déchets combustibles peuvent fournir jusqu'à 100 % de l'énergie consommée, par exemple dans un four en voie sèche composé d'un four rotatif, d'un préchauffeur à double colonne à quatre étages et d'un refroidisseur planétaire. La Section 4.2.2.1 fournit un exemple.

Il convient de noter que le pouvoir calorifique de ces déchets est très variable (de 3 à 40 MJ/kg). La documentation technique montre que les combustibles conventionnels présentent un pouvoir calorifique (moyen, net) de 26 à 30 MJ/kg, par exemple, pour le charbon standard ou de 40 à 42 MJ/kg pour le fioul standard, alors que les déchets solides peuvent afficher un pouvoir calorifique de 8,5 MJ/kg et pouvant atteindre 40 MJ/kg pour la matière plastique [143, Williams, 2005]. Les déchets combustibles présentant un pouvoir calorifique adéquat peuvent permettre d'économiser les combustibles fossiles en les remplaçant. Les fours doivent néanmoins permettre la combustion des déchets et il convient d'optimiser les conditions en vue de favoriser une haute efficacité énergétique (cf. Sections 1.3.3.1 et 1.4.2.1.3). Le Tableau 1.20 fournit des exemples du pouvoir calorifique caractéristique de différents déchets.

Exemples de types de déchets combustibles (dangereux et non dangereux)	Exemples de pouvoir calorifique (MJ/kg)
Bois	Environ 16
Papier, carton	3 – 16
Textiles	jusqu'à 40
Plastiques	17 – 40
Fractions traitées (RDF)	14 – 25
Caoutchouc/Pneus	Environ 26
Boues industrielles	8– 14
Boues de stations d'épuration municipales	12 – 16
Farines, graisses animales	14– 18, 27 – 32
Farines animales (farines d'équarrissage)	14 – 21,5
Déchets de charbon/carbone	20 – 30
Déchets agricoles	12 – 16
Déchets solides (sciures imprégnées)	14 – 28
Solvants et déchets associés	20 – 36
Déchets de pétrole et huileux	25 – 36
Combinaison de combustibles à base de schiste bitumeux (85 à 90 % de schiste bitumeux)	9,5
Boues d'épuration (teneur en humidité > 10 %)	3 – 8
Boues d'épuration (teneur en humidité < 10 à 0 %)	8 – 13

Tableau 1.20 : Exemples du pouvoir calorifique de différents types de déchets utilisés comme combustible dans l'UE des 27

[75, Estonie, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [180, Mauschitz, 2004]

Il convient de remarquer qu'en fonction des différents paramètres (cf. Section 1.4.2.1.3), les besoins en énergie thermique spécifiques moyens annuels peuvent également augmenter comme le montrent les exemples du Royaume-Uni et d'Autriche ci-dessous.

Dans les usines du Royaume-Uni prises en exemple, le pouvoir calorifique (net) des déchets combustibles utilisés, provenant par exemple des déchets municipaux, commerciaux et/ou industriels, peut varier entre 15 et 23 MJ/kg. Un taux de substitution thermique de 25 % du total du combustible utilisé a toutefois été rapporté dans une usine, soit l'équivalent de 30 000 tonnes de charbon. Étant donné que le pouvoir calorifique des déchets combustibles est inférieur, 44 118 t sont nécessaires [153, Castle Cement UK, 2007], [154, CEMEX UK, 2006]. Un autre exemple montre que 125 000 t de déchets combustibles sont nécessaires pour remplacer 100 000 t de charbon. Cela correspond à 20 % de déchets combustibles utilisés en plus [81, Castle Cement UK, 2006].

En Autriche entre 1997 et 2004, l'utilisation de combustibles fossiles a diminué de manière constante alors que la part des déchets utilisés a augmenté de 19 % en 1997 à 47 % en 2004. Les besoins en énergie thermique ont d'abord diminué de 3 554 à 3 481 MJ/t de clinker en 2000. Cependant, de 2000 à 2004 la combinaison de combustibles a considérablement évolué (cf. Section 4.2.2.2, Tableau 4.2 1), avec une importante diminution de la part du charbon (de 44,9 à 17,6 %) et, parallèlement, une forte augmentation de l'utilisation du coke de pétrole (de 3,2 à 16,0 %) et des déchets, tels que les plastiques (de 9,1 à 17,6 %) et d'autres déchets combustibles (de 2,4 à 10,2 %) [92, Autriche, 2006].

En outre, le document de référence sur les meilleures techniques disponibles en ce qui concerne l'incinération de déchets fournit des exemples de pouvoirs calorifiques calculés pour différents types de déchets traités ainsi que des exemples de calcul [57, Commission européenne, 2005].

L'augmentation de l'utilisation des déchets concerne davantage les déchets non dangereux que les déchets dangereux. Cela traduit une évolution sociétale (augmentation des boues, des farines animales, des déchets urbains traités), ainsi que la plus grande attention portée à la classification des déchets. Avec un taux de substitution thermique de 17 % en moyenne, pouvant atteindre 100 % dans certains pays, on peut considérer que l'utilisation des déchets comme combustible et matières premières dans la cuisson du clinker est une pratique courante. Sur 6 millions de tonnes, environ 10 % provient de biomasse.

Les taux de substitution en déchets combustibles dans les pays de l'UE des 23+ sont donnés dans le Tableau 1.22 [74, CEMBUREAU, 2006], [75, Estonie, 2006], [76, Allemagne, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [92, Autriche, 2006], [107, Belgique, 2006], [112, République tchèque, 2006].

Les consommations de différents déchets dangereux et non dangereux utilisés comme combustible pour la cuisson des fours à ciment de l'UE des 27 sont fournies dans le Tableau 1.21 et la Figure 1.22. La consommation totale de déchets combustibles dans les fours à ciment de l'UE des 27 a augmenté de 2003 à 2004 [74, CEMBUREAU, 2006].

Types de déchets combustibles					
N° de groupe. ¹⁾	Type de déchet	Quantités en millier(s) de tonnes			
		2003		2004	
		Dangereux	Non dangereux	Dangereux	Non dangereux
1	Bois, papier, carton	0,000	214,991	1,077	302,138
2	Textiles	0,000	19,301	0,000	8,660
3	Plastiques	0,000	354,070	0,000	464,199
4	RDF	4,992	570,068	1,554	734,296
5	Caoutchouc/Pneus	0,000	699,388	0,000	810,320
6	Boues industrielles	52,080	161,660	49,597	197,720
7	Boues de stations d'épuration municipales	0,000	174,801	0,000	264,489
8	Farines, graisses animales	0,000	13 13,094	0,000	1 285,074
9	Déchets de charbon/carbone	1,890	137,213	7,489	137,013
10	Déchets agricoles	0,000	73,861	0,000	69,058
11	Déchets solides (sciures imprégnées)	164,931	271,453	149,916	305,558
12	Solvants et déchets associés	425,410	131,090	517,125	145,465
13	Déchets de pétrole et huileux	325,265	181,743	313,489	196,383
14	Autres	0,551	199,705	0,000	212,380
Total		975,119	4 502,435	1 040,247	5 133,353
1. Chaque groupe recouvre plusieurs rubriques du CED, voir Tableau 4.1 dans la Section 4.2.1					

Tableau 1.21 : Consommation de différents types de déchets utilisés comme combustible dans les fours à ciment de l'UE des 27 en 2003 et en 2004
[74, CEMBUREAU, 2006]

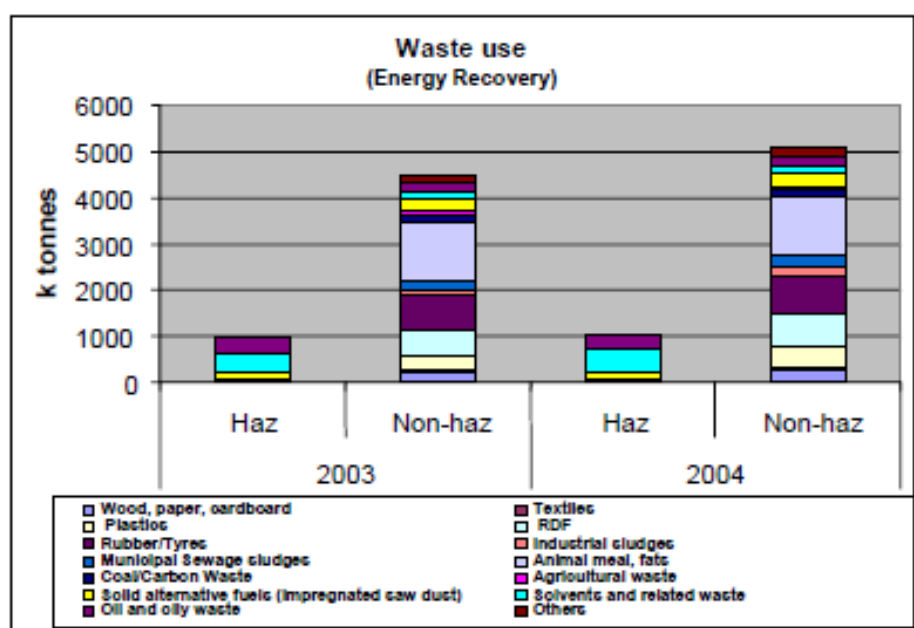


Figure 1.22 : Consommation des différents types de déchets dangereux et non dangereux utilisés comme combustible dans les fours à ciment de l'UE des 27 [74, CEMBUREAU, 2006]

Pays	Capacités autorisées de déchets combustibles (t/an)		Quantité de déchets combustibles utilisés (t/an)		Pourcentage de chaleur dégagée (%)			
					Déchets dangereux		Déchets non dangereux	
	Plage nationale ¹⁾	Moyenne nationale	Plage nationale ¹⁾	Moyenne nationale	Plage nationale ¹⁾	Moyenne nationale	Plage nationale ¹⁾	Moyenne nationale
Autriche ³⁾	10 000 – 35 000	-	9 500 – 39 000	30 000	30 – 45	12	15 – 50	35
Belgique, Pays-Bas, Luxembourg	-	-	58 500 – 402 000	138 930	0 – 25	11	21 – 30	24
République tchèque	90 000 ²⁾	-	-	40 000	0 – 40	15	0 – 100	37
Danemark, Finlande, Suède, Norvège, Irlande	300 000 ²⁾	-	22 000 – 120 000	75 000	2 – 20	15	24 – 35	32
Estonie, Lettonie, Pologne, Hongrie	15 000 – 380 000	125 000	8 000 – 67 369	27 271	13,4 – 14	13,7	16 – 26,1	17,5
France	125 000 – 265 000	-	300 – 113 000	37 374	0 – 41,2	14	0,4 – 52	14,6
Allemagne	-	-	218 157 ²⁾	56 857	0 – 25	5,2	76 ²⁾	43,6
Grèce, Portugal, Roumanie, Slovaquie	20 000 – 500 000	20 506	640 – 60 000	9 196	0 – 3,8	0,7	0,4 – 15,6	2
Italie	5 000 – 115 000	28 000	5 300 – 90 600	13 100	1,3 – 21	12	0,9 – 37	11,3
Espagne	8 800 – 100 000	43 000	2 000 – 36 000	15 500	0 – 27,8	4,8	2 – 25	8,5
Royaume-Uni	25 000 – 788 400	182 337	0 – 55 960	24 086	0 – 27,6	6	0 – 40	7,8
Note : les chiffres correspondent au total des réponses des pays de l'UE des 23+								
1) Minimum – maximum								
2) Maximum								
3) Uniquement les chiffres de 2004								

Tableau 1.22 : Substitution en déchets combustibles pour la fabrication du ciment dans les pays de l'UE des 23+ [168, TWG CLM, 2007], [178, CEMBUREAU, 2008]

1.3.4 Émissions atmosphériques

La fabrication du ciment est à l'origine de rejets de polluants dans l'air et d'émissions sonores. De surcroît, l'utilisation de déchets peut produire des odeurs (par exemple leur stockage et manipulation) (cf. Section 1.3.8). Cette section présente les plages d'émission de polluants dans l'air concernant tant la production de ciment que les autres étapes du procédé, comme le stockage et la manipulation par exemple des matières premières, des additifs et des combustibles, y compris déchets.

La directive IPPC (Prévention et réduction intégrées de la pollution) contient la liste générale des principaux polluants atmosphériques à prendre en compte pour fixer les valeurs limites des émissions. Les principaux polluants concernant la fabrication du ciment, y compris avec l'utilisation de déchets, sont :

- les oxydes d'azote (NO_x) et autres composés azotés,
- le dioxyde de soufre (SO₂) et autres composés soufrés,
- les poussières,
- les composés organiques totaux (TOC), y compris les composés organiques volatils (COV),
- les polychlorodibenzo-para-dioxines et les polychlorodibenzofuranes (PCDD et PCDF),
- les métaux et leurs composés,
- le fluorure d'hydrogène (HF),
- le chlorure d'hydrogène (HCl),
- le monoxyde de carbone (CO).

Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂) ne figure pas sur cette liste mais c'est aussi un polluant associé à la fabrication du ciment. La Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la Directive 96/61/CE du Conseil fournit des informations générales sur les émissions de CO₂ et le système d'échange de quotas d'émissions [99, Commission européenne, 2003]. Les émissions de NH₃ peuvent en outre présenter un intérêt, notamment lorsque des mesures/techniques secondaires de réduction des émissions de NO_x sont mises en œuvre (par exemple la SNCR).

Les principales émissions de la fabrication du ciment sont les émissions atmosphériques des fours. Elles sont dues aux réactions physico-chimiques des matières premières et à la combustion des matériaux utilisés pour chauffer les fours. Les principaux constituants des gaz résiduels d'un four à ciment sont l'azote (issu de l'air comburant), le CO₂ (produit par la calcination du CaCO₃ et par la combustion), la vapeur d'eau (produite par la combustion et les matières premières) et l'excès d'oxygène.

Dans tous les procédés, les matières solides progressent à contre-courant des gaz chauds de combustion. Cette circulation à contre-courant a un effet positif sur les émissions de polluants, car elle agit comme un lit fluidisé circulant intégré. De nombreux produits gazeux issus de la combustion ou de la transformation des matières premières en clinker sont absorbés par le flux de matières premières circulant à contre-courant ou se condensent.

Ce pouvoir d'absorption des matières premières varie avec leur état physico-chimique qui lui-même dépend de leur position dans le four. Par exemple, la matière qui sort de l'étape de calcination contient beaucoup d'oxyde de calcium, ce qui lui donne une grande capacité d'adsorption de certains acides, comme le HCl, le HF et le SO₂.

Le tableau 1.23 fournit des informations chiffrées sur les émissions des fours en service. Leurs plages d'émission dépendent très largement de la nature des matières premières, des combustibles, de l'âge et de la conception de l'installation ainsi que des conditions imposées par l'instance qui a délivré le permis. Par exemple, la concentration d'impuretés et le comportement du calcaire pendant la cuisson/calcination peuvent influencer les émissions ; la variation de la teneur en soufre de la matière première joue notamment un rôle important et a un effet sur la plage des émissions de soufre dans le gaz résiduaire.

Émissions déclarées des fours à ciment en Europe ¹⁾			
Polluant	mg/Nm ³	kg/tonne de clinker	tonnes/an
NO _x (en NO ₂)	145 – 2040	0,33 – 4,67	334 – 4 670
SO ₂	jusqu'à 4 837 ²⁾	jusqu'à 11,12	jusqu'à 11 125
Poussières	0,27 – 227 ³⁾	0,00062 – 0,522 1	0,62 – 522
CO	200 – 2 000 ⁴⁾	0,46 – 4,6	460 – 11 500
CO ₂	-	environ 672 g/t de ciment	1,5456 million
COT/COV	1 – 60 ⁵⁾	0,0023 – 0,138	2,17 – 267
HF	0,009 – 1,0	0,02 1 – 2,3 g/t	0,21 – 23,0
HCL	0,02 – 20,0	0,046 – 46 g/t	0,046 – 46
PCDD/F	0,000012 – 0,27 ng I-TEQ/Nm ³	0,0276 – 627 ng/t	0,0000276 – 0,627 g/an
Métaux⁷⁾			
Hg	0 – 0,03 ⁶⁾	0-69 mg/t	0 – 1 311 kg/an
Σ (Cd, Tl)	0 – 0,68	0-1 564 mg/t	0 – 1 564 kg/an
Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	0-4,0	0-9 200 mg/t	0 – 9 200 kg/an
<p>1) Ces chiffres sont donnés pour 2 300 m³ de gaz/tonne de clinker et pour une production d'un million de tonnes de clinker par an. Les plages d'émission sont des moyennes annuelles et sont des valeurs indicatives obtenues en utilisant différentes techniques de mesure. La teneur en O₂ de référence est normalement de 10 %.</p> <p>2) Valeurs des émissions de SO₂ mesurées dans le gaz épuré de 253 fours rotatifs. 11 mesures sont au-dessus de la plage. Sur celles-ci, 7 ont un taux de substitution de '0', 3 de '0 à 10' et une 'au-dessus de 40'. Il faut s'attendre à d'importantes émissions de SO₂ lorsque les matières premières contiennent des composés de soufre volatils (par exemple de la pyrite). En effet, ces composés oxydables peuvent être transformés en SO₂ dès les étages cycloniques supérieurs. Ce SO₂ peut être absorbé dans le broyeur à cru par la matière première finement broyée.</p> <p>3) Les chiffres correspondent aux valeurs des émissions de poussières mesurées en continu dans le gaz épuré de 253 fours rotatifs. 8 mesures sont au-dessus de la plage. Les niveaux d'émission dépendent grandement de l'état des dispositifs de réduction.</p> <p>4) Dans certains cas, les émissions de CO peuvent dépasser les 2 000 mg/Nm³ et atteindre les 5 000 mg/Nm³ (11,5 kg/tonne de clinker), par exemple en raison de la réduction de NO_x.</p> <p>5) Moyennes annuelles de 120 mesures ; seules quelques valeurs sont supérieures à 60 mg/Nm³ (jusqu'à 122,6 mg/Nm³ ou 0,28 kg/tonne de clinker)</p> <p>6) Recueilli de 306 mesures ponctuelles avec une moyenne de 0,02 mg/Nm³ et une valeur maximale de 0,57 mg/Nm³ (1 311 mg/tonne de clinker)</p> <p>7) '0' = niveau de détection</p>			

Tableau 1.23 : Données sur les plages d'émission des fours à ciment européens
[8, CEMBUREAU, 2001], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [12, Pays-Bas, 1997], [19, Haugh, 2001], [29, Lohse, 2001], [97, CEMBUREAU, 2007], [168, TWG CLM, 2007]

Les fours produisent de 1 700 à 2 500 m³ de gaz résiduaires / tonne de clinker (valeur type, gaz sec, 101,3 kPa, 273 K) [8, CEMBUREAU, 2001]. Le volume de gaz résiduaire produit par les fours à préchauffeurs à suspension et par les fours à précalcinateur se situe normalement autour de 2 300 m³/tonne de clinker (gaz sec, 101,3 kPa, 273 K).

Il existe également des émissions de poussières canalisées provenant d'autres sources, comme les opérations de broyage et de manutention (matières premières, combustible solide et produit). Tous les stocks extérieurs de matières premières et de combustibles solides ainsi que tous les systèmes de transport des matériaux, y compris ceux servant à charger le ciment, constituent un risque potentiel d'émissions de poussières diffuses qui peuvent être importantes si elles ne sont pas prises en compte correctement du point de vue technique ; des problèmes de nuisance peuvent apparaître localement si elles ne sont pas réduites et maintenues à un niveau bas.

1.3.4.1 Poussières (particules)

1.3.4.1.1 Émissions de poussières canalisées

Traditionnellement, les émissions de poussières (PM), en particulier les rejets des cheminées des fours, ont toujours été l'une des préoccupations environnementales principales pour la fabrication de ciment. Les principales sources d'émissions de poussières sont le procédé de préparation du cru (stations de broyage des matières premières), les unités de broyage et de séchage, la cuisson du clinker (fours et refroidisseurs à clinker), la préparation du combustible et l'unité de broyage du ciment (broyeurs à ciment). Que l'on utilise ou non des déchets, certains procédés secondaires d'une cimenterie sont également à l'origine d'émissions de poussières, par exemple :

- le concassage des matières premières,
- les convoyeurs et tapis élévateurs des matières premières,
- le stockage des matières premières et du ciment,
- les unités de broyage des matières premières, du ciment et du charbon,
- le stockage des combustibles (coke de pétrole, houille, lignite), et
- l'expédition du ciment (chargement).

Dans tous ces procédés, des volumes importants de gaz circulent au travers de matériaux poussiéreux. Pendant le concassage, le broyage et l'expédition, une légère aspiration est maintenue au-dessus des équipements et ces sources de poussières sont normalement équipées de filtres à manches. La conception et la fiabilité des filtres électrostatiques et des filtres à manches modernes permettent d'abaisser les émissions de poussières à des niveaux négligeables, inférieurs à 10 mg/Nm^3 (moyennes journalières) dans 37 % des installations signalées. Le Tableau 1.24 fournit des exemples de types de systèmes, de la quantité des poussières filtrées et de l'extraction de poussière.

Comme le montrent les Figures 1.23 et 1.24, les émissions de poussières totales sont mesurées en continu sur 253 fours rotatifs et des mesures ponctuelles des poussières sont recueillies sur 180 fours rotatifs. Ces mesures proviennent toutes de cimenteries différentes qui se trouvent dans des pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Dans cette figure, le taux de substitution thermique est représenté par différentes couleurs. La plupart des émissions de poussières sont comprises entre 0,27 et moins de 30 mg/Nm^3 . Des émissions mesurées en continu ont été rapportées sous forme de moyenne annuelle des moyennes sur 24 heures [97, CEMBUREAU, 2007]. Les valeurs mesurées sont relatives à 1 m^3 de gaz sec dans des conditions standard.

En outre, les niveaux de poussières standard dans les gaz épurés (moyennes journalières) atteints par les fours rotatifs équipés d'un filtre électrostatique sont compris entre <10 et 30 mg/Nm^3 . Après traitement des gaz résiduels au moyen de filtres à manches, les émissions de poussières constatées vont de <10 à 20 mg/Nm^3 , en tant que moyenne journalière [92, Autriche, 2006], [75, Estonie, 2006], [76, Allemagne, 2006], [90, Hongrie, 2006], [112, République tchèque, 2006].

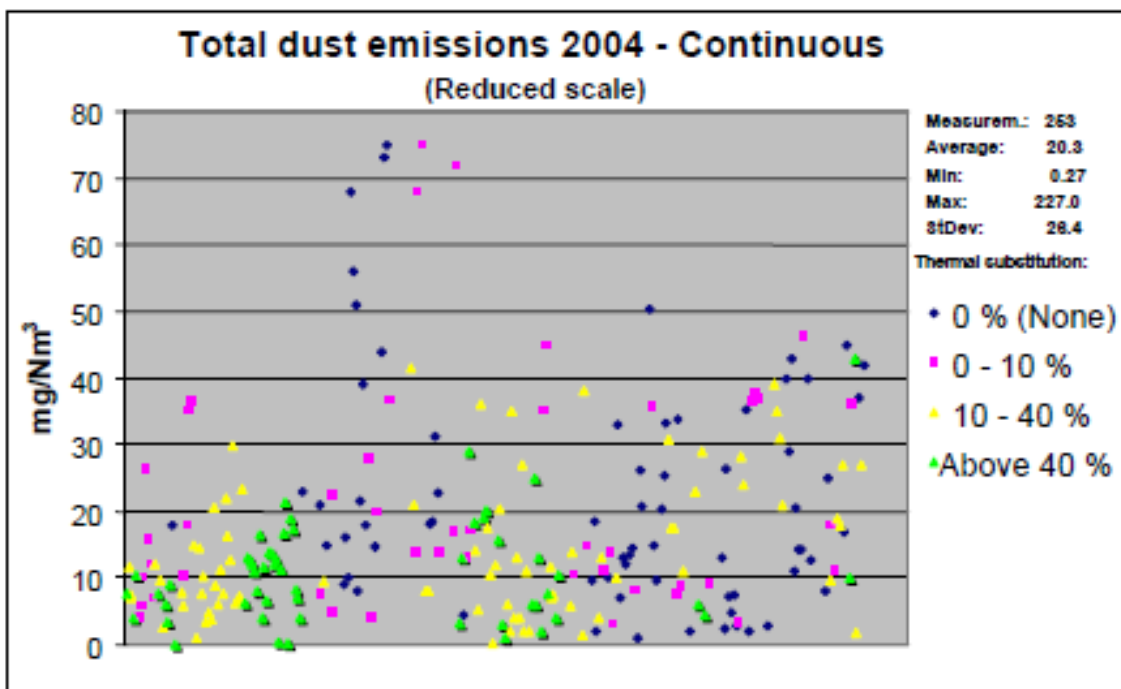


Figure 1.23 : Plages des valeurs des émissions de poussières mesurées en continu dans le gaz épuré de 253 fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+.
[97, CEMBUREAU, 2007]

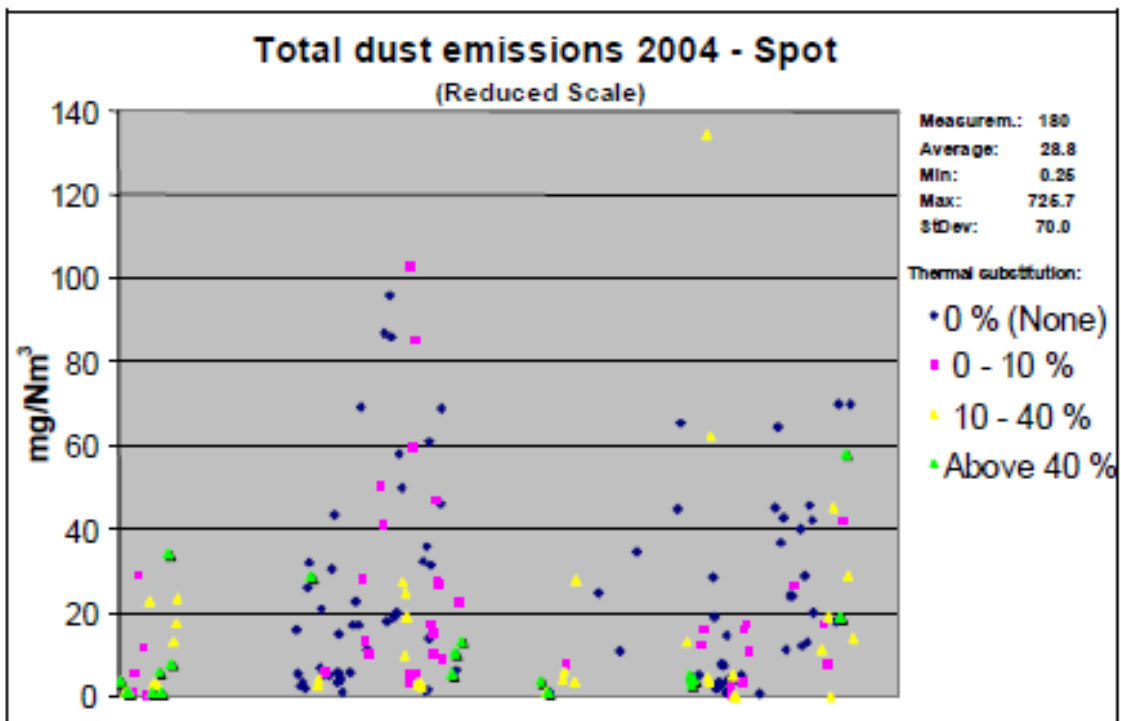


Figure 1.24 : Valeurs des émissions de poussières obtenues lors de 180 mesures ponctuelles des poussières effectuées dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+.
[97, CEMBUREAU, 2007]

Le Tableau 1.24 donne quelques exemples de types de filtres électrostatiques et de filtres à manches. Les valeurs représentent les plages standard et les valeurs entre parenthèses indiquent les valeurs extrêmes qui ont été signalées dans certains cas particuliers. Cette présentation générale fournit également une estimation des poussières filtrées et du dépoussiérage le cas échéant. Le fonctionnement compound et le fonctionnement direct font référence au mode de fonctionnement du broyeur (en marche, arrêté).

Types de systèmes et données d'exploitation relatives à la réduction des poussières			
Paramètre	Unité	Filtres électrostatiques	Filtres à manches
Année de construction		1 962 – 2 004	1 999 – 2 005
Perte de charge	hPa	1 – 8	(2) ¹⁾ 10 – 12
Température	°C	90 – 190	90 – 160 ²⁾
Besoins en énergie électrique	kWh/t de clinker	1 – 4	0,1 – 0,2
Besoins en puissance du ventilateur	kWh/t de clinker	0,15 – 1,2	1,5 – 1,8
Besoin énergétique total	kWh/t de clinker	1,15 – 5,2	1,6 – 2,0
Quantité de poussières filtrées et extraction de poussière			
Paramètre	Unité	Fonctionnement compound	Fonctionnement direct
Quantité de poussières filtrées	kg/t de clinker	54 – 144 (1718) ¹⁾	(10 – 70) ¹⁾ 80 – 200
Extraction de poussière	kg/t de clinker	0 – 35	0 – 66 (165) ¹⁾
1) Référence aux valeurs extrêmes qui ont été rapportées dans certains cas particuliers.			
2) Une température de 240 °C a été rapportée avec l'utilisation de fibres de verres avec une membrane en PTFE.			

Tableau 1.24 : Exemple des types de systèmes utilisés pour le dépoussiérage, données d'exploitation et besoins énergétiques
[76, Allemagne, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006]

Les filtres électrostatiques doivent parfois être arrêtés pour des raisons de sécurité lorsque les niveaux de CO dans les gaz résiduels sont élevés (pics de CO). Afin d'éviter tout problème de fonctionnement, les niveaux de CO élevés dans les gaz résiduels et la formation de mélanges détonants qui en découle doivent être supprimés de manière sûre. Un dispositif de surveillance automatique du CO doit contrôler les gaz résiduels en continu. Des exemples de pics de CO de différentes ampleurs et durées ont été signalés à diverses étapes du procédé de chauffe du four ainsi que lors des démarrages et des arrêts du four. En Irlande en 2006, dans certains cas pendant des pics de CO, des émissions de poussières supérieures à 60 et pouvant atteindre 130 mg/Nm³ (moyenne pour une demi-heure) ont été signalées à des fréquences comprises entre une et six fois par mois. Parmi ces cas, des mises hors services des filtres électrostatiques d'une durée de 1 à 13 minutes/arrêt et d'une durée totale atteignant 184 minutes ont été rapportées [159, Irlande, 2006]. La fréquence des pics de CO a toutefois été réduite, notamment dans les cimenteries allemandes, et comme le montre le Tableau 1.25, leur durée totale rapportée est comprise entre 1 et 29 minutes par an, soit entre <0,001 et 0,009 % respectivement du temps de marche total du four.

Année	Durée totale	
	(minutes)	(% du temps de marche total du four)
2000	12	0,003
2001	29	0,009
2002	1	<0,001
2003	6	0,001
2004	5	0,001

Tableau 1.25 : Exemples de fréquences de pics de CO dans une cimenterie allemande
[158, Allemagne, 2007]

1.3.4.1.2 Émissions de poussières fines PM₁₀ et PM_{2,5}

Les émissions de poussières de PM₁₀ et PM_{2,5} sont composées de fines particules d'une granulométrie inférieure à 10 et à 2,5 microns de diamètre respectivement qui peuvent se présenter sous forme solide ou d'aérosols. Ces types de poussières fines peuvent provenir d'une série de réactions physico-chimiques de différents gaz précurseurs, comme les oxydes d'azote, le soufre et l'ammoniac qui réagissent pour former du sulfate, du nitrate et des particules d'ammonium nocifs pour la santé. Dans l'industrie du ciment, ce sont les procédés de cuisson et de refroidissement qui produisent les PM₁₀ ou PM_{2,5}, ou les deux, bien que les procédés secondaires (cf. Section 1.3.4.1.1) puissent également être à l'origine de la formation de fines poussières.

Différentes méthodes de mesure et des préleveurs ont été mis au point ces dernières années conjointement avec des modèles de calcul dans le but de définir la tranche granulométrique de ces poussières très fines et leur répartition ainsi que de les séparer en classes granulométriques, par exemple sur la base des émissions totales de poussières mesurées du flux de gaz résiduaires. Une étude allemande montre que la plus grosse partie des émissions de poussières totales se présente sous forme de fines poussières, quelle que soit la concentration totale de poussières dans les effluents gazeux. En utilisant des filtres électrostatiques, environ 90 % des particules de poussière sont inférieures à 10 µm (PM₁₀) et environ 50 % inférieures à 2,5 µm (PM_{2,5}) comme le montrent des exemples tirés de l'industrie du ciment (cf. Tableau 1.26). Les émissions de poussières totales ont été mesurées à partir des relevés d'un échantillonneur à filtre (filtre plan). Des impacteurs en cascade ont été utilisés pour prélever du flux de gaz résiduaires les particules de poussière dans des conditions isocinétiques en les séparant en classes granulométriques. En outre, la Section 4.2.2.3 fournit des exemples des fines particules de poussière émises par les cimenteries irlandaises. Il est ainsi possible de réduire une grande partie des poussières fines en réduisant la concentration totale de poussières. Les usines équipées d'installations de dépoussiérage à haute efficacité n'émettent que relativement peu de poussières atmosphériques [113, Irlande, 2007], [117, Allemagne, 2000].

Source des émissions		Concentration totale de poussières ¹⁾ (mg/Nm ³)	Tranche granulométrique des poussières fines (%)			Concentration en poussières fines (mg/Nm ³)		
			<2,5	<10	>10	<2,5	<10	>10
			µm					
Four (filtre électrostatique) ²⁾	Gaz résiduaires du four après le filtre électrostatique	15,4	51	87	13	7,9	13,4	2,9
Refroidisseur à clinker (filtre électrostatique)	Gaz résiduaires du refroidisseur à clinker après le filtre électrostatique	14,0	68	99	1	9,5	13,9	<0,1
Préchauffeur à cyclones (filtre électrostatique), mode direct ³⁾	Gaz résiduaires du four après le filtre électrostatique	2,3	84	97	3	1,9	2,2	<0,1
Préchauffeur à cyclones (filtre électrostatique), mode combiné ³⁾	Gaz résiduaires du four après le filtre électrostatique	4,8	66	97	3	3,2	4,7	<0,1
1) Poussière totale mesurée à partir des relevés d'un échantillonneur à filtre (filtre plan), séparation en classes granulométriques avec impacteurs en cascade. 2) Four Lepol, maintenant arrêté 3) Broyeur arrêté 4) Broyeur en marche								

Tableau 1.26 : Étude de la répartition des poussières fines dans les poussières totales émises par les fours à ciment allemands
[117, Allemagne, 2000]

Le modèle d'information et de simulation de la pollution atmosphérique régionale (RAINS) a été étendu en vue d'examiner les synergies et les compromis entre la lutte contre la pollution atmosphérique locale et régionale et l'atténuation des émissions mondiales des gaz à effet de serre. Ce nouveau modèle GAINS (Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies) est d'une grande aide dans la recherche de stratégies de lutte contre la pollution dont les avantages sont maximisés à tous les niveaux.

Le modèle RAINS montre que les PM_{10} et les $PM_{2,5}$ représentent 60 % du total des matières particulaires (78 g/Nm^3) dans le gaz brut (avant traitement), comme illustré dans le Tableau 1.27. Le Tableau 1.28 donne des exemples de techniques de dépoussiérage ainsi que de leur efficacité.

Paramètre	Concentration gaz brut
Total des particules	130 g/Nm^3
PM_{10}	42 % du total des particules
$PM_{2,5}$	18 % du total des particules

Tableau 1.27 : Exemples des concentrations de poussières dans le gaz brut selon le modèle RAINS [172, France, 2007]

Technique	Efficacité du dépoussiérage (%)		
	Total des particules	PM_{10}	$PM_{2,5}$
Cyclone	74,4	52,86	30
Filtre électrostatique 1	95,8	94,14	93
Filtre électrostatique 2	98,982	97,7 1	96
Filtre électrostatique 3	99,767	99,5 1	99
Filtre à manches	99,784	99,5 1	99
Épurateur en voie humide	98,982	97,7 1	96

Tableau 1.28 : Exemples de techniques de réduction des poussières et de leur efficacité selon le modèle RAINS [172, France, 2007]

1.3.4.1.3 Émissions de poussières diffuses

Des émissions de poussières diffuses peuvent se produire au cours du stockage et du transport des matières premières et des combustibles solides, par exemple sur un lieu de stockage ouvert ou sur les convoyeurs de matières premières, ainsi qu'à la surface des routes à cause du transport. Les émissions qui se produisent lors du conditionnement et de l'expédition du clinker et du ciment peuvent aussi être importantes. Elles peuvent provoquer une augmentation locale du niveau des émissions de poussières alors que les rejets de poussières résultant de la mise en œuvre des procédés (en général, par des cheminées très élevées) peuvent affecter la qualité de l'air d'une zone beaucoup plus étendue.

Les convoyeurs et les tapis élévateurs prennent la forme de systèmes clos si des matériaux poussiéreux sont susceptibles de libérer de la poussière. Les routes empruntées par les camions sont pavées et régulièrement nettoyées de manière à éviter les émissions de poussières diffuses. En outre, la pulvérisation d'eau sur le site permet d'éviter ces émissions. Des systèmes de stockage fermés sont utilisés dans la mesure du possible [76, Allemagne, 2006].

1.3.4.2 Oxydes d'azote

La cuisson du clinker est un procédé à haute température qui entraîne la formation d'oxydes d'azote (NO_x). Ces oxydes jouent un rôle très important dans la pollution de l'air par les cimenteries. Ils se forment au cours de la cuisson par la combinaison soit de l'azote du combustible et de l'oxygène dans la flamme soit de l'azote atmosphérique et l'oxygène de l'air comburant.

Il existe deux grandes sources de production de NO_x :

- les NO_x thermiques :
 - une partie de l'azote de l'air comburant réagit avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote,
 - il s'agit du principal mécanisme de formation d'oxydes d'azote dans la flamme du four.
- les NO_x combustibles :
 - les composés contenant de l'azote, lié chimiquement dans le combustible, réagissent avec l'oxygène de l'air et forment des oxydes d'azote.

On peut toutefois observer quelques légers changements dans les émissions de NO_x lorsque des déchets sont utilisés :

- La combustion principale peut émettre moins de NO_x si les déchets combustibles contiennent de l'eau ou consomment plus d'oxygène (impact sur la température de la flamme qui est abaissée). L'effet est comparable au refroidissement de la flamme.
- La combustion secondaire/du précalcinateur peut émettre moins de NO_x si des combustibles lourds créent une zone de réduction [97, CEMBUREAU, 2007].

De surcroît, l'oxydation du NH_3 peut également produire des NO_x , si de l'ammoniac est injecté pour les réduire dans une zone de température inappropriée du four où les températures sont inférieures à 1 000°C.

Les NO_x thermiques se forment au-dessus de 1 050 °C. Pour des raisons de qualité du clinker, la cuisson s'effectue dans une atmosphère oxydante dans laquelle l'oxydation partielle de l'azote moléculaire de l'air comburant entraîne la formation de monoxyde d'azote. La majeure partie des NO_x thermiques se forme dans la zone de clinkérisation du four où la température est assez élevée pour que cette réaction puisse se produire. La quantité de NO_x thermiques qui y est produite dépend de la température et de la teneur en oxygène (facteur d'excès d'air) de cette zone. La vitesse de la réaction à l'origine de la formation de NO_x thermiques augmente avec la température ; les mélanges qui ne peuvent brûler qu'à une température très élevée dans la zone de clinkérisation tendent à former une quantité de NO_x thermiques supérieure à celle des mélanges qui brûlent facilement. La vitesse de la réaction augmente aussi avec la teneur en oxygène (facteur d'excès d'air). La conduite d'un même four avec une teneur en oxygène plus élevée à l'arrière (facteur d'excès d'air) provoque la formation d'une plus grande quantité de NO_x thermiques dans la zone de cuisson (bien que les émissions de SO_2 ou de CO , ou les deux, puissent diminuer).

Le NO et le NO_2 sont les principaux oxydes d'azote présents dans les gaz qui s'échappent des fours de cuisson du ciment. Les NO_x combustibles des composés azotés du combustible jouent un moindre rôle. Dans les fours à ciment rotatifs, la formation de NO (monoxyde d'azote) combustible dans la zone de combustion principale est insignifiante. Les émissions de NO_x d'un four à ciment sont normalement davantage liées à l'azote atmosphérique qu'au combustible brûlé. Le monoxyde d'azote (NO) représente environ 95 % et le dioxyde d'azote (NO_2) environ 5 % des oxydes d'azote présents dans les gaz résiduels des installations à fours rotatifs [76, Allemagne, 2006], [92, Autriche, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007]. Les NO_x combustibles résultent de la combustion de l'azote présent dans le combustible aux températures inférieures les plus fréquentes dans une unité de combustion secondaire ; il se combine avec d'autres atomes d'azote pour former le gaz N_2 ou il réagit avec l'oxygène pour former les NO_x combustibles. La plage de températures la plus fréquente dans un précalcinateur est comprise entre 850 et 950 °C, ce qui est insuffisant pour provoquer la formation d'une quantité significative de NO_x thermiques mais suffisant pour provoquer celle des NO_x combustibles. De même, d'autres types de combustions secondaires dans la partie arrière d'un four (dans la conduite ascendante d'un four à préchauffeur à suspension ou dans la chambre de décarbonatation d'un préchauffeur à grilles) peuvent provoquer la formation de NO_x combustibles.

Dans les fours à précalcinateurs où 60 % du combustible peut être brûlé dans le précalcinateur, la formation de NO_x combustibles représente une part importante de l'ensemble des émissions de NO_x . La formation de NO_x thermiques dans ces fours est très inférieure à celle des fours où la totalité du combustible est brûlé dans la zone de clinkérisation.

Les émissions de NO_x varient en fonction du procédé de cuisson utilisé. Outre la température et la teneur en oxygène (facteur d'excès d'air) la formation des NO_x peut être influencée par la forme et la température de la flamme, par la configuration de la chambre de combustion, la réactivité et la teneur en azote du combustible, la présence d'humidité, la durée de la réaction et la conception des brûleurs.

Les fours des cimenteries européennes rejettent annuellement en moyenne près de 785 mg de NO_x/Nm^3 (exprimés en NO_2) avec un minimum de 145 mg/ Nm^3 et un maximum de 2 040 mg/ Nm^3 . Des échantillons de données sur les émissions de NO_x ont été recueillis en 2004 auprès de différentes installations implantées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire) ; classées en fonction de leur taux de substitution thermique, elles sont présentées dans les Figures 1.25 et 1.26. Les émissions mesurées en continu ont été rapportées sous forme de moyenne annuelle des moyennes sur 24 heures. Les valeurs mesurées sont pour un m^3 de gaz sec dans des conditions standard [94, Commission européenne, 2004], [97, CEMBUREAU, 2007].

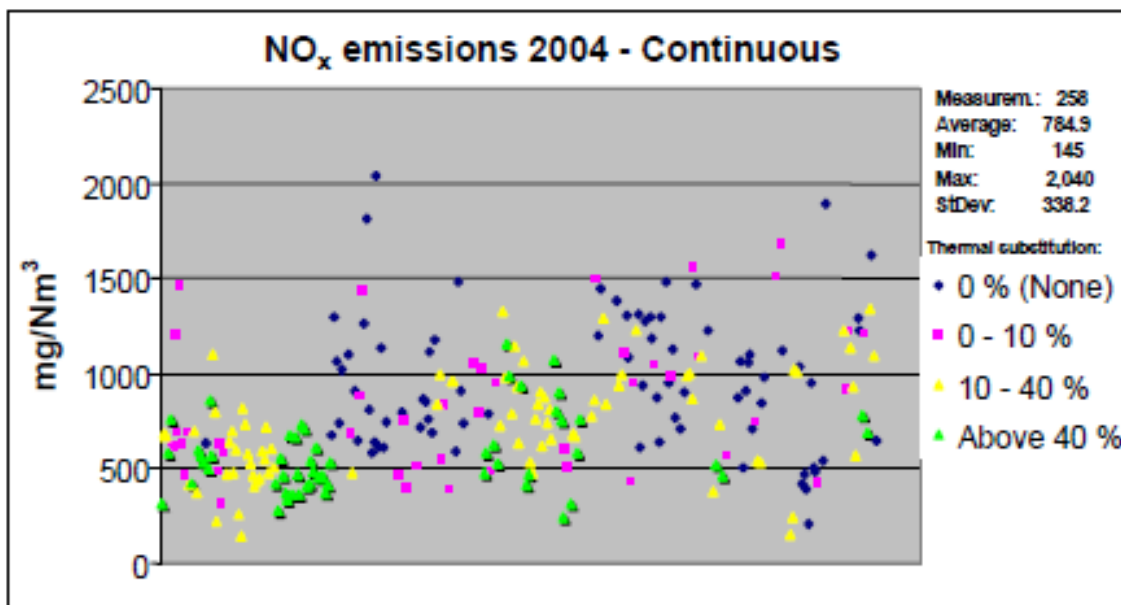


Figure 1.25 : Emissions de NO_x (exprimés en NO_2) par les fours de cimenteries des pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ en 2004, classées par catégorie selon le taux de substitution [97, CEMBUREAU, 2007]

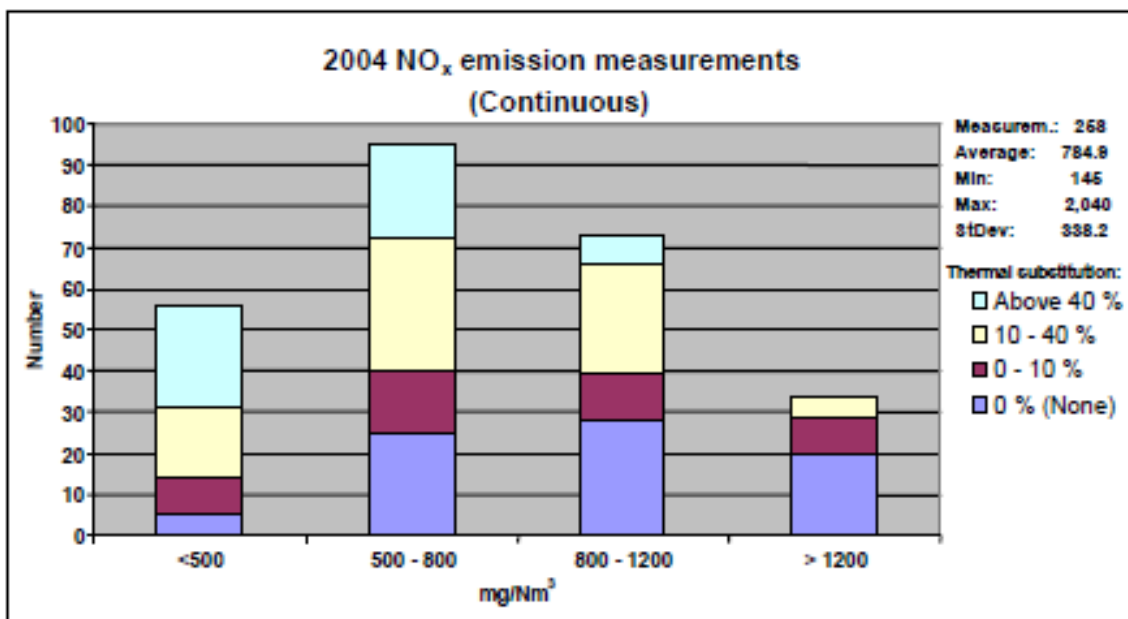


Figure 1.26 : Répartition des mesures par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de NO_x
 [97, CEMBUREAU, 2007]

En Autriche, la moyenne annuelle des émissions de NO_x était en 2004 de 645 mg/Nm³ (moyenne annuelle basée sur des mesures continues dans des conditions standard) avec des valeurs comprises entre 313 et 795 mg NO_x/Nm³, mesurées en tant que moyennes annuelles. Les valeurs les plus élevées et les plus faibles ont été mesurées dans différentes usines. Tous les fours autrichiens appliquaient des mesures/techniques primaires, trois fours utilisaient le refroidissement de la flamme, deux fours utilisaient la combustion étagée et cinq fours étaient équipés d'une unité de SNCR, dont deux en phase pilote. En 2007, tous les fours à ciment autrichiens étaient équipés de la SNCR [92, Autriche, 2006].

~

En Allemagne, huit fours utilisaient en 2006 la combustion étagée alors que 34 fours utilisaient la SNCR en tant que technique de réduction des NO_x. La plage moyenne annuelle des concentrations en NO_x des gaz résiduels de 200 à 800 mg/Nm³ a été déterminée à partir de mesures réalisées sur le gaz épuré de 43 fours rotatifs. Depuis 2007, la réglementation nationale impose aux fours à ciment allemands de maintenir leurs émissions de NO_x en dessous de 500 mg/Nm³. La plupart des unités de SNCR en service en Allemagne sont conçues et/ou conduites pour réduire de 10 à 50 % les niveaux de NO_x et abaisser leurs émissions en dessous de 500 mg/Nm³. En plus des mesures/techniques intégrées aux process, on atteint des émissions journalières moyennes comprises entre 200 et 500 mg/Nm³ en fonction de la valeur limite d'émission individuelle déterminée dans le permis [76, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [173, Allemagne, 2007].

En Suède, la SNCR haute efficacité est en service depuis 1997 dans trois fours à ciment. Depuis cette date, les émissions de NO_x à long terme avoisinent les 200 mg/Nm³. En 2004, la moyenne annuelle était de 221 mg/Nm³, alors que les moyennes mensuelles oscillaient entre 154 et 226 mg/Nm³. La charge de NO_x se situe entre 130 et 915 t/an [114, Suède, 2006].

Les émissions moyennes annuelles de NO_x des cimenteries finlandaises sont comprises entre 500 et 1 200 mg/Nm³ [63, Finlande, 2006]. En République tchèque, des émissions de NO_x allant de 400 à 800 mg/Nm³ ont été relevées [112, République tchèque, 2006]. En France, les émissions moyennes de NO_x de 33 cimenteries étaient de 666 mg/Nm³ en 2001 [116, France, 2006]. Dans un four long en voie humide au Danemark, on signale que l'application de la SNCR présente une efficacité de réduction de 40 à 50 % du niveau des émissions de NO_x < 800 mg/Nm³ [182, TWG CLM, 2008].

Dans la production du ciment blanc, certaines matières premières qui se transforment difficilement en clinker pendant la cuisson exigent des températures de flamme supérieures selon leur cristallographie et leur minéralogie. Le clinker blanc est un cas particulier, car l'absence de métaux en fusion suppose une augmentation d'environ 150°C des températures du clinker par rapport au clinker gris. Des températures de flamme supérieures entraînent également une formation plus importante de NO_x thermiques [120, Espagne, 2007].

La Section 1.4.5.1 décrit les techniques utilisées dans l'industrie du ciment pour réduire les émissions de NO_x. De plus, le Tableau 1.33 de la Section 1.4.5.1 présente le nombre connu en 2008 d'installations en grandeur réelle utilisant des techniques de réduction des émissions de NO_x dans les pays de l'UE des 27 et l'UE des 23+.

Le refroidissement de la flamme est utilisé comme technique de réduction des émissions de NO_x. Des taux/efficacités de réduction de l'ordre de 10 et 35 % ont été signalés. Les plages d'émission rapportées avec l'utilisation du refroidissement de la flamme apparaissent dans la Figure 1.27. Deux sites ont réussi à ne pas dépasser les 500 mg/Nm³, sept installations présentaient des plages d'émission de 500 à 800 mg/Nm³, et 11 autres de 800 à 1 000 mg/Nm³ (moyennes annuelles). A titre comparatif, la Figure 1.28 montre les plages des émissions de NO_x de plusieurs cimenteries qui n'utilisent pas la technique de refroidissement de la flamme. Peu sont les installations qui atteignent la valeur limite inférieure des émissions de NO_x.

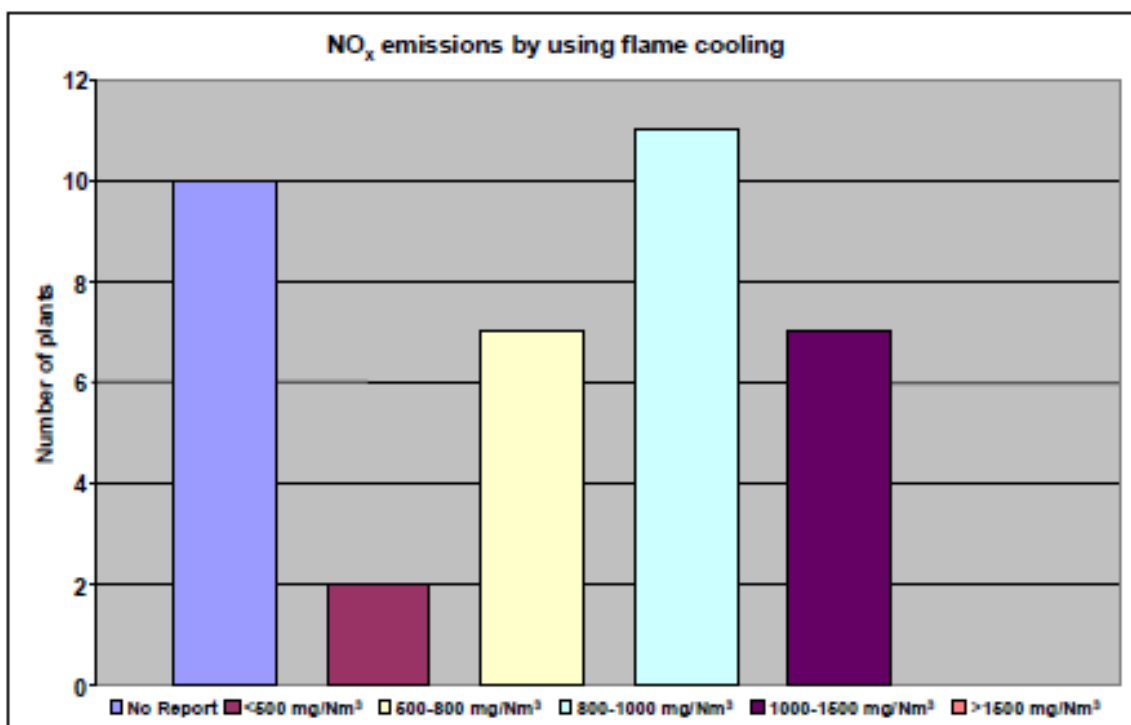


Figure 1.27 : Plages des émissions de NO_x obtenues par l'utilisation du refroidissement de la flamme dans plusieurs cimenteries de l'UE des 23+ [85, CEMBUREAU, 2006]

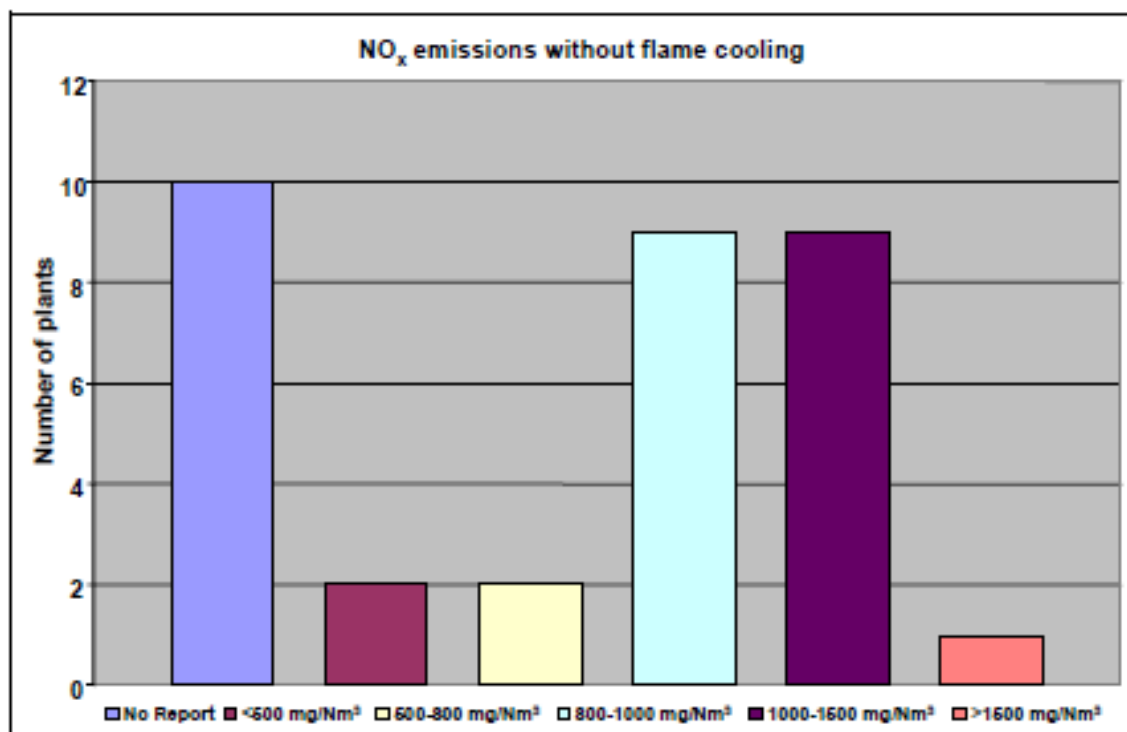


Figure 1.28 : Plages des émissions de NO_x obtenues par plusieurs cimenteries de l'UE des 23+ n'utilisant pas le refroidissement de la flamme [85, CEMBUREAU, 2006]

Comme le montrent les Figures 1.29 et 1.30, l'utilisation de la SNCR pour réduire les émissions de NO_x dans les cimenteries réduit la plage des émissions de NO_x atteintes par rapport aux cimenteries qui n'utilisent pas cette technique (moyennes annuelles).

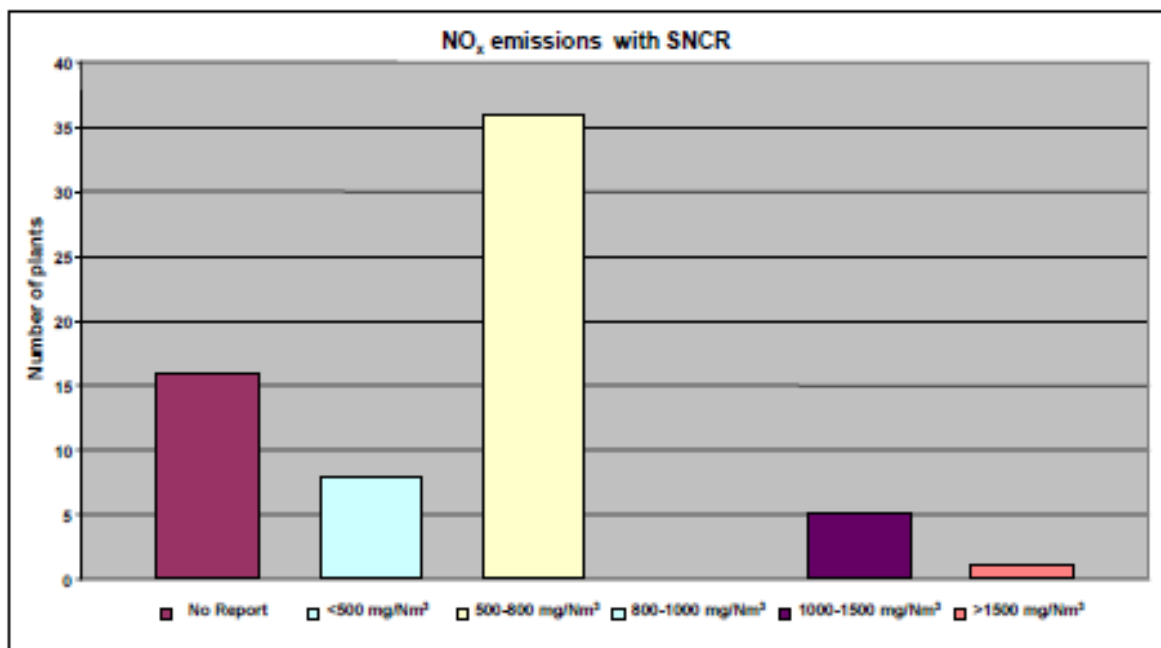


Figure 1.29 : Emissions de NO_x obtenues par plusieurs cimenteries utilisant la SNCR pour réduire les émissions de NO_x
[85, CEMBUREAU, 2006]

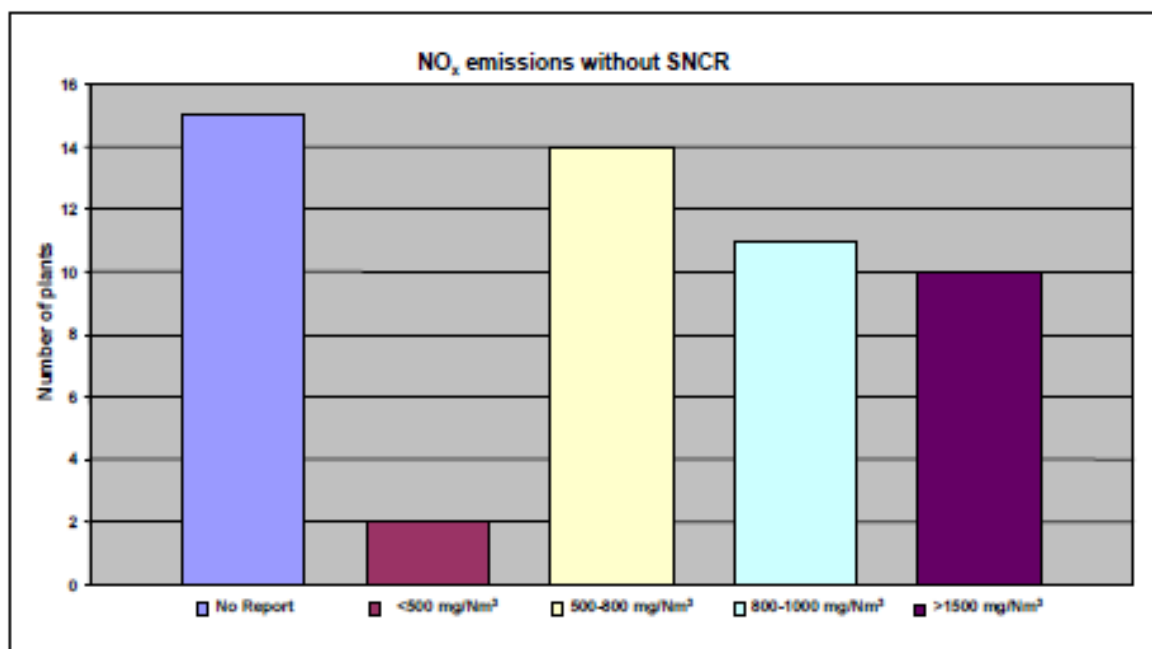


Figure 1.30 : Plages des émissions de NO_x obtenues par plusieurs cimenteries sans utiliser la SNCR
[85, CEMBUREAU, 2006]

1.3.4.3 Dioxyde de soufre

Les émissions de SO_2 des cimenteries dépendent de l'apport total de composés soufrés et du type de procédé utilisé ; elles sont principalement déterminées par la quantité de soufre volatil présent dans les matières premières et éventuellement par les combustibles. La production et les émissions potentielles de SO_x dépendent également de la circulation du soufre à l'intérieur du four. Dans le four, le soufre provient de différentes sources, comme le SO_2 des gaz résiduaux, le CaSO_4 et d'autres composés combinés dans le clinker et les poussières. Cependant, la plus grande partie du soufre est absorbée par le clinker ou bien rejetée du système par le procédé.

En fonction de leurs dépôts respectifs, les matières premières peuvent contenir du soufre sous forme de sulfate ou de sulfure. Les sulfates sont des composés stables qui ne se décomposent que partiellement aux hautes températures le plus fréquemment rencontrées dans la zone de clinkérisation des fours rotatifs, lesquelles peuvent être augmentées par une atmosphère réductrice localisée et par la combustion de combustibles et de déchets. Par conséquent, le soufre présent sous forme de sulfate est plus ou moins complètement rejeté par le système avec le clinker quand la qualité du clinker le requiert. Les sulfures, à l'inverse, s'oxydent dans le préchauffeur et sont partiellement rejetés sous forme de dioxyde de soufre.

Le soufre introduit dans le four avec les combustibles s'oxyde pour former du SO_2 dont il ne provoque pas d'émissions importantes du fait de l'atmosphère très alcaline de la zone de clinkérisation, de la zone de calcination et de l'étage inférieur du préchauffeur. Ce soufre entre dans la zone de décarbonatation du four avec de faibles concentrations en SO_2 provenant de la décomposition partielle du sulfate dans la zone de clinkérisation. Dans la zone de décarbonatation, le SO_2 réagit entre autres avec les éléments alcalins et les sulfates alcalins provenant des matières premières. Au contact avec le cru partiellement décarbonaté, le surplus de SO_2 réagit d'abord avec le CaSO_3 puis avec le CaSO_4 . Ces sulfates entrent à nouveau dans le four rotatif. C'est ainsi que se créent des cycles du soufre qui s'équilibrent avec le rejet du soufre à travers le clinker (Figure 1.31).

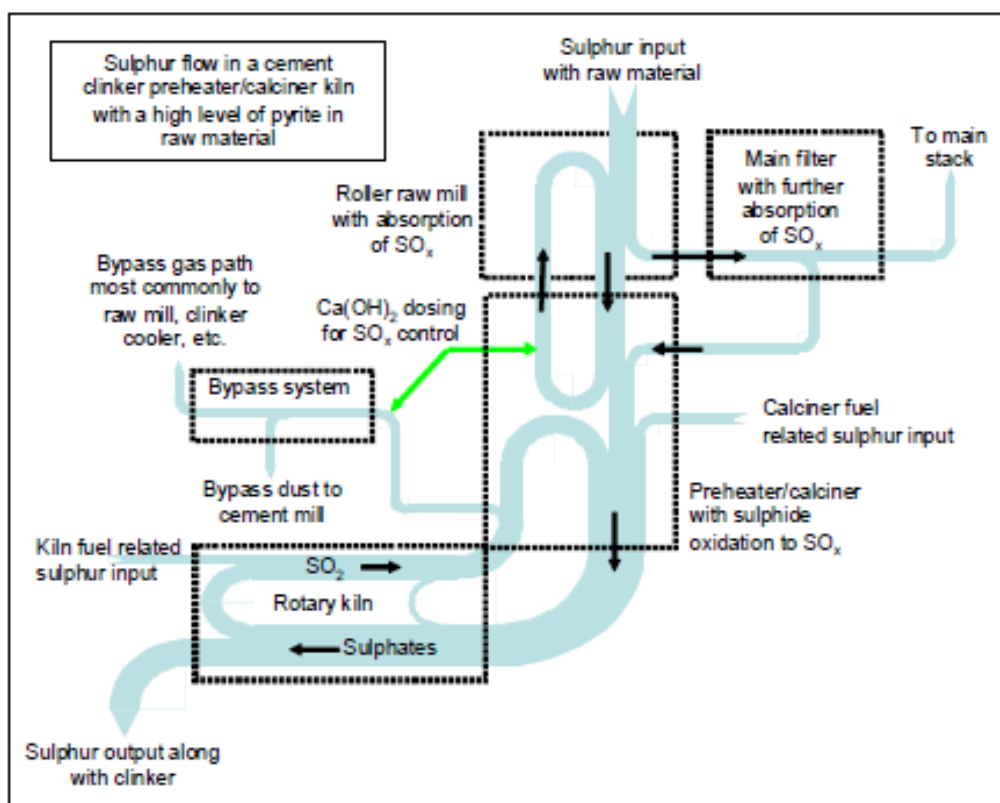


Figure 1.31 : Schéma des flux de soufre dans un four de cimenterie avec préchauffeur/précalcinateur [97, CEMBUREAU, 2007]

La zone de décarbonatation d'un four rotatif apporte les conditions idéales pour capturer le SO₂ des gaz qui s'échappent du four. Cependant, lorsque les conditions de conduite du four, par exemple la concentration en oxygène à l'intérieur du four rotatif, n'ont pas été optimisées pour capturer le SO₂, des émissions peuvent se produire. De surcroît, divers facteurs peuvent influencer l'efficacité de la réaction, comme la température, la teneur en humidité, le temps de séjour, la concentration d'oxydes en phase gazeuse, la disponibilité d'une surface solide, etc. [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007].

Il faut s'attendre avec des matières premières contenant du soufre organique à des émissions de SO₂ élevées, notamment lorsque du soufre présent dans la matière première se trouve sous une forme facilement oxydable, par exemple sous forme de pyrite ou de marcassite. Contrairement aux composants sulfatés des matières premières, ces composés facilement oxydables peuvent être transformés en SO₂ dès les étages cycloniques supérieurs.

Dans ces conditions, les émissions de SO₂ liées aux matières premières peuvent atteindre 1,2 g/Nm³, voire plus dans certains cas si aucune mesure/technique secondaire de lutte contre les émissions n'est prévue.

Cependant, quand les matières premières ne contiennent que peu ou pas de soufre volatil, les émissions de SO₂ des fours ne posent que peu ou pas de problèmes et la concentration en SO₂ des gaz résiduels de certains fours est inférieure à 10 mg/m³ sans utilisation de techniques de réduction ; elle augmente avec la teneur en soufre volatil des matières premières utilisées.

L'utilisation de mesures/techniques de lutte contre les émissions secondaires, comme l'utilisation de chaux hydratée, permet de réduire considérablement les émissions de SO₂. La Figure 1.32 montre les valeurs des émissions de SO₂ mesurées dans le gaz épuré de cimenteries implantées dans l'UE des 25 [97, CEMBUREAU, 2007].

Le SO₂ est le principal composé soufré des émissions (99 %) bien qu'une certaine quantité de SO₃ se forme dans l'installation et qu'en milieu réducteur, du H₂S puisse apparaître. Le soufre présent dans les matières premières sous forme de sulfures et de soufre organique lié se vaporisera et 30 % de ces gaz ou plus peuvent s'échapper du premier étage d'un préchauffeur.

Par contraste avec la zone de décarbonatation, 40 à 85 % du SO₂ formé est capturé à nouveau par le préchauffeur. À part la teneur en vapeur d'eau des gaz qui s'échappent du four, les principaux paramètres qui influencent la capture du SO₂ par le CaCO₃ dans le préchauffeur à cyclones sont la teneur en poussières du gaz brut et tout particulièrement la concentration en oxygène du gaz brut à l'étage le plus haut du cyclone. Dans les conditions normales, l'excès d'oxygène (l'atmosphère du four contient en permanence 1 à 3 % d'O₂ ce qui garantit la qualité finale du ciment) oxydera tous les composés soufrés réduits et les transformera en SO₂. Dans les fours longs, le contact entre le SO₂ et les matières alcalines est de moins bonne qualité et le soufre présent dans les combustibles, comme les déchets combustibles, peut être à l'origine d'émissions non négligeables de SO₂.

À environ 10 %, la capture du SO₂ dans la tour de conditionnement du gaz/le refroidisseur-évaporateur est relativement faible. Dans l'unité de broyage-séchage, à l'inverse, la désintégration du matériau ne cesse de découvrir de nouvelles surfaces très actives des particules qui peuvent capturer le SO₂. Pendant le séchage, l'atmosphère gazeuse est toujours enrichie de vapeur d'eau qui améliore l'absorption. L'expérience, dans des usines fonctionnant en mode compound, a montré que le broyeur à cru pouvait absorber entre 20 et 70 % du SO₂. Parmi les facteurs qui influencent la capture du SO₂ on peut citer l'humidité des matières premières, la température du broyeur, le temps de séjour dans le broyeur et la granulométrie du cru. Il est donc très important d'optimiser cette opération, car le broyeur joue un rôle dans la réduction des émissions de SO₂. [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007].

Bien que la majeure partie du soufre reste dans le clinker sous forme de sulfate, les émissions de SO_2 des matières premières à forte teneur en soufre volatil peuvent être importantes et être considérées comme une pollution majeure.

Ecart par rapport aux conditions de conduite ordinaires

Certains événements s'écartant des conditions de conduite ordinaires entraînent une augmentation des émissions de SO_2 , par exemple la combustion dans une atmosphère réductrice limite l'efficacité d'incorporation du soufre :

- la combustion est incomplète dans le précalcinateur ou les déchets combustibles lourds ne brûlent pas correctement dans la partie arrière du four ;
- une zone de cuisson excessivement chaude qui peut se produire dans des fours brûlant une combinaison de combustibles ayant une très mauvaise aptitude à la cuisson ;
- surplus de soufre apporté par les éléments alcalins dans la charge du four ;
- niveaux extrêmes de recirculation du soufre entre le four et les étages du préchauffeur.

En 2004, des échantillons de données relatives aux émissions de SO_2 ont été collectés auprès de différentes cimenteries implantées dans plusieurs pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Des émissions mesurées en continu ont été rapportées sous forme de moyenne annuelle des moyennes sur 24 heures. Les valeurs mesurées sont pour 1 m^3 de gaz sec dans des conditions standard. Les valeurs des émissions SO_2 mesurées dans le gaz épuré ont été collectées auprès de 253 fours rotatifs. 11 mesures étaient au-dessus de la plage. Parmi celles-ci, sept présentaient un taux de substitution nul, trois un taux compris entre 0 et 10 et une était au-dessus de 40 comme indiqué dans la Figure 1.32 [97, CEMBUREAU, 2007]. Des plages de concentration dans le gaz brut de $1\,400$ à $1\,700 \text{ mg/Nm}^3$, avec des pics pouvant atteindre les $3\,000 \text{ mg/Nm}^3$, ont toutefois été trouvées dans une cimenterie suisse [86, EURITS, 2006].

Une grande partie du SO_2 est absorbée et emprisonnée par le clinker et les poussières de four à ciment (CKD) comme le montre la Figure 1.32. L'utilisation de déchets combustibles n'a aucune influence sur les émissions totales de SO_2 . Dans les fours rotatifs longs, le contact entre les SO_x et les matières alcalines est moins efficace et le soufre présent dans les combustibles peut être à l'origine d'émissions de SO_x .

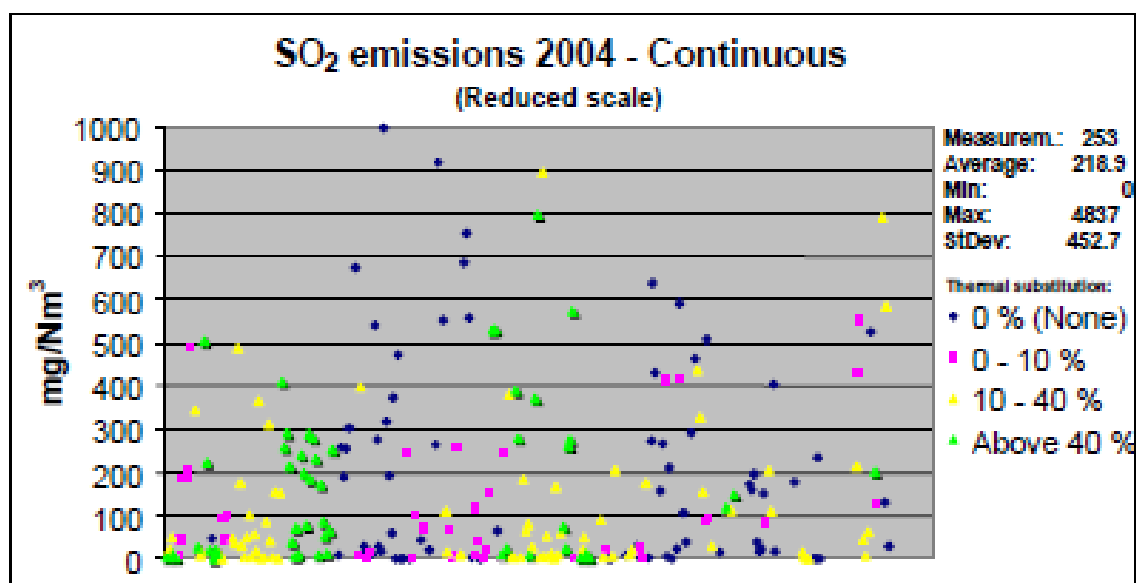


Figure 1.32 : Valeurs des émissions de SO_2 mesurées dans le gaz épuré de cimenteries des pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [97, CEMBUREAU, 2007]

La catégorisation et la répartition de ces émissions de SO₂ apparaissent dans la Figure 1.33 [97, CEMBUREAU, 2007].

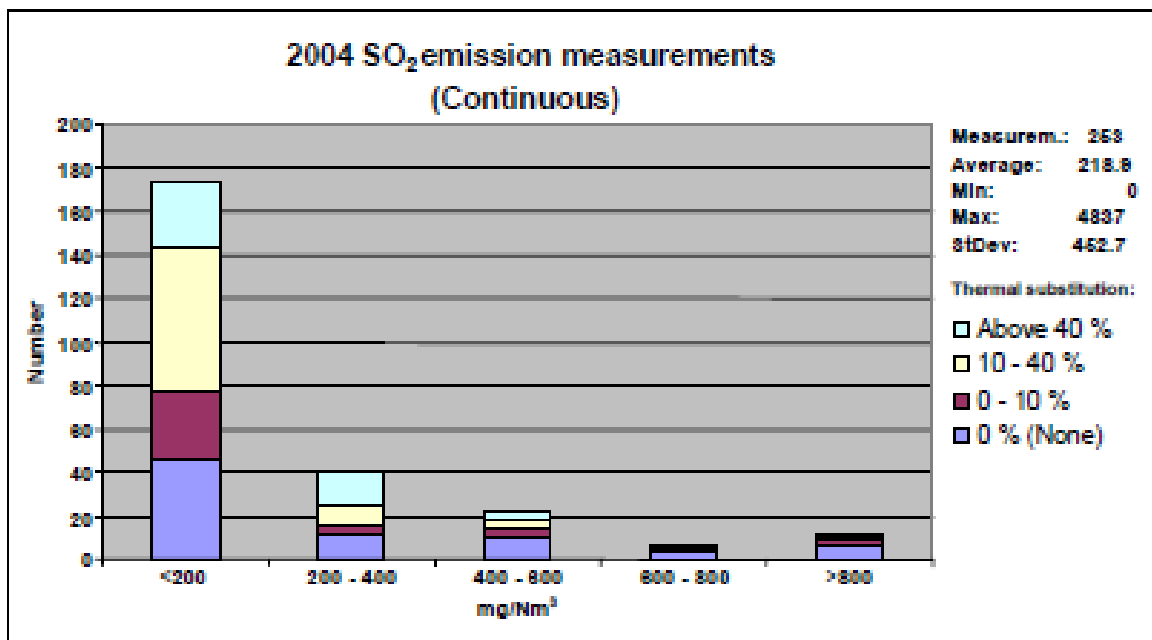


Figure 1.33 : Répartition des mesures des niveaux de SO₂ classées par catégorie selon le taux de substitution thermique
 [97, CEMBUREAU, 2007]

Dans la fabrication du ciment blanc, différentes conditions ainsi que leur combinaison peuvent considérablement réduire dans des cas spécifiques la rétention par le clinker du soufre présent dans les combustibles et par conséquent être à l'origine d'émissions de SO₂ plus importantes. Ces conditions sont les suivantes :

- mauvaise aptitude à la cuisson du cru,
- faible teneur en éléments alcalins du cru en raison de la grande pureté des matières premières,
- conditions du four, comme une atmosphère généralement réductrice,
- configuration du four : les fours Lepol sont très répandus et dans les fours à préchauffeur modernes, le nombre de cyclones peut être limité par la composition chimique de la matière première (équilibre éléments alcalins/soufre [120, Espagne, 2007]).

1.3.4.4 Oxydes de carbone (CO₂, CO)

1.3.4.4.1 Dioxyde de carbone (CO₂)

Selon les estimations, la fabrication d'une tonne de clinker gris entraîne des émissions de 900 à 1 000 kg de CO₂, pour un besoin thermique spécifique de 3 500 à 5 000 MJ/tonne de clinker, ce qui dépend aussi du type de combustible utilisé. Comme le ciment est broyé avec des additions minérales, les émissions de CO₂ par tonne de ciment fabriquée sont réduites (comparer avec la Figure 1.19). Environ 62 % des émissions de CO₂ sont issues de la décarbonatation et les 38 % restant issus de la combustion du combustible. Les émissions de CO₂ produites par la combustion du carbone du combustible sont directement proportionnelles au besoin de chaleur spécifique et au rapport entre la teneur en carbone du combustible et son pouvoir calorifique. Les émissions de CO₂ produit par la combustion ont progressivement été réduites ; cette diminution qui a atteint 30 % au cours des 25 dernières années est principalement due à l'adoption de procédés de cuisson utilisant l'énergie plus efficacement.

La Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la Directive 2008/01/CE du Conseil fournit des informations générales sur les émissions de CO₂ et le système d'échange de quotas d'émissions tout comme la décision de la Commission européenne du 29 janvier 2004 (2004/156/CE) concernant l'adoption de lignes directrices pour la surveillance et la déclaration des émissions de gaz à effet de serre, conformément à la directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil [99, Commission européenne, 2003]. En outre, la décision de la Commission européenne du 29 janvier 2009 fournit des informations sur la surveillance et la déclaration des émissions des gaz à effet de serre conformément à la directive relative au système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre (2004/156/EC) [122, Commission européenne, 2004].

1.3.4.4.2 Monoxyde de carbone (CO)

Ce sont les petites quantités de composants organiques apportés par les matières premières naturelles (restes d'organismes et de plantes incorporés dans la roche au fil de l'histoire géologique) qui sont généralement à l'origine des émissions de CO et du carbone organiquement lié pendant la cuisson du clinker. Pendant le préchauffage du cru introduit dans le four, ces composants subissent une transformation et s'oxydent pour former du CO et du CO₂. De petites quantités de gaz contenant des traces organiques, comme le carbone organique total, se forment également lors de ce procédé. Dans la cuisson du clinker, la teneur en CO et en gaz contenant des traces organiques dans le gaz épuré ne permet donc pas de tirer des conclusions sur les conditions de combustion.

Cependant, d'autres émissions de CO peuvent également provenir d'une mauvaise combustion et de conditions insatisfaisantes dans la zone de cuisson secondaire. Il convient d'autre part de signaler qu'une telle augmentation du taux d'émission de CO coïncide avec une diminution des émissions de NO_x. Cependant, les conditions réductrices peuvent avoir des effets positifs sur les émissions de SO_x.

Dans les installations de conversion de l'énergie, comme les centrales électriques, les concentrations en CO et en carbone organiquement lié dans les gaz résiduels sont un bon indicateur du taux de combustion totale des combustibles. A l'inverse, la cuisson du clinker est un procédé de conversion de matière qui doit toujours être opéré avec un excès d'air pour des raisons de qualité du produit final. Ceci conjugué à des temps de séjour prolongés à haute température mène à la combustion totale du combustible [76, Allemagne, 2006].

Les matières premières mises en œuvre par le procédé apportent de 1,5 à 6 g de carbone par kg de clinker, selon la nature du terrain d'où elles proviennent. Les résultats d'essais effectués sur des crus de différentes provenances ont montré que 85 à 95 % des composés organiques des matières premières étaient convertis en CO₂ dans un milieu contenant 3 % d'oxygène, mais que dans le même temps, 5 à 15 % étaient transformés en CO. Dans ces conditions, la proportion émise sous forme de composés organiques volatils (COV) est bien inférieure à 1 %. Comme le montre la Figure 1.34, la concentration en CO peut atteindre 1 000 mg/Nm³ et parfois même dépasser 2 000 mg/Nm³ ou encore 5 000 mg/Nm³ dans certains cas. Cependant, la plupart des exemples de ces valeurs de concentration d'émission de CO mesurées en continu sur 29 fours rotatifs allemands donnent une moyenne annuelle qui se situe entre 200 et 2 200 mg/Nm³ (limite de détection de CO 1,8 – 2,5 mg/Nm³) [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [76, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007]. La qualité de la conception de la trémie, du convoyeur et du distributeur est déterminante pour obtenir une alimentation en combustible solide régulière, avec des pointes minimales. Sinon, on peut avoir une combustion non stœchiométrique avec de très courtes pointes d'émission de CO supérieures à 0,5 % qui vont créer un nouveau problème, à savoir que tout traitement des gaz par filtre électrostatique devra être interrompu automatiquement pour éviter une explosion.

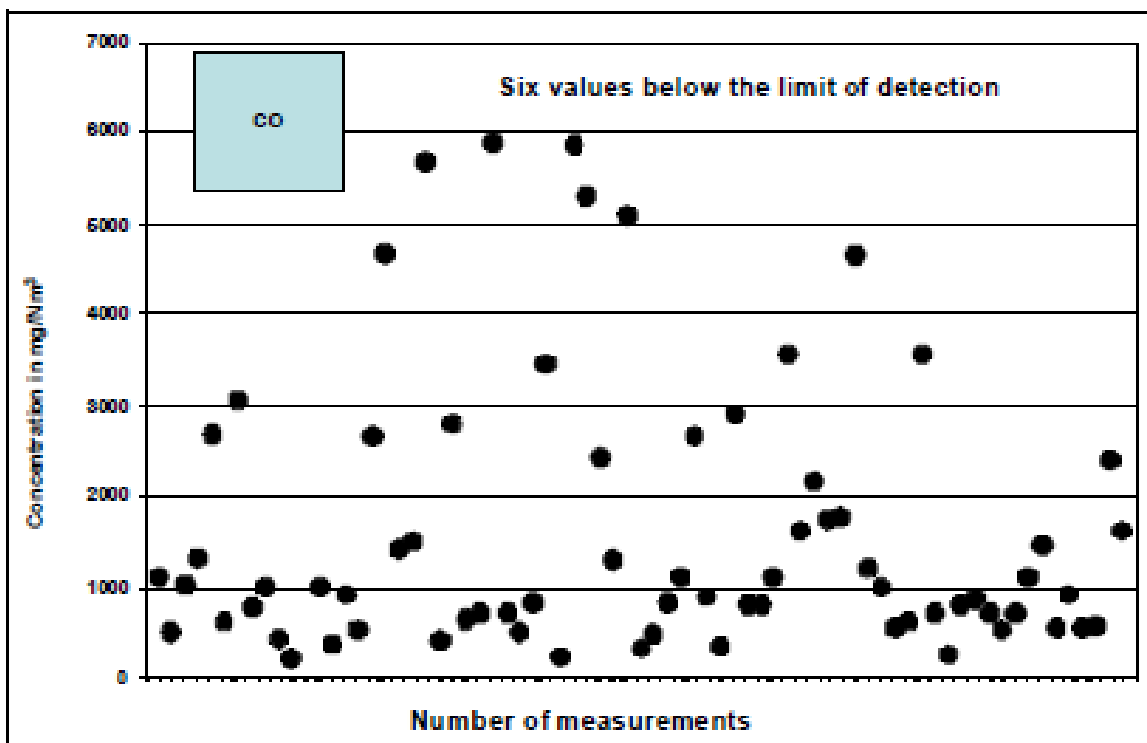


Figure 1.34 : Valeurs de concentration des émissions de CO mesurées dans le gaz épuré de 29 fours rotatifs allemands en 2004
[76, Allemagne, 2006]

1.3.4.5 Composés organiques totaux (COT)

La présence dans les réactions thermiques (combustion) de composés organiques volatils et de monoxyde de carbone est associée à une combustion incomplète. Dans les fours à ciment, les émissions seront faibles en régime normal stable en raison du type de four utilisé, du séjour prolongé des gaz dans le four, de la température élevée, de la nature de la flamme (2 000 °C) et de l'excès d'oxygène. C'est dans ces conditions que les composés organiques se décomposent et sont détruits avec un taux d'efficacité élevé (>99,999 %) [86, EURITS, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007]. Les concentrations peuvent augmenter au démarrage ou dans des conditions anormales. Ceci peut se produire plus ou moins souvent, de une ou deux fois par semaine à une fois tous les deux ou trois mois.

Des émissions de composés organiques volatils (COV) peuvent se produire aux premiers stades du procédé (préchauffeur, précalcinateur) quand la matière organique contenue dans le cru se volatilise au cours du chauffage de la charge. Les matières organiques se dégagent entre 400 et 600 °C. La teneur type en composés organiques volatils des gaz résiduels des fours à ciment est comprise entre 1 et 80 mg/Nm³, mesurés sous forme de COT comme illustré dans la Figure 1.5. Cependant, les émissions peuvent dans de rares cas atteindre 120 mg/Nm³ du fait des caractéristiques des matières premières. En 2004, des échantillons de données relatives aux émissions de COT ont été collectés auprès de différentes cimenteries implantées dans plusieurs pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Comme le montrent les Figures 1.35 et 1.36, les valeurs de COT mesurées en continu dans le gaz épuré ont été collectées sur 120 fours rotatifs et ces mesures ont également été classées en fonction du taux de substitution thermique et des niveaux de COT. Les émissions mesurées en continu ont été rapportées sous forme de moyenne annuelle des moyennes sur 24 heures. Les valeurs mesurées sont pour 1 Nm³ de gaz sec dans des conditions standard [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [97, CEMBUREAU, 2007]. Comme le montre la Figure 1.37, les mesures en continu de 27 fours rotatifs allemands fournissent des exemples de valeurs de concentration d'émission de carbone atteignant les 75 mg/Nm³ (moyenne annuelle). La majorité des mesures se situent sous les 30 mg/Nm³ (moyenne annuelle) (limite de détection 1,5 – 2,1 mg/Nm³) [76, Allemagne, 2006].

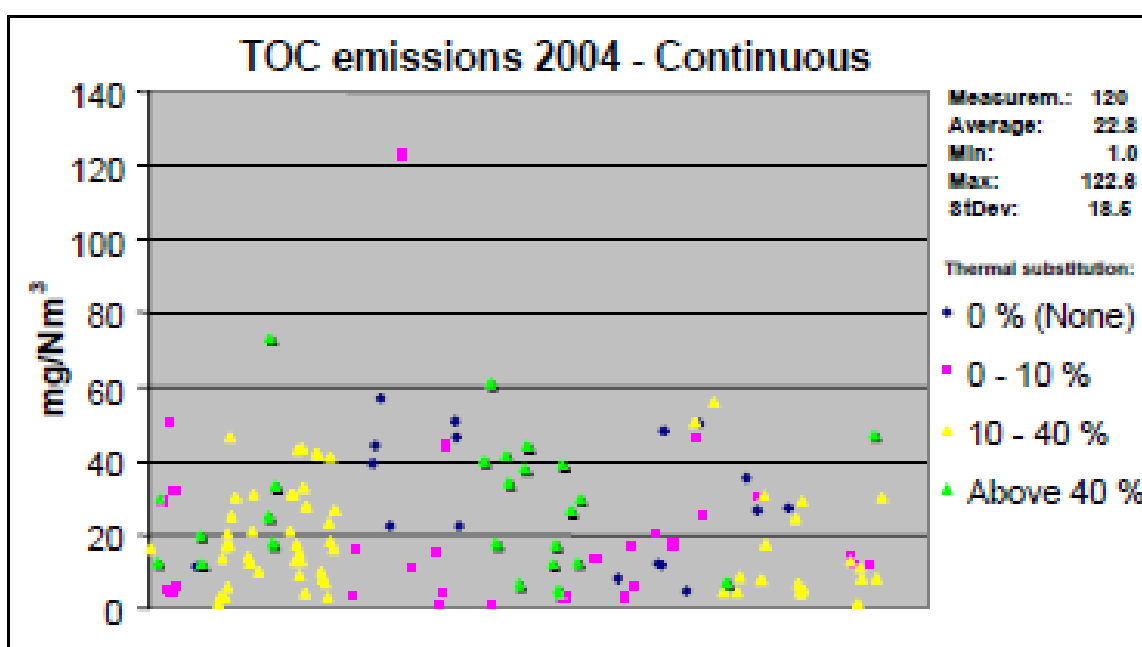


Figure 1.35 : Valeurs des émissions de COT mesurées en continu dans le gaz épuré de fours à ciment dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [97, CEMBUREAU, 2007]

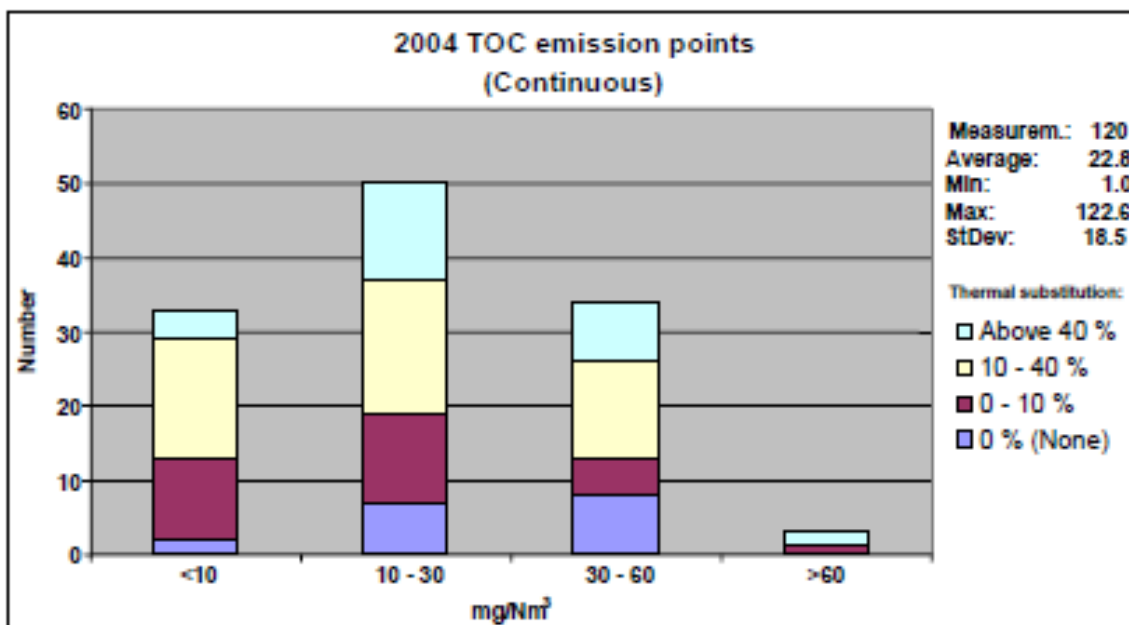


Figure 1.36 : Répartition des mesures en continu des niveaux de COT par catégorie selon le taux de substitution thermique
[97, CEMBUREAU, 2007]

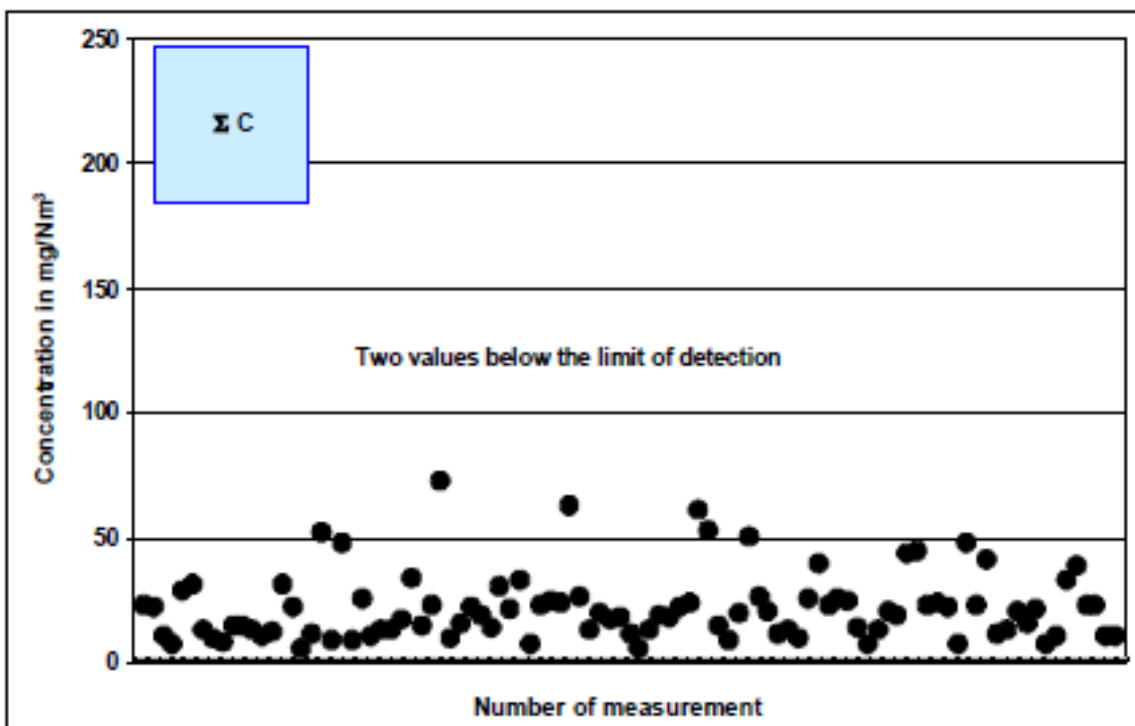


Figure 1.37 : Valeurs de concentration des émissions de carbone organique total mesurées dans le gaz épuré de 27 fours rotatifs allemands en 2004.
[76, Allemagne, 2006]

1.3.4.6 Polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzofuranes (PCDF)

Les PCDD/F peuvent être le fruit d'une combinaison de mécanismes de formation déterminés par la conception du four et du procédé, par les conditions de combustion, par les caractéristiques du cru ainsi que par le type et le fonctionnement des équipements de réduction des émissions. En outre, en présence de matière organique pendant une réaction thermique (combustion), l'introduction de chlore peut provoquer la formation de PCDD/F. Ces substances peuvent se former dans le préchauffeur ou après, et dans les équipements de réduction de la pollution de l'air si la quantité de chlore et de précurseurs des hydrocarbures provenant des matières premières est suffisante (cf. également la Section 1.2.4). Cependant, la formation des PCDD/F et leurs émissions ultérieures requièrent la présence simultanée de cinq facteurs :

- des hydrocarbures,
- des chlorures,
- un catalyseur :
 - certains rapports suggèrent que le Cu^{2+} (et le Fe^{2+}) ont un effet catalytique.
- une plage de températures appropriée :
 - entre 200 et 450 °C, avec un maximum à 300 – 325 °C
- un temps de séjour prolongé dans la plage de températures appropriée.

De l'oxygène moléculaire doit en outre être présent dans le flux de gaz. La vitesse de formation augmente avec la concentration en oxygène avec un ordre de réaction de 0,5.

Comme indiqué ci-dessus, on sait que la reformation des PCDD/F se produit par la synthèse de novo dans la plage de températures de refroidissement allant de 450 à 200 °C. Il est donc important que les gaz sortant du four soient refroidis rapidement quand leur température se situe dans cette plage. C'est ce qui se produit en pratique dans les installations de préchauffage quand les matières premières entrantes sont préchauffées par les gaz du four. Les concentrations en PCDD/F ne devraient pas être élevées dans le préchauffeur en raison de la température supérieure à laquelle les PCDD/F sont détruits. Les PCDD/F se décomposent en effet rapidement à des températures situées autour de 925 °C. De plus, le procédé dynamique de transport des matières vers des zones plus chaudes alors que le gaz est transporté vers des zones plus froides participe à leur destruction. Les PCDD et PCDF absorbés par le cru introduit dans le four sont transportés vers des zones de plus hautes températures (400 – 600 °C) où ils sont détruits ou bien transformés par dégradation en homologues plus légers.

Ils sont rejetés dans la phase gazeuse et, dans les zones plus froides (200 – 300 °C), ils se subliment à nouveau dans le cru introduit dans le four. En outre, du fait du temps de séjour prolongé dans le four et des hautes températures qui y règnent, les émissions de PCDD/F sont généralement faibles en régime de fonctionnement stable du four. Des études et des mesures détaillées permettent d'affirmer que les émissions de PCDD/F de l'industrie du ciment sont à ce jour faibles, même lorsque des déchets non dangereux et dangereux sont utilisés comme combustible. Les données mesurées ont été recueillies sur des fours tant en voie humide qu'en voie sèche fonctionnant à des régimes différents et utilisant une grande variété de déchets non dangereux et dangereux introduits aussi bien au niveau du brûleur principal que de l'entrée du four (préchauffeur/précalcinateur). Ces études ont conclu qu'en Europe la production de ciment est rarement une source importante d'émissions de PCDD/F pour les raisons suivantes :

- la plupart des fours à ciment peuvent atteindre un niveau d'émission de 0,1 ng I-TEQ/Nm³ si des mesures/techniques primaires sont appliquées (cf. Section 1.4.6) ;
- l'introduction de déchets en tant que combustible et matières premières dans le brûleur principal, à l'entrée du four ou dans le précalcinateur ne semble pas influencer ou modifier les émissions de polluants organiques persistants [88, SINTEF, 2006].

En 2004, des échantillons de données relatives aux émissions de PCDD/F ont été collectés auprès de différentes cimenteries implantées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Les valeurs des émissions de PCDD/F mesurées dans le gaz épuré ont été collectées de manière ponctuelle comme le montrent les Figures 1.38 et 1.39. Les valeurs mesurées sont pour 1 m³ de gaz sec dans des conditions standard [97, CEMBUREAU, 2007]. Comme le montre la Figure 1.38, d'après les rapports, la plupart des fours à ciment européens peuvent respecter la concentration de 0,1 ng TEQ/Nm³, ce qui représente la valeur limite fixée par la législation européenne pour les usines d'incinération des déchets dangereux (directive du Conseil 2000/76/CE). Les mesures allemandes des valeurs des concentrations en PCDD/F mesurées dans le gaz épuré de 39 fours rotatifs (fours avec préchauffeur à suspension et four Lepol) indiquent que les concentrations d'émissions se situent généralement en dessous de 0,1 ng I-TEQ/Nm³ alors que la concentration moyenne est inférieure à 0,02 ng I-TEQ/Nm³, comme illustré dans la Figure 1.40. Aucune émission de PCDD/F n'a été détectée dans 26 cas. En Espagne, des mesures des émissions de PCDD/F ont été réalisées entre 2000 et 2003, soit 89 mesures sur 41 fours qui représentaient 69,5 % du champ. Ces études ont été effectuées pour différents combustibles utilisés dans le procédé de chauffe du four. Pour les fours utilisant des déchets combustibles, par exemple des combustibles dérivés de déchets (RDF), les facteurs des émissions de PCDD/F s'échelonnent de 0,83 à 133 ng I-TEQ/t de clinker et sont assez comparables aux résultats obtenus avec une alimentation conventionnelle où le facteur des émissions se situe entre 0,67 et 246 ng I-TEQ/t de clinker [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [88, SINTEF, 2006], [91, CEMBUREAU, 2006], [150, Fabrellas/Larrazabal/Martinez/Sanz/Ruiz/Abad/Rivera, 2004].

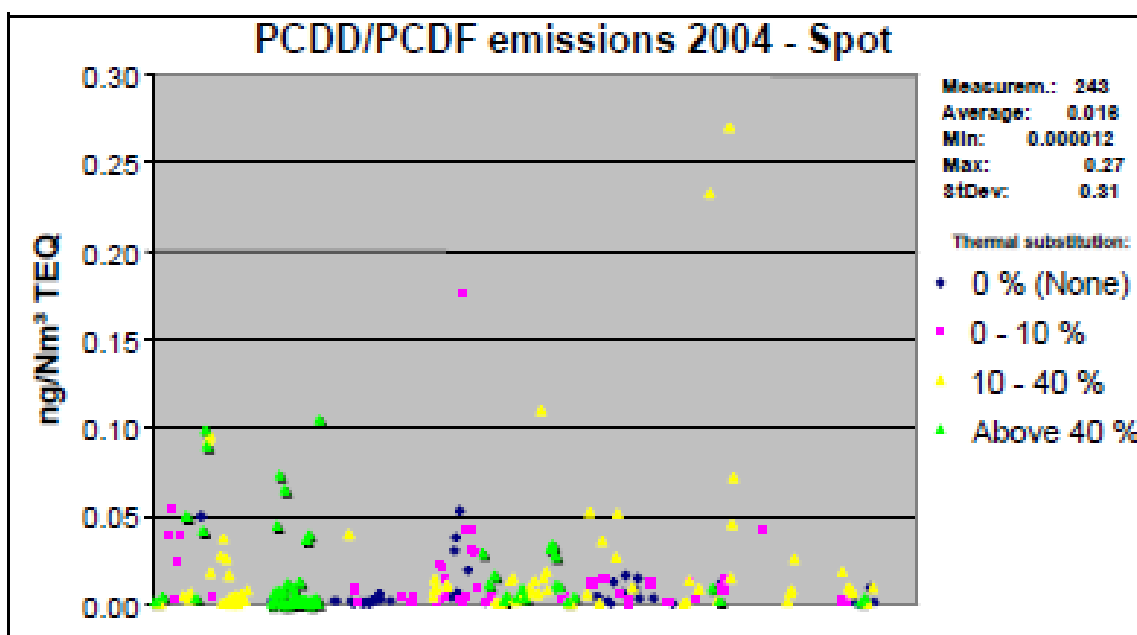


Figure 1.38 : Emissions de PCDD/F dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ en 2004, par catégorie selon le taux de substitution thermique [97, CEMBUREAU, 2007]

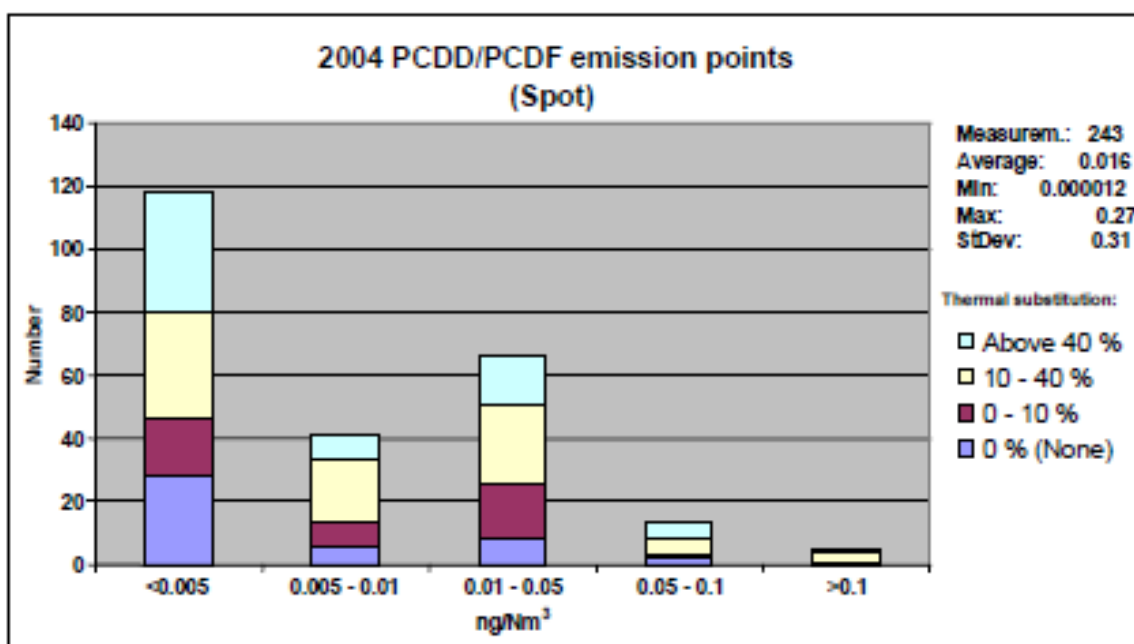


Figure 1.39 : Répartition des mesures ponctuelles des niveaux de PCDD/F par catégorie selon le taux de substitution thermique des fours à ciment dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [97, CEMBUREAU, 2007]

La Figure 1.40 montre des exemples d'émissions de PCDD/F mesurées sur 39 fours rotatifs allemands. Ces informations proviennent de mesures individuelles réalisées à date fixe trois fois par an. Aucune émission de PCDD/F n'a été détectée dans 26 cas. Il convient de noter qu'aucune limite de détection n'a été déduite/soustraite de la norme. Pour ces mesures/prélèvements de PCDD/F, la limite de détection était de 0,0051 ng I-TEQ/Nm³. L'écart interlaboratoire de la méthode (comparaison entre différents laboratoires) doit être pris en compte afin d'évaluer les résultats des mesures [184, norme CEN EN-1948, 2007]. I-TEQ est l'abréviation de l'équivalent toxique international [76, Allemagne, 2006].

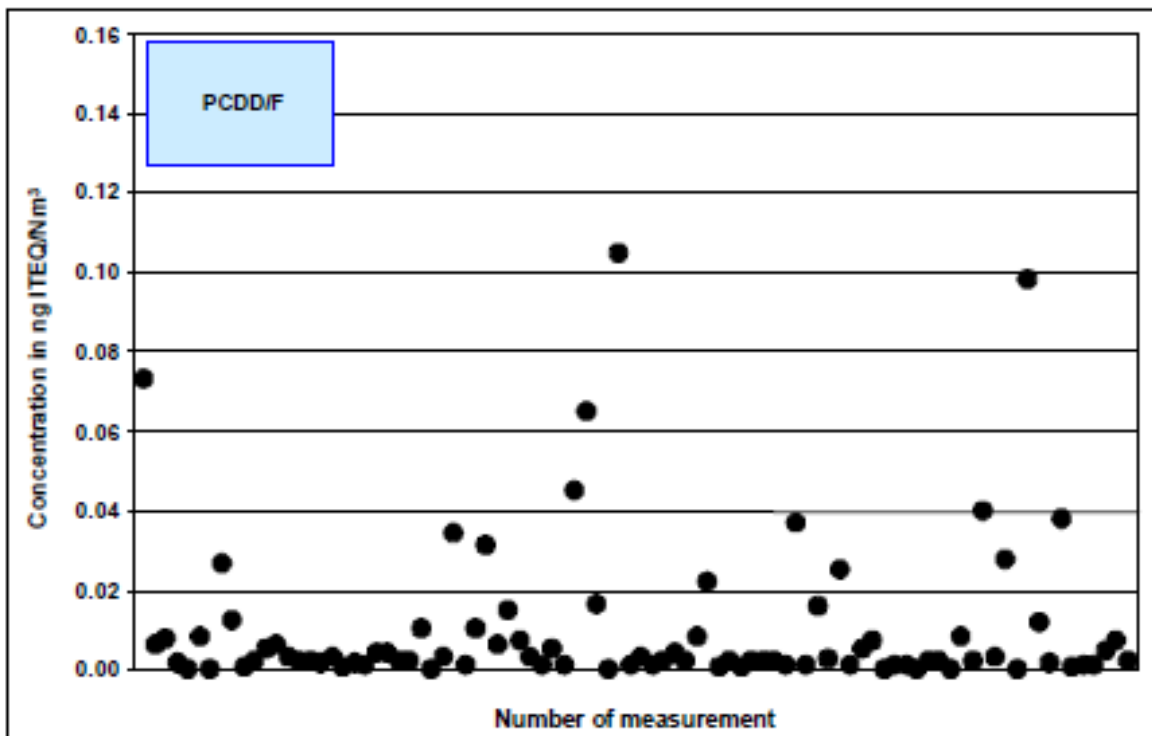


Figure 1.40 : Émissions de PCDD/F mesurées dans le gaz épuré de 39 fours rotatifs allemands en 2004
[76, Allemagne, 2006]

1.3.4.7 Métaux et leurs composés

Les matières premières et les combustibles contiendront toujours des métaux, mais leur concentration est très variable d'un endroit à un autre et leur potentiel d'émissions dans l'atmosphère dépend de mécanismes très complexes. De plus, les concentrations en métaux des déchets utilisés comme combustible sont variables selon l'origine des déchets. Les composés métalliques peuvent être classés en quatre catégories, selon la volatilité des métaux et de leurs sels :

1. Les métaux qui sont ou qui ont des composés réfractaires ou non volatils : Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu et Ag :
 - ces métaux sont entièrement absorbés par le clinker et rejetés avec celui-ci ; ils ne circulent donc pas dans le four. Dans le gaz résiduaire, les seules émissions proviennent des poussières et dépendent donc uniquement des matières entrantes et de l'efficacité du dépoussiérage. Leurs émissions sont par conséquent très faibles.
2. Les métaux qui sont ou qui ont des composés semi-volatils : Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K et Na :
 - ces métaux se condensent en sulfates ou en chlorures à des températures comprises entre 700 et 900 °C et une circulation intérieure se produit. Ainsi, les éléments semi-volatils qui s'accumulent dans le système de préchauffage du four sont à nouveau précipités dans le préchauffeur à cyclones et sont presque complètement retenus dans le clinker.
3. Le thallium : métal qui est ou qui possède un composé volatil :
 - dans les fours à échangeur thermique, les composés du thallium (par exemple, TlCl) se condensent entre 450 et 550 °C dans la zone supérieure du préchauffeur où ils peuvent s'accumuler (circulation interne).

4. Le mercure : métal qui est ou qui possède un composé volatil (cf. Section 1.3.4.7.1) :
- la plupart du mercure et des composés du mercure traversent le four et le préchauffeur. Ils ne sont adsorbés que partiellement par la poussière du gaz brut en fonction de la température des effluents gazeux [12, Pays-Bas, 1997], [76, Allemagne, 2006], [91, CEMBUREAU, 2006], [92, Autriche, 2006].

La Figure 1.41 illustre le parcours des métaux dans les fours à ciment avec préchauffeurs en voie sèche.

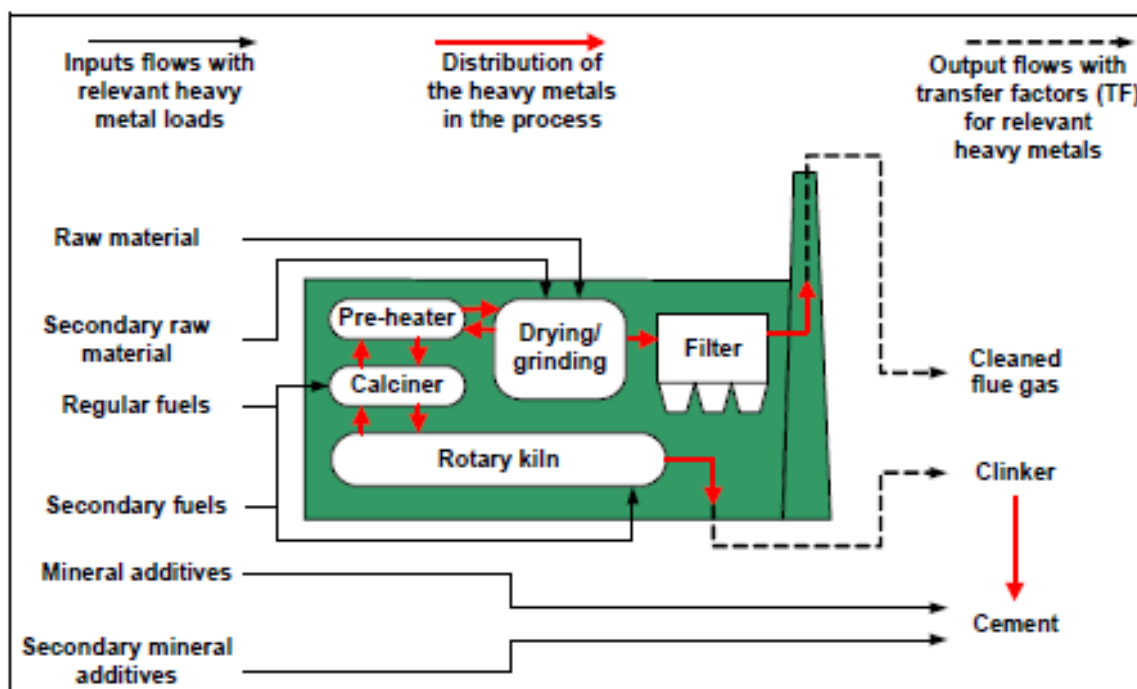


Figure 1.41 : Parcours des métaux dans les fours à ciment équipés de préchauffeurs en voie sèche [89, ERFO, 2005]

Le comportement et le niveau d'émission de chacun de ces métaux pendant la cuisson du clinker dépendent de leur volatilité, de l'alimentation du four, de la concentration en éléments métalliques des matières premières et des combustibles, notamment lorsque des déchets ou des déchets dangereux sont utilisés, du procédé et surtout de l'efficacité de précipitation des systèmes de dépoussiérage sur la cheminée principale.

Les métaux qui entrent dans la cuisson par le biais des matières premières et des combustibles peuvent s'évaporer complètement ou partiellement dans les zones chaudes du préchauffeur ou du four rotatif, ou les deux, selon leur volatilité, réagir avec les composants présents dans la phase gazeuse et se condenser sur le cru dans les parties moins chaudes du four. Les métaux provenant des combustibles entrent d'abord dans les gaz de combustion, mais leur émission est réduite uniquement du fait de la capacité de rétention du four et du préchauffeur. Étant donné que le rapport matière première/masse du combustible pour la production de clinker est d'environ 10:1, les éléments introduits par les matières premières déterminent les émissions [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006] [92, Autriche, 2006].

Les composés métalliques non volatils restent présents pendant toute la cuisson et sont intégrés dans la composition chimique du clinker à la sortie du four (>99,9 %). Les composés métalliques semi-volatils se retrouvent partiellement dans la phase gazeuse aux températures de clinkérisation et se condensent sur les matières premières dans les zones les moins chaudes du four. Ils provoquent l'apparition d'un effet cyclique (cycles internes) qui se limite au four et au préchauffeur ou s'intègre également dans l'unité de séchage-broyage. Si les métaux se condensent en grande partie dans le préchauffeur, ils entreront à nouveau dans le four avec la charge du four. Cela produit un cycle interne du métal (cycle four/préchauffeur).

Cet effet cyclique s'amplifie jusqu'à ce qu'un équilibre entre l'entrée et la sortie du clinker soit atteint et maintenu [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006].

Les composés métalliques volatils se condensent sur les matières premières à des températures moins élevées et peuvent provoquer l'apparition de cycles internes ou externes s'ils ne sont pas évacués avec les gaz résiduels du four. Le thallium, le mercure et leurs composés sont particulièrement très volatils. Ils ne sont pas entièrement capturés par la matrice du clinker. Le thallium et ses composés se condensent dans la zone haute du préchauffeur à cyclones à des températures allant de 450 à 500 °C. Une grande partie du thallium introduit dans le four est donc retenue par le préchauffeur. Par conséquent, un cycle peut se former entre le préchauffeur, le séchage de la matière première et la purification des gaz résiduels (interne et externe). Le niveau d'émission de thallium est déterminé par le niveau de concentration du cycle externe et par l'efficacité du collecteur de poussières. La concentration en thallium mesurée dans les poussières du filtre électrostatique, par exemple, sert à déterminer le niveau de concentration du cycle de thallium [60, VDI 2094 Allemagne, 2003].

En outre, mais dans une moindre mesure, le cadmium, le plomb, le sélénium et leurs composés sont particulièrement facilement volatilisés. Un cycle interne de composés métalliques très volatils apparaît quand ils réagissent avec les matières en cours de calcination ou quand ils se déposent sur ces matières dans les zones froides de la chambre de calcination, dans le préchauffeur ou au niveau du séchage.

Les métaux provoquent l'apparition d'un cycle externe quand les poussières et les composés volatils condensés sont collectés dans les filtres à poussières et recyclés dans le cru [27, Université de Karlsruhe, 1996].

Les poussières résultant de la fabrication du ciment contiennent de faibles quantités de composés métalliques comme l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le plomb (Pb), le thallium (Tl) et le zinc (Zn). La principale source de poussières chargées en métaux est le système de four, incluant les préchauffeurs, les précalcinateurs, les fours rotatifs et les refroidisseurs à clinker. Leur concentration en métaux dépend de la matière à cuire et de la recirculation dans le système de four. En particulier, l'utilisation de charbon et de déchets pour chauffer le four peuvent augmenter l'apport de métaux dans le procédé. Comme les métaux qui entrent dans le système de four n'ont pas tous le même degré de volatilité et du fait des températures élevées, les gaz chauds du système de four contiennent aussi des composés métalliques en phase gazeuse. L'étude du bilan matière montre que le clinker contient peu d'éléments fortement volatils, ce qui veut dire que ces substances s'accumulent dans le système de four [27, Université de Karlsruhe, 1996].

Les émissions de cadmium et de thallium ont été collectées à partir de 262 mesures ponctuelles de Σ (Cd, Tl) dans le gaz épuré de fours rotatifs, comme le montrent les Figures 1.42 et 1.43. En 2004, ces mesures provenaient toutes de cimenteries différentes qui se trouvaient dans plusieurs pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Dans la Figure 1.43, le taux de substitution thermique est représenté par différentes couleurs. Cinq mesures sont au-dessus de la plage. Sur celles-ci, quatre ont un taux de substitution de '0' et une de '0 à 10'. Les émissions sont variables, quel que soit le combustible utilisé. Cela s'explique par le fait que le cadmium et le thallium ne sont pas suffisamment volatils pour s'échapper avec le gaz et qu'ils se concentrent principalement dans la poussière et le clinker. Les émissions dépendent donc davantage de l'efficacité du filtre à poussières que des combustibles [97, CEMBUREAU, 2007].

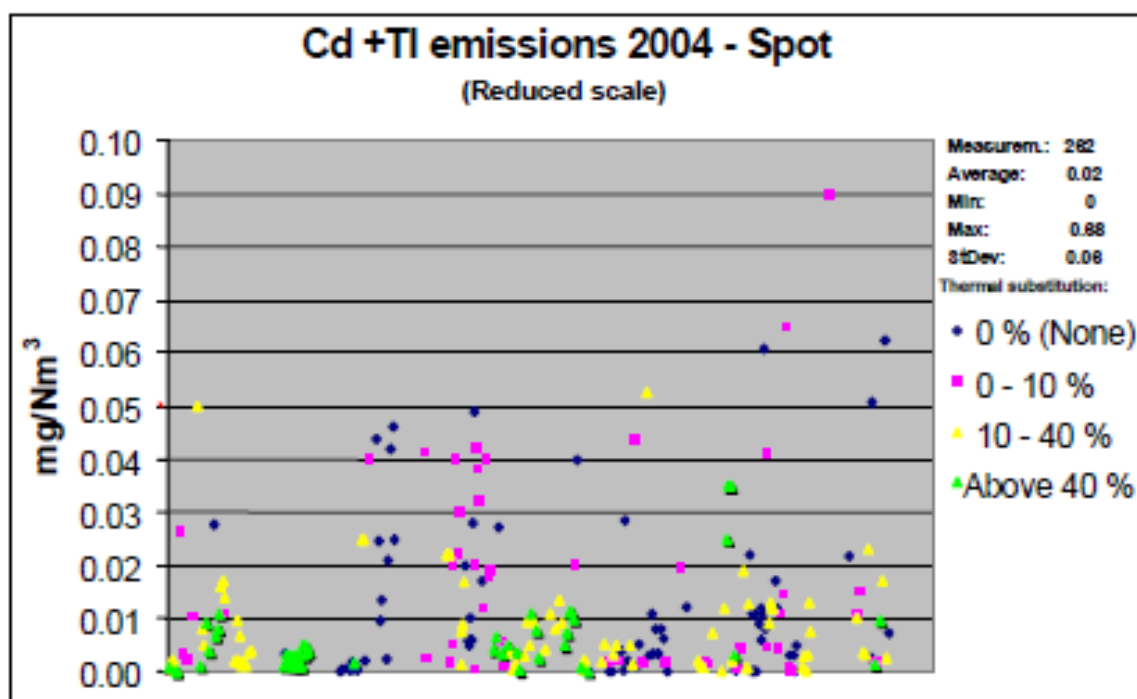


Figure 1.42 : Valeurs des émissions de cadmium et de thallium obtenues lors de 262 mesures ponctuelles de Σ (Cd, Tl) effectuées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [91, CEMBUREAU, 2006]

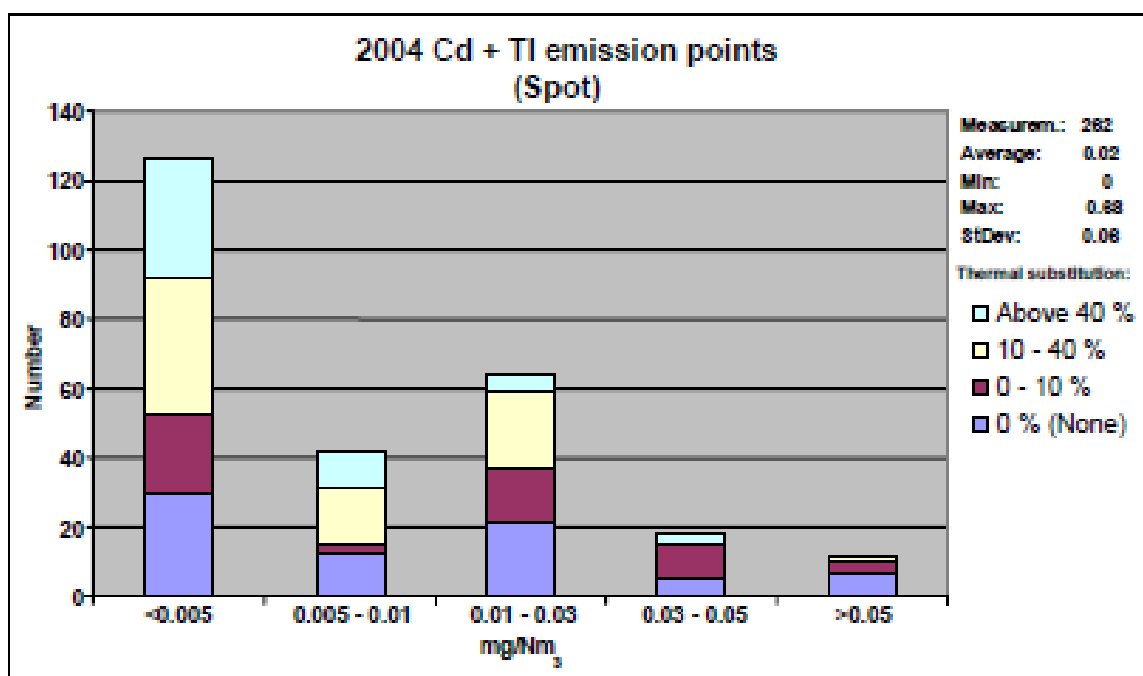


Figure 1.43 : Répartition des mesures par catégorie des niveaux de Σ (Cd, Tl) selon le taux de substitution thermique [91, CEMBUREAU, 2006]

Comme le montrent les Figures 1.44 et 1.45, les émissions de Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V) ont été collectées à partir de 287 mesures ponctuelles dans le gaz épuré de fours rotatifs. En 2004, ces mesures provenaient toutes de cimenteries différentes qui se trouvaient dans plusieurs pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Dans la Figure 1.45, le taux de substitution thermique est représenté par différentes couleurs. Trois mesures sont au-dessus de la plage. Sur celles-ci, une a un taux de substitution de '0', une de '0 à 10' et une de '10 à 40'.

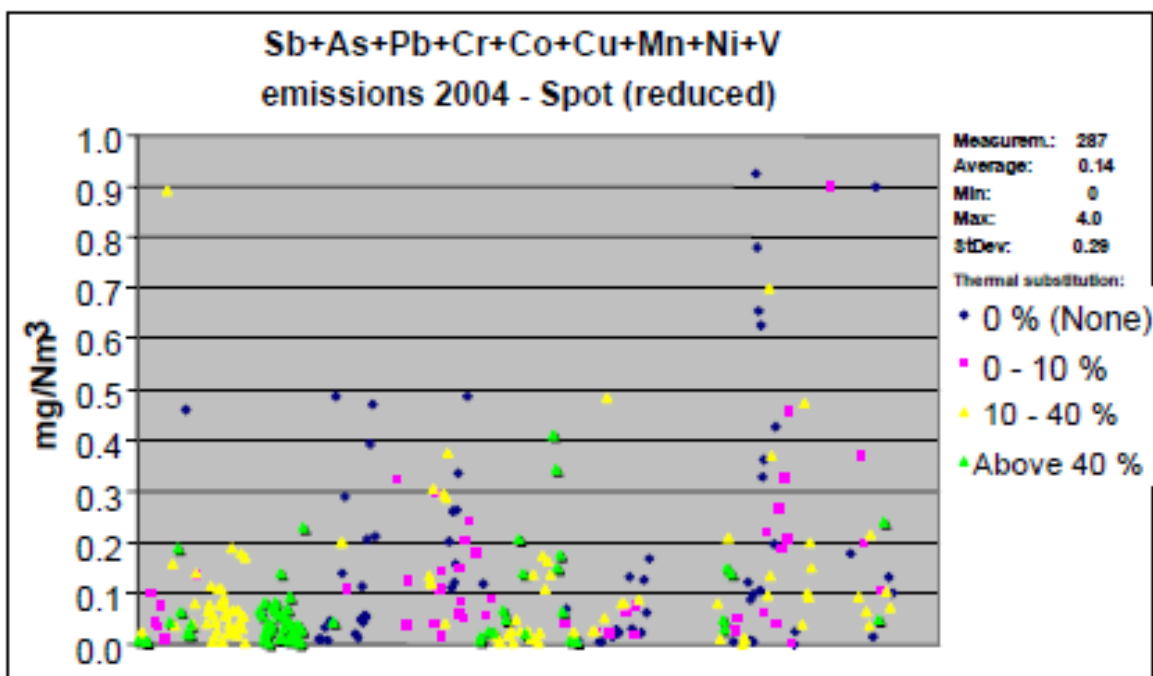


Figure 1.44 : Valeurs des émissions obtenues lors de mesures ponctuelles de Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V) dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
[91, CEMBUREAU, 2006]

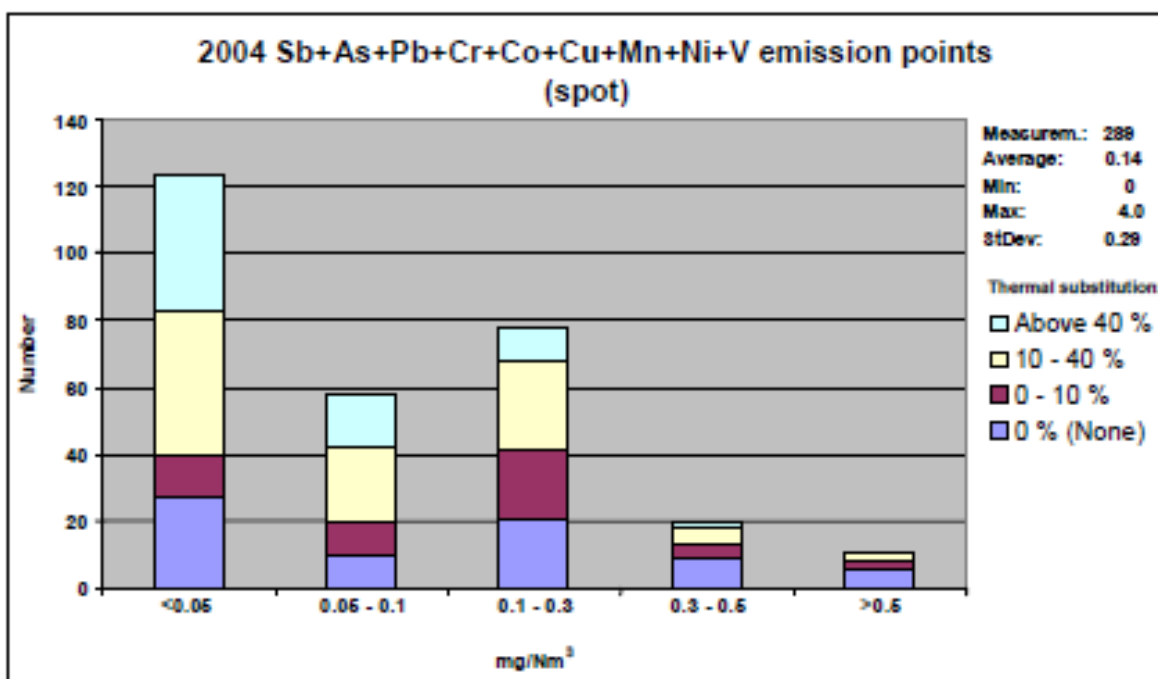


Figure 1.45 : Répartition des mesures des niveaux de Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V) par catégorie selon le taux de substitution thermique
[91, CEMBUREAU, 2006]

Le Tableau 1.29 fournit des exemples de plages de concentration pour différents composants métalliques présents dans le gaz épuré qui ont été mesurées dans des fours à ciment entre 1996 et 1998.

Composant	Concentration ¹⁾ (mg/Nm ³)
Antimoine	<0,007 – 0,05
Arsenic	<0,007 – 0,02 5
Béryllium	<0,004
Plomb	<0,012 – 0,2
Cadmium	<0,002 – 0,008
Chrome	<0,0 14 – 0,03
Cobalt	<0,012 – 0,15
Cuivre	<0,011 – 0,095
Manganèse	<0,007 – 2
Nickel	<0,008 – 0,07 5
Mercure	<0,005 – 0,12
Sélénium	<0,008 – 0,02
Tellure	<0,0017 – 0,015
Thallium	<0,005 – 0,03
Vanadium	<0,007 – 0,07 5
Zinc	<0,1 – 0,45
Étain	<0,01 – 0,025
1) La concentration est liée aux conditions de température et de pression standard après réduction de la teneur en vapeur d'eau ; total des fractions présentes sur les particules et traversant le filtre ; résultats de mesures uniques dont la moyenne a été calculée pour la période de prélèvement	

Tableau 1.29 : Plages des concentrations en métaux lourds dans le gaz épuré, mesurées dans des fours à ciment entre 1996 et 1998
[60, VDI 2094 Allemagne, 2003]

1.3.4.7.1 Mercure

Le mercure et ses composés sont particulièrement facilement volatilisés (métal très volatil). Il s'agit d'un élément métallique toxique et comme la pollution au mercure est globale, diffuse et chronique, il convient d'en réduire les émissions dans l'air. Par conséquent, il peut être nécessaire pour ce faire de limiter l'apport de mercure dans le four (cf. Sections 1.2.4.3.2, 1.2.4.3.2.1 et 1.3.4.13). Le mercure et ses composés ne sont pas complètement précipités et retenus dans le système de four ou le préchauffeur, ou les deux ; c'est pourquoi ils ne sont donc pas capturés par le clinker. Ils sont précipités sur le chemin du gaz résiduaire en raison du refroidissement du gaz et ils sont partiellement absorbés par les particules de la matière première, selon la température des effluents gazeux. Cette partie est précipitée dans le filtre à gaz résiduaire du four. Le mercure ne peut donc être enrichi que dans le cycle externe, là où le niveau de concentration et les émissions sont principalement déterminés par la qualité des gaz résiduaire. De manière à éviter une augmentation sur un long cycle des émissions de mercure, il peut se révéler nécessaire de limiter la concentration du cycle externe, par exemple en extrayant en continu ou par intermittence une partie de la poussière collectée par le filtre. De plus, la précipitation du mercure, et donc sa suppression, augmente lorsque la température des gaz résiduaire diminue. Des mesures effectuées sur des fours avec préchauffeur à cyclones révèlent la présence de plus de 90 % de mercure sur les particules formées à des températures de gaz résiduaire inférieures à 130 °C. Les composés de mercure sont alors entièrement supprimés du collecteur de poussières du four. Grâce à la haute efficacité du collecteur de poussières, les concentrations en mercure du gaz épuré des fours rotatifs sont souvent inférieures à la limite de détection (cf. Figures 1.46 et 1.47).

La poussière du collecteur de poussières peut être recyclée dans le broyeur à ciment. Si des déchets combustibles sont utilisés, la quantité de mercure introduite doit être régulièrement limitée (cf. Sections 1.2.4.3.2.1 et 4.2.2.1.1). Une autre façon de réduire les émissions de mercure consiste à réduire la température de l'effluent gazeux après la tour de conditionnement de manière à améliorer la précipitation du mercure et de ses composés pendant la filtration des

poussières.

En outre, dans une cimenterie allemande, du charbon actif est injecté en tant qu'adsorbant dans les gaz résiduels [12, Pays-Bas, 1997], [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [91, CEMBUREAU, 2006], [92, Autriche, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

Comme le montrent les Figures 1.46 et 1.47, des émissions de mercure ont été collectées à partir de 306 mesures ponctuelles de Hg dans le gaz épuré de fours rotatifs. En 2004, ces mesures provenaient toutes de cimenteries différentes qui se trouvaient dans plusieurs pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Dans la Figure 1.47, le taux de substitution thermique est représenté par différentes couleurs. Six mesures sont au-dessus de la plage. Sur celles-ci, une a un taux de substitution de '0', une de '0 à 10', deux de '10 - 40' et deux 'au-dessus de 40'. Comme cela a été expliqué, le mercure est le plus volatil des métaux lourds et présente un faible coefficient de piégeage. Les déchets combustibles sont soumis à une procédure d'admission et de contrôle rigoureuse avant leur utilisation [97, CEMBUREAU, 2007].

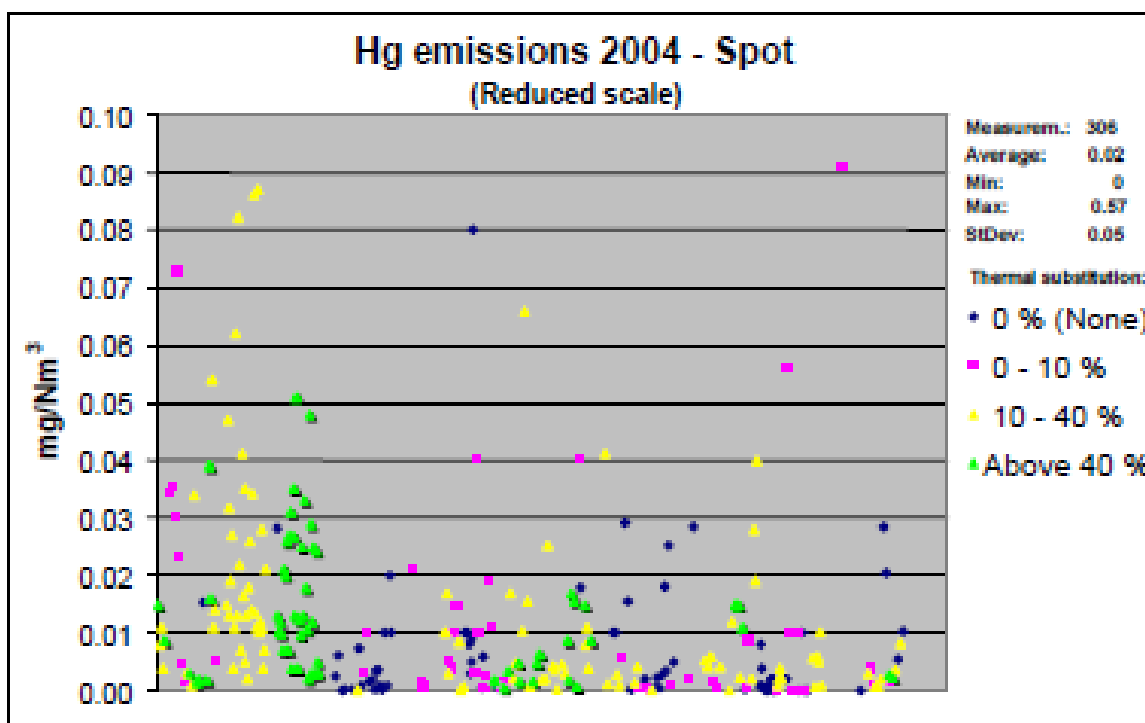


Figure 1.46 : Valeurs des émissions de mercure obtenues lors de 306 mesures ponctuelles de Hg effectuées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [91, CEMBUREAU, 2006]

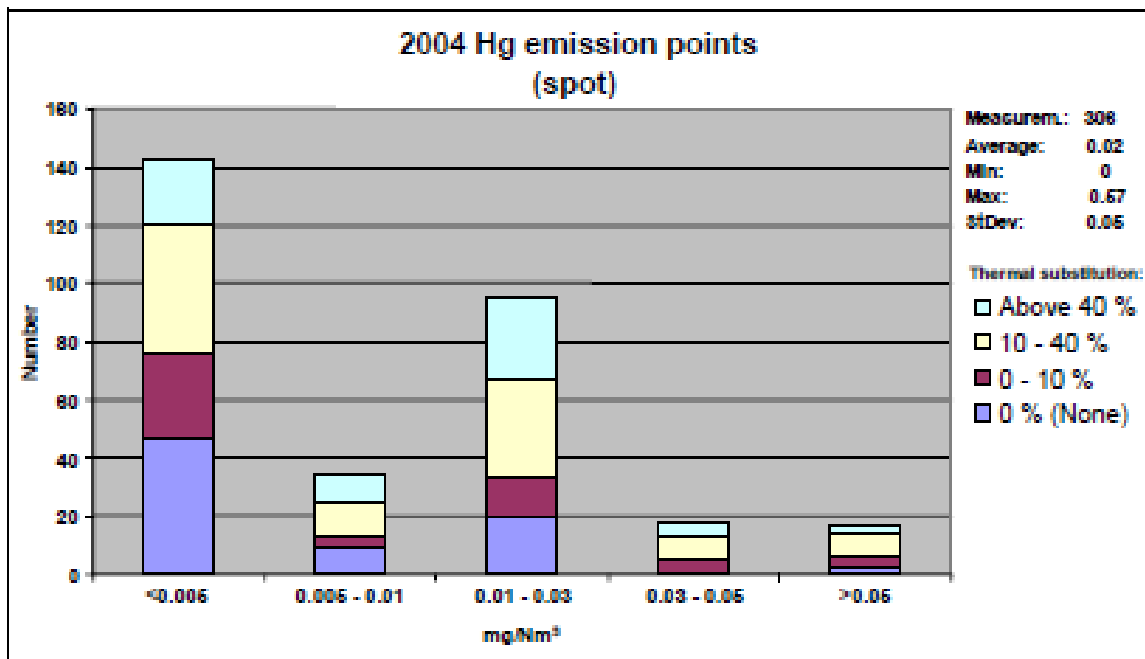


Figure 1.47 : Valeurs des émissions de mercure obtenues lors de 306 mesures ponctuelles de Hg effectuées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [91, CEMBUREAU, 2006]

1.3.4.8 Chlorure d'hydrogène et fluorure d'hydrogène (HCl et HF)

Les chlorures et les fluorures sont des constituants additionnels mineurs qui peuvent être introduits dans le four par le biais des différentes matières entrantes, telles que les matières premières ou les combustibles, ou les deux. Il convient de surveiller régulièrement ces substances.

1.3.4.8.1 Composés chlorés inorganiques gazeux

Les composés chlorés sont des constituants additionnels mineurs présents dans les matières premières et les combustibles qui interviennent dans la cuisson du clinker. Ils peuvent être introduits dans le four avec les différentes matières entrantes ainsi que pendant le procédé de chauffe du four. Au contact des éléments alcalins de la charge du four, ils réagissent pour former des chlorures alcalins. Initialement sous forme vapeur, ces composés se condensent sur le cru ou les poussières du four à des températures comprises entre 700 et 900 °C, puis ils entrent de nouveau dans le four rotatif et s'évaporent encore une fois. Présentant un comportement cyclique, ils peuvent s'enrichir dans la zone située entre le four rotatif et le préchauffeur. Un bypass à l'entrée du four permet de réduire efficacement les cycles des chlorures alcalins et donc de réduire les dysfonctionnements d'exploitation. Sur certaines installations, à partir d'un apport de chlore de 0,2 g Cl/kg de clinker, un flux de gaz résiduaire du four est dévié à travers un bypass puis refroidi de manière à empêcher toute accumulation dans la partie basse du préchauffeur. Le refroidissement du flux de gaz entraîne alors la condensation des composés de chlorures alcalins gazeux sur les particules de poussière du four, permettant ainsi leur élimination du système au moyen d'un collecteur de poussières. Ensuite, la poussière collectée du bypass est réintégrée de manière maîtrisée dans le flux de matériaux introduits dans le broyeur à ciment.

Dans les cimenteries européennes, comme le montre la Figure 1.48, les composés chlorés inorganiques gazeux sont soit inexistants soit présents uniquement en très petites quantités pendant la clinkérisation. Les chlorures inorganiques gazeux décelés dans le gaz résiduaire des fours rotatifs proviennent généralement des fractions de grain ultra-fin de chlorures alcalins présents dans les poussières du gaz épuré [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007].

En 2004, des échantillons de données de mesures continues et ponctuelles d'émissions de HCl ont été collectés auprès de cimenteries implantées dans plusieurs pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Des valeurs des émissions de HCl mesurées en continu dans le gaz épuré ont été collectées auprès de 98 fours rotatifs ainsi que des valeurs de 233 mesures ponctuelles, comme le montrent les Figures 1.48 et 1.50. Les Figures 1.49 et 1.51 montrent la répartition des émissions de HCl mesurées en continu et ponctuellement. Les émissions mesurées en continu ont été rapportées sous forme de moyenne annuelle des moyennes sur 24 heures. Les valeurs mesurées sont relatives à 1 Nm³ de gaz sec dans des conditions standard [97, CEMBUREAU, 2007]. En outre, la Figure 1.52 montre des exemples d'émissions dans une plage de 0 à 8 mg/Nm³ (moyenne annuelle), alors que 91 valeurs sont en dessous de la limite de détection et qu'une est supérieure à 15 mg/Nm³, mesurées sur 39 fours rotatifs allemands [76, Allemagne, 2006].

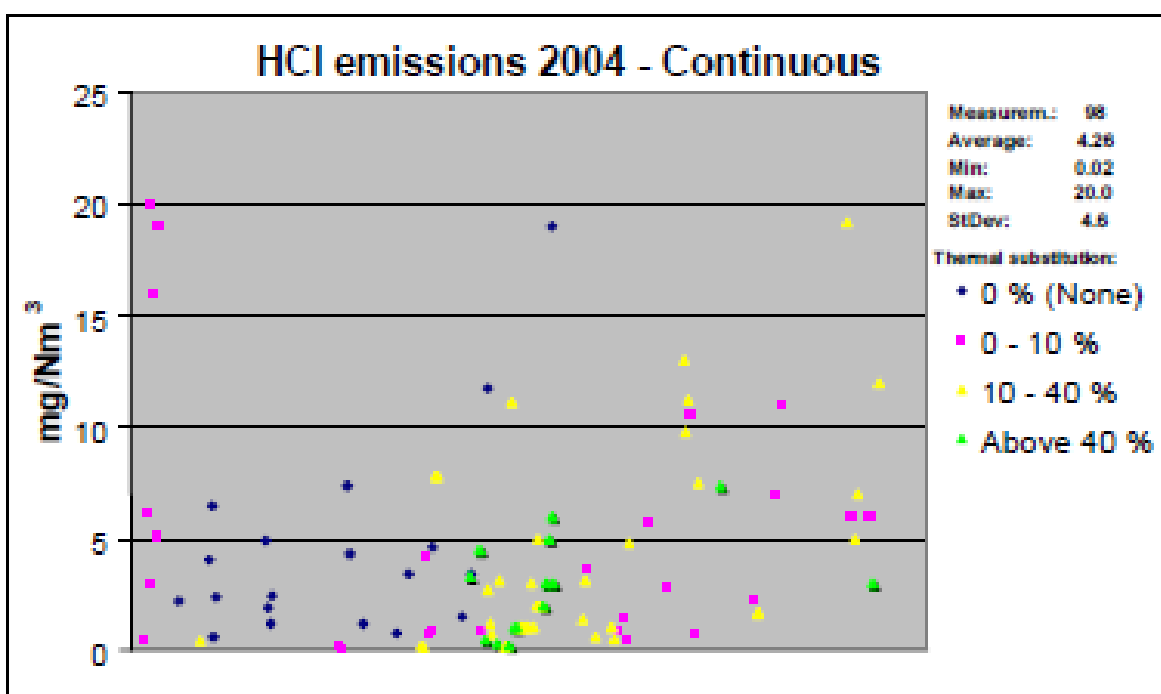


Figure 1.48 : Valeurs des émissions de HCl mesurées en continu dans le gaz épuré de 98 fours à ciment dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [97, CEMBUREAU, 2007]

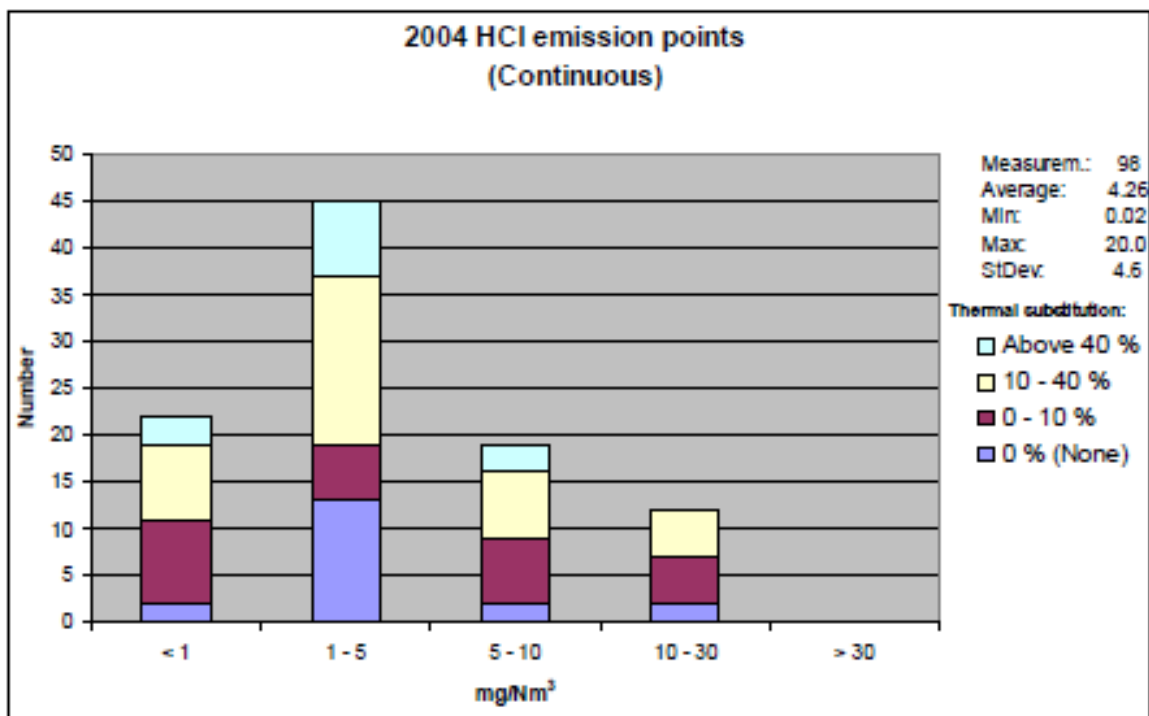


Figure 1.49 : Répartition des mesures de HCl en continu par catégorie selon le taux de substitution thermique
 [97, CEMBUREAU, 2007]

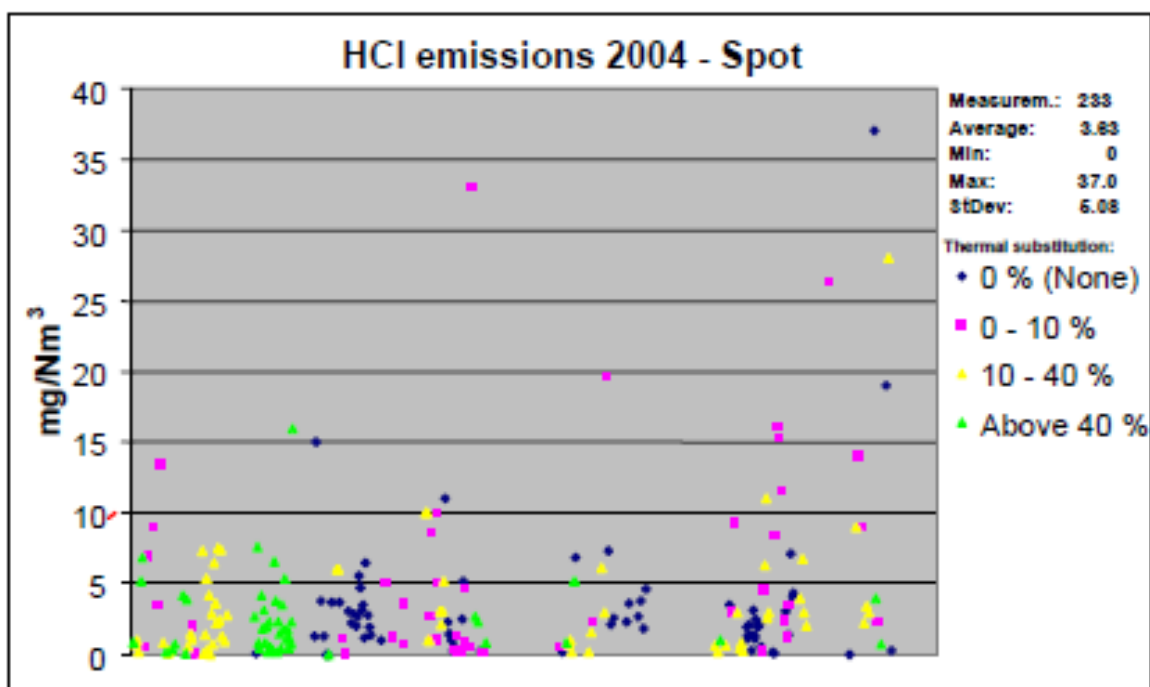


Figure 1.50 : Valeurs des émissions obtenues lors de 233 mesures ponctuelles effectuées dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
 [97, CEMBUREAU, 2007]

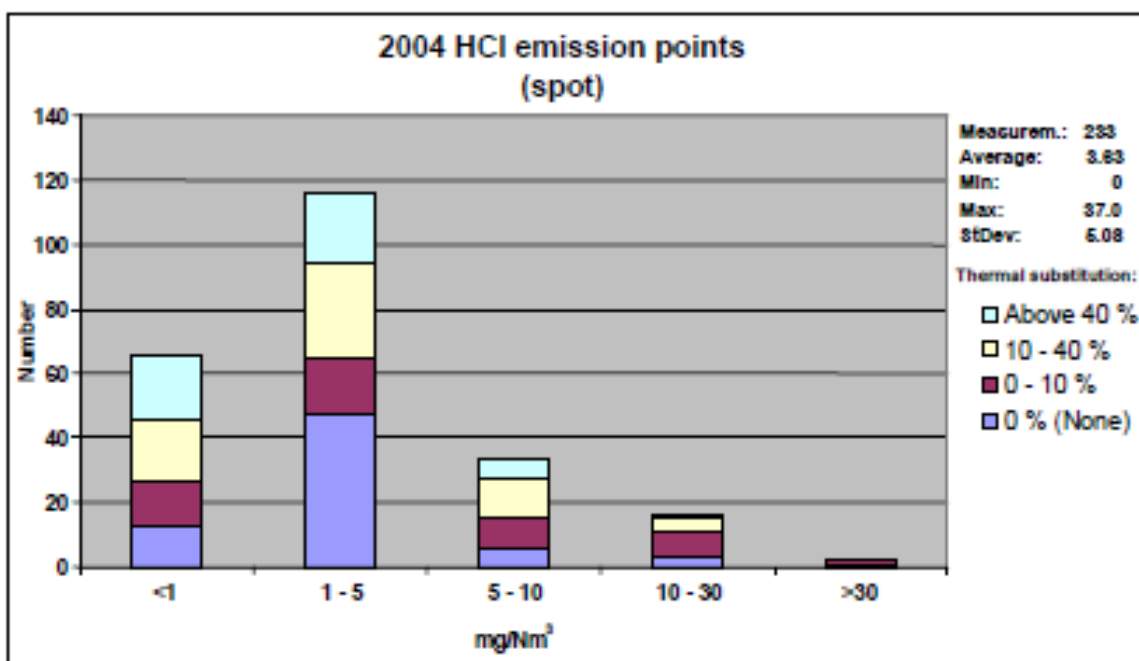


Figure 1.51 : Répartition des mesures ponctuelles de HCl par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de HCl
[97, CEMBUREAU, 2007]

La Figure 1.52 montre des exemples d'émissions de HCl mesurées sur 38 fours rotatifs allemands. Ces informations proviennent de mesures individuelles réalisées à date fixe trois fois par an. Dans 91 cas, la valeur des émissions était en dessous de la limite de détection qui se situe entre 1,5 et 2,1 mg/Nm³.

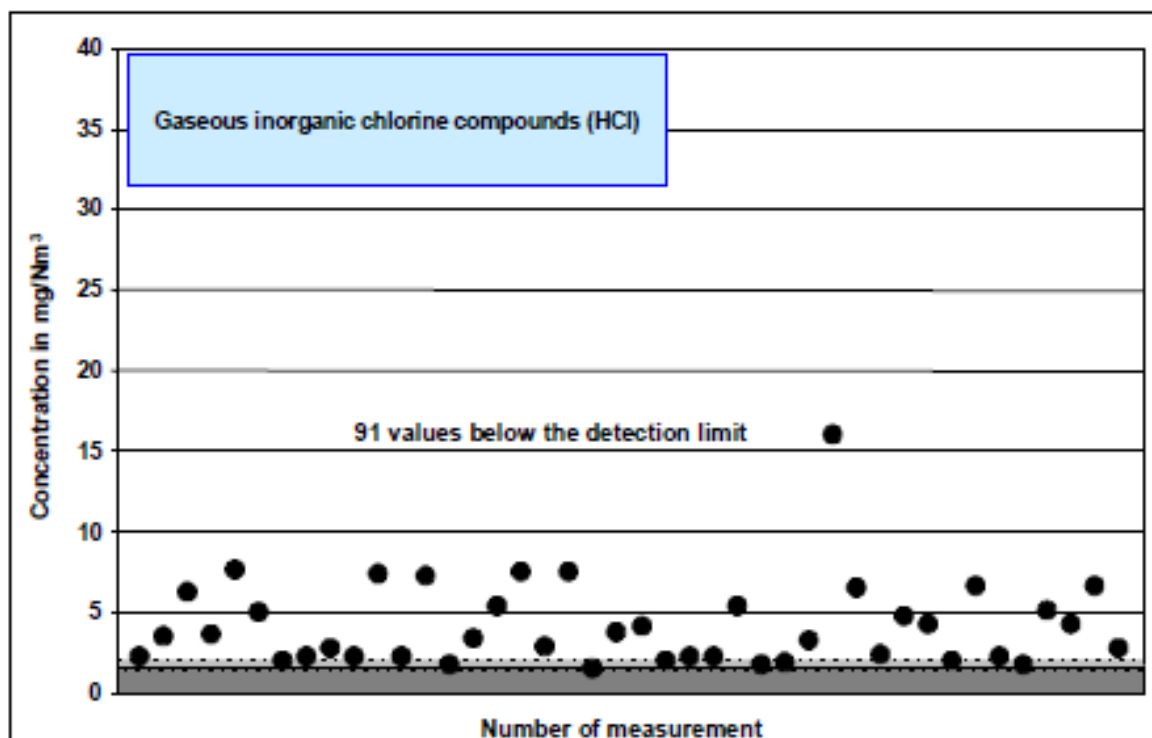


Figure 1.52 : Émissions de composés chlorés inorganiques gazeux, exprimés en HCl, mesurées dans le gaz épuré de 38 fours rotatifs allemands en 2004
[76, Allemagne, 2006]

1.3.4.8.2 Composés fluorés inorganiques gazeux

90 à 95 % du fluorure présent dans les fours rotatifs est capturé par le clinker et le reste est lié avec la poussière sous forme de fluorure de calcium (CaF_2) qui est stable dans les conditions de la cuisson. En raison de la grande quantité de calcium en présence, les émissions de composés fluorés gazeux, notamment de fluorure d'hydrogène, sont pratiquement impossibles. Les fractions de poussières ultra-fines qui traversent le filtre à gaz de mesure peuvent simuler de faibles taux de composés fluorés gazeux dans les fours rotatifs. Les petites quantités de fluorure sont rejetées avec la poussière du four, notamment sous forme de CaF_2 .

En 2004, des échantillons de données de mesures continues et ponctuelles d'émissions de HF ont été collectés auprès de différentes cimenteries implantées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). Des valeurs des émissions de HF mesurées en continu dans le gaz épuré ont été collectées auprès de 28 fours rotatifs ainsi que des valeurs de 210 mesures ponctuelles, comme le montrent les Figures 1.53 et 1.55. Cinq mesures sont au-dessus de la plage. Sur celles-ci, quatre ont un taux de substitution nul et une de plus de 40. Les Figures 1.54 et 1.56 montrent la répartition des émissions de HF mesurées en continu et ponctuellement. Les émissions mesurées en continu ont été rapportées sous forme de moyenne annuelle des moyennes sur 24 heures. Les valeurs mesurées sont pour 1 Nm^3 de gaz sec dans des conditions standard. Les fours à ciment émettent moins de 1 mg de fluorures/ Nm^3 , exprimés en HF [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007].

En outre, la Figure 1.57 montre des exemples d'émissions de HF dans une plage de $0,005$ à $0,35 \text{ mg/Nm}^3$, 106 valeurs sont en dessous de la limite de détection, mesurées sur 38 fours rotatifs allemands. Ces informations proviennent de mesures individuelles réalisées à date fixe trois fois par an. La limite de détection se situe entre $0,04$ et $0,06 \text{ mg/Nm}^3$ [76, Allemagne, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006].

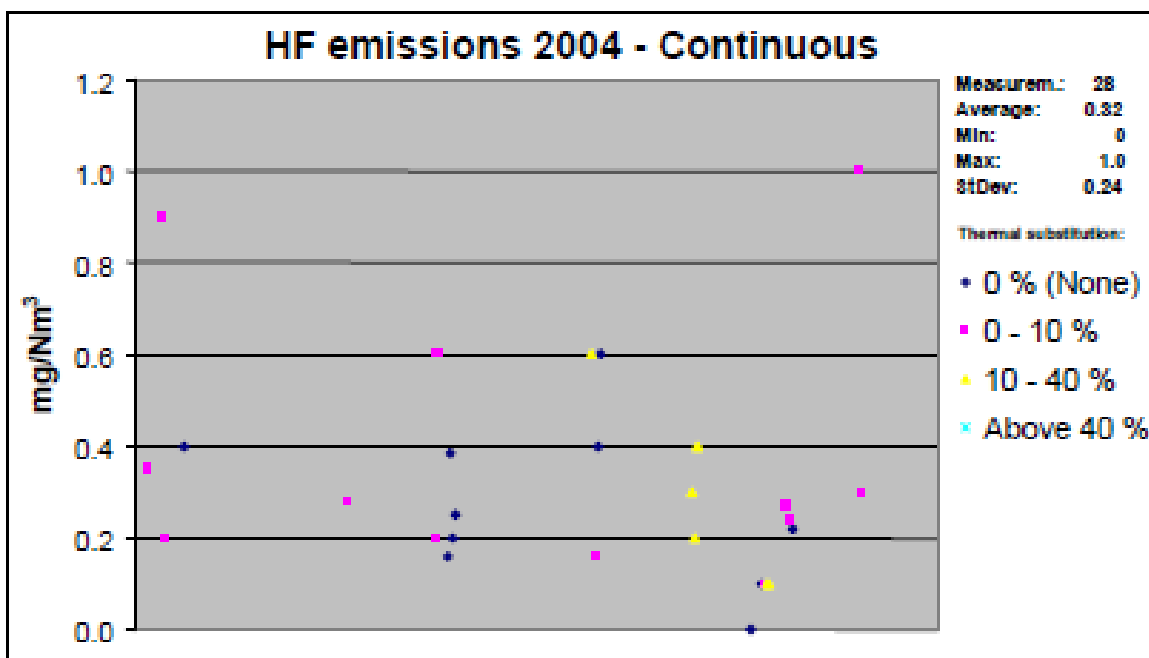


Figure 1.53 : Valeurs des émissions de HF mesurées en continu dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ [97, CEMBUREAU, 2007]

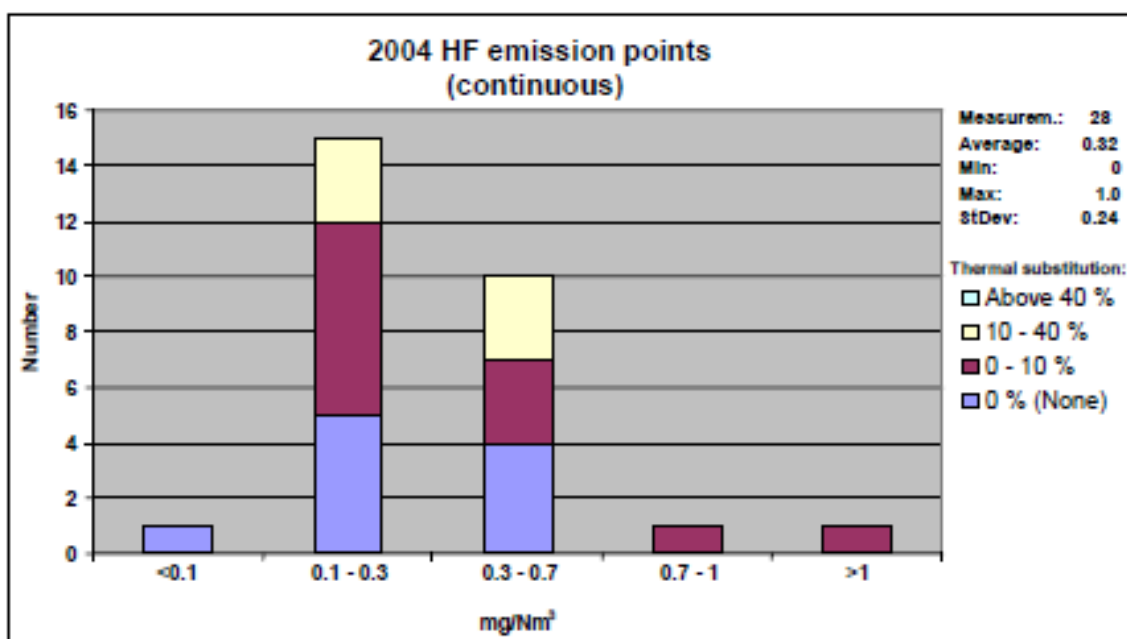


Figure 1.54 : Répartition des mesures en continu des émissions de HF par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de HF
 [97, CEMBUREAU, 2007]

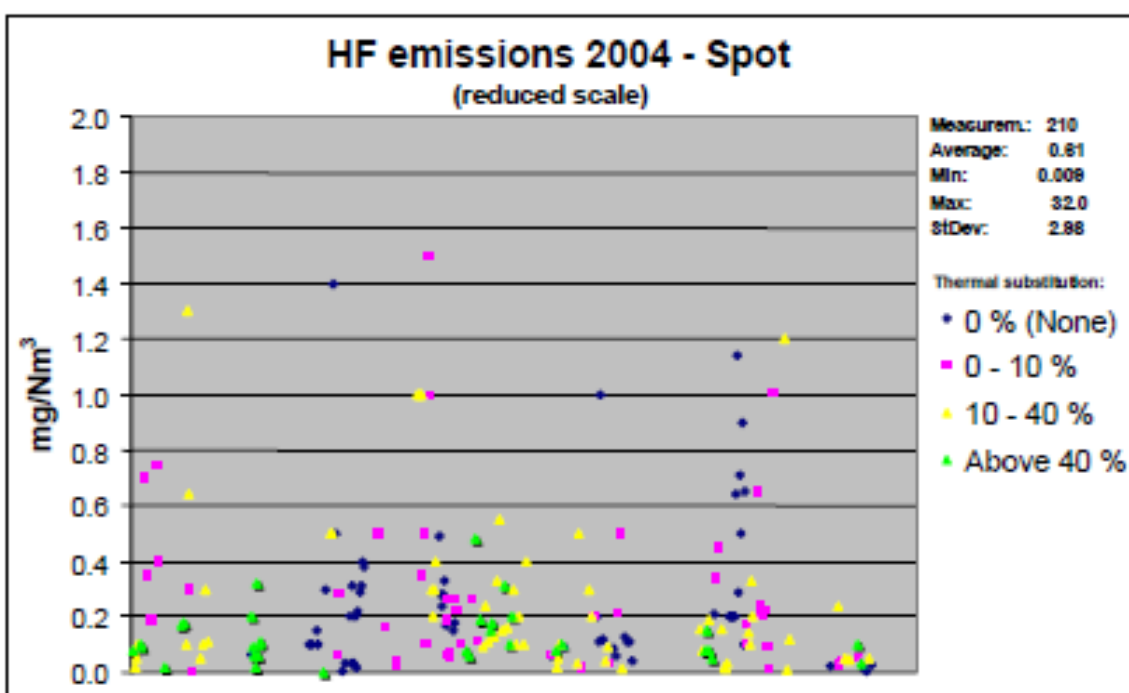


Figure 1.55 : Valeurs des émissions de HF mesurées ponctuellement dans le gaz épuré de fours rotatifs dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
 [97, CEMBUREAU, 2007]

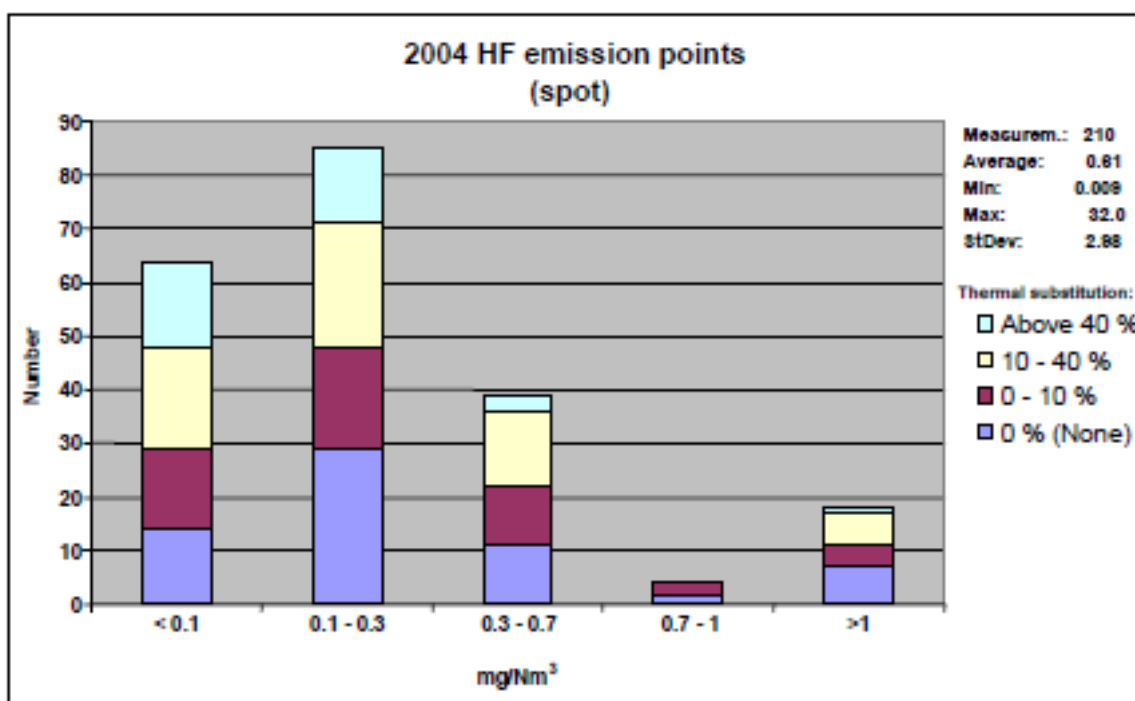


Figure 1.56 : Répartition des mesures ponctuelles de HF par catégorie selon le taux de substitution thermique des niveaux de HF
[97, CEMBUREAU, 2007]

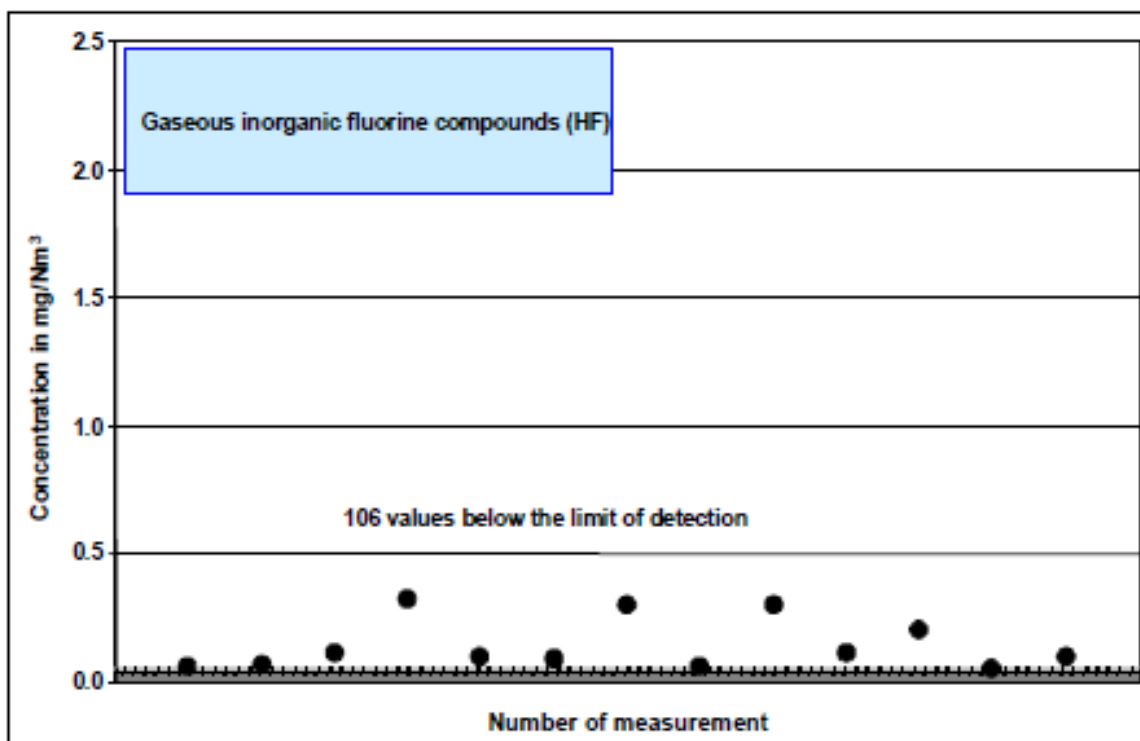


Figure 1.57 : Émissions de composés fluorés inorganiques gazeux, exprimés en HF, mesurées dans le gaz épuré de 38 fours rotatifs allemands en 2004
[76, Allemagne, 2006]

1.3.4.9 Ammoniac (NH_3)

Les matières premières libèrent du NH_3 dès les premières étapes du procédé. La teneur en NH_3 du gaz résiduaire des fours à ciment peut atteindre 200 mg/Nm^3 . Les techniques de réduction peuvent également libérer du NH_3 , c'est notamment le cas de la SNCR (réduction sélective non catalytique) au cours de laquelle de l'ammoniac inaltéré peut se dégager (fuite d'ammoniac). Il est essentiel de surveiller régulièrement les émissions de NH_3 .

Des études réalisées dans deux cimenteries suédoises entre 1994 et 2006 (premières tentatives de mesure des émissions d'ammoniac) montrent que les émissions de NH_3 qui se dégagent de la matière première vont de 10 à 35 mg/Nm^3 . En outre, l'un de ces sites est équipé depuis 1998 d'un épurateur de SO_x qui neutralise l'ammoniac dans sa liqueur afin d'égaliser les pointes et les baisses. Comme le montre la Figure 1.58, les émissions d'ammoniac sortant de la cheminée de cet épurateur sont mesurées en permanence depuis 1998. Depuis que le laveur est en service, les pointes de courte durée sont plus élevées et peuvent atteindre 125 mg/Nm^3 . La raison de cela se trouve dans l'augmentation de la température de la liqueur de l'épurateur de 53 à 59°C et dans l'équilibre inversé qui fait que l'ammoniac accumulé est rejeté à nouveau. Cependant, ces installations sont équipées de broyeurs (à cru et à charbon) où l'ammoniac est également absorbé de sorte que l'ammoniac n'est transporté avec le gypse vers le broyeur à ciment qu'en petite quantité (3 kg/h). Le broyeur à ciment fonctionne en circuit fermé à de faibles températures et très rares sont les occasions où une odeur d'ammoniac a été détectée dans le silo à ciment.

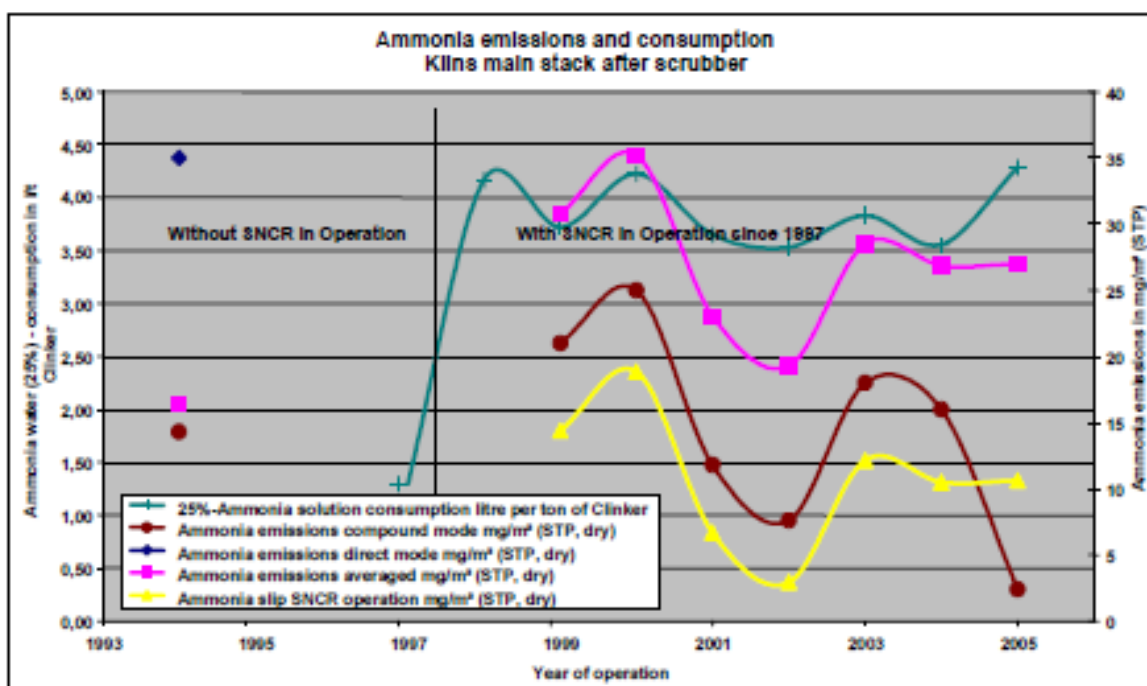


Figure 1.58 : Émissions d'ammoniac d'une cimenterie suédoise équipée d'un épurateur de SO_x [114, Suède, 2006]

En 2007 pendant tout un semestre, des études et des essais ont été réalisés dans une cimenterie allemande équipée d'une unité de SNCR haute efficacité. Des niveaux d'émission de NO_x de 350 et 200 mg/Nm^3 (moyenne journalière) ont été atteints grâce à l'application de rapports molaires NH_3 : NO de $0,7 - 0,8$ et $1,4 - 1,5$ respectivement. Cependant, lorsque le plus faible niveau d'émission de NO_x était atteint, les mesures de NH_3 montraient une fuite d'ammoniac non négligeable de 50 à 200 mg/Nm^3 , notamment avec le broyeur à l'arrêt. La fuite d'ammoniac était deux fois plus importante pour atteindre le niveau d'émission de 200 mg/Nm^3 (NH_3 : moyenne trimestrielle de 11 mg/Nm^3) par rapport à un niveau de 350 mg/Nm^3 (NH_3 : moyenne trimestrielle de 21 mg/Nm^3) (cf. également la Section 4.2.4.2) [160, Allemagne, 2007], [173, Allemagne, 2007], [182, TWG CLM, 2008].

En outre, des études réalisées dans une cimenterie irlandaise en 2004, qui consistaient en des essais à court terme sur la SNCR, ont mis en évidence des concentrations en NH_3 s'échelonnant de 4 à 26 mg/Nm^3 dans le gaz brut après le préchauffeur du four. Pour mesurer ces concentrations, deux configurations d'injection ont été testées (conditions standard ; rapport molaire NH_3 : NO de un (1) avec un taux de réduction de NO_x de 50 %). La fuite de NH_3 pose les limites de l'ajout sur-stœchiométrique d'un réducteur. Il convient de surveiller régulièrement cette substance. [76, Allemagne, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006], [114, Suède, 2006] [123, Irlande, 2005] [168, TWG CLM, 2007], [173, Allemagne, 2007].

L'Allemagne a fourni l'exemple d'une installation équipée d'une unité de SCR qui a permis d'obtenir une fuite de NH_3 inférieure à 1 mg/Nm^3 [173, Allemagne, 2007].

Il convient de souligner que le NH_3 présent dans la matière première a également un rôle de réducteur (cf. Section 4.2.5) [76, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

1.3.4.10 Benzène, toluène, éthylbenzène et xylène (BTEX)

Il peut être nécessaire de mesurer de temps en temps ces substances en cas de régime de fonctionnement spécial.

Dans certaines cimenteries allemandes, des mesures individuelles supplémentaires du benzène sont effectuées depuis 2004 ; celles-ci s'échelonnent entre 0,02 et 3,6 mg/Nm^3 . Ce sont les petites quantités de composants organiques apportés par les matières premières naturelles (restes d'organismes et de plantes incorporés dans la roche au fil de l'histoire géologique) qui sont à l'origine des faibles émissions de benzène pendant le préchauffage du cru introduit dans le four. La Figure 1.59 montre des exemples de concentrations d'émission de benzène mesurées dans des fours allemands (sur la base d'une limite de détection de 0,013 mg/Nm^3). Les émissions de benzène ne dépendaient pas des combustibles utilisés.

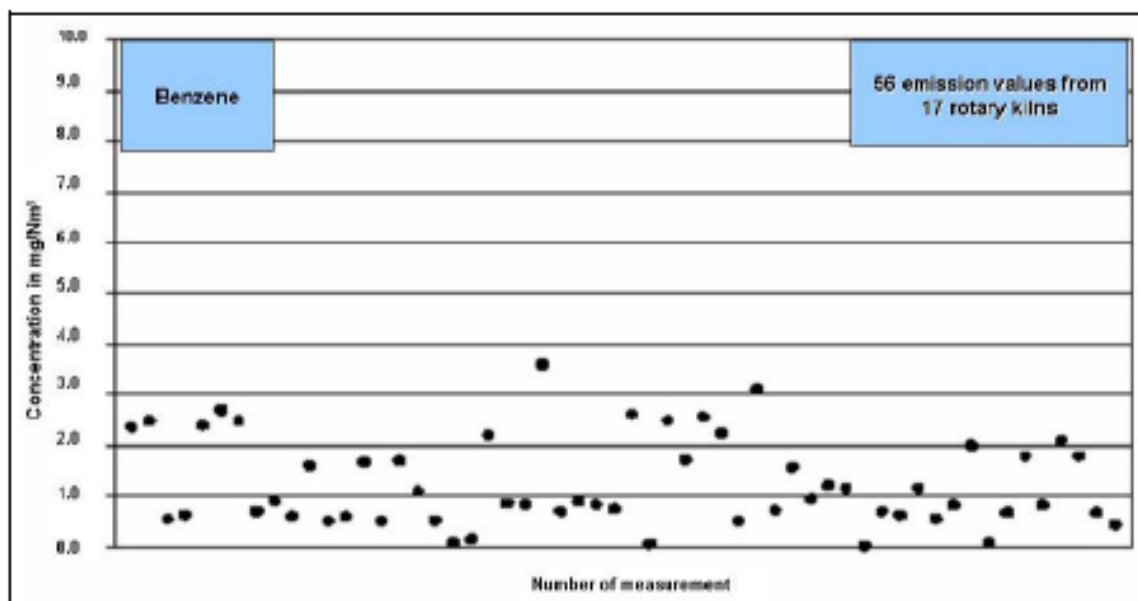


Figure 1.59 : Concentrations des émissions de benzène mesurées dans 17 fours rotatifs allemands [76, Allemagne, 2006]

1.3.4.11 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Il peut être nécessaire de mesurer de temps en temps ces substances en cas de régime de fonctionnement spécial.

1.3.4.12 Autres polluants organiques

Les chlorobenzènes, les PCB (polychlorobiphényles), y compris les congénères coplanaires et les chloronaphthalènes, sont autant d'autres polluants organiques produits lors de la fabrication du ciment.

Il peut être nécessaire de mesurer de temps en temps ces substances en cas de régime de fonctionnement spécial.

1.3.4.13 Impacts de l'utilisation des déchets sur le comportement des émissions et l'efficacité énergétique

Comportement des émissions

L'utilisation de déchets n'affecte pas les émissions de poussières provenant de la cuisson du clinker.

Dans l'état actuel des connaissances, l'utilisation de déchets appropriés n'a qu'une influence mineure sur les émissions de métaux pendant la cuisson du clinker du fait de la grande capacité de rétention des métaux liés aux particules du préchauffeur et du collecteur de poussières. Il a été remarqué que le mode d'introduction des combustibles dans le four (point d'alimentation) est très important en raison de l'effet qu'il peut avoir sur les émissions (cf. Section 1.2.4.1). Le comportement de chaque métal dans le four rotatif, les conditions d'alimentation et l'efficacité du collecteur de poussières sont des facteurs déterminants pour les émissions de métaux pendant la production de clinker. Les conditions d'alimentation sont en soi déterminées par la concentration en métal des matières premières et des combustibles utilisés. Étant donné que le rapport matière première/masse du combustible pour la production de clinker est d'environ 10:1, cela signifie que les éléments introduits par les matières premières déterminent les émissions. Dans la pratique, l'utilisation de déchets peut entraîner la diminution ou l'augmentation de l'apport total d'éléments individuels dans le four. Les métaux non volatils sont en grande partie emprisonnés dans la matrice du clinker et sortent du four avec le flux de clinker. Les métaux semi-volatils, comme le Pb et le Cd, forment des cycles stables à l'intérieur du four. Ces éléments sont rejetés du cycle et une grande quantité est capturée soit par le clinker soit par les poussières. Le Hg et le Tl sont des cas particuliers en raison de leur volatilité. Les températures du procédé les plus fréquentes conjuguées avec une haute volatilité sont la cause d'une capacité d'élimination insuffisante et établissent pour chaque installation un lien spécifique entre la charge d'entrée et la concentration d'émission dans la cheminée. En fonction de la température du gaz résiduaire, du mercure est présent sur les particules ou sous forme de vapeur, ou les deux, dans le collecteur de poussières. Par conséquent, afin de réduire les émissions de mercure et de métaux volatils, il peut être nécessaire de limiter leur apport dans le four. Lors de la combustion de déchets combustibles provenant de fractions de déchets mélangés, une analyse de réception systématique peut être nécessaire pour surveiller l'apport en métaux volatils (cf. Section 1.2.4.3.2).

La présence de constituants inorganiques NO_x, HCl et HF dans le gaz résiduaire n'est pas affectée par le choix de la matière à cuire. Dans l'état actuel des connaissances, la valorisation des déchets dans la production du ciment n'a qu'un effet négligeable sur ces émissions s'ils sont introduits dans le four par les points d'alimentation appropriés. Il en va de même pour les émissions de SO₂, de CO et de COT, à condition que la valorisation des déchets n'augmente pas l'apport de composés soufrés volatils ou de composés organiques volatils avec le cru. Le SO₂ qui se forme est lié au clinker dans le four rotatif et dans le précalcinateur sans mesures/techniques

Les conditions de combustion dans les fours rotatifs garantissent de faibles concentrations d'émission de PCDD/F. Les déchets susceptibles de présenter des niveaux de concentration pertinents de matières organiques persistantes (par exemple des huiles usagées chargées en PCB) sont introduits par la zone de cuisson principale afin que leur destruction soit assurée. En cas de doute quant au choix du point d'alimentation, il conviendra d'effectuer des mesures de référence avec et sans utilisation de déchets. Les nombreuses mesures effectuées sur le terrain indiquent que les émissions de PCDD/F se situent bien en dessous de la limite prescrite de 0,1 ng I-TEQ/m³, quels que soient les déchets utilisés.

Les déchets introduits dans la zone de cuisson secondaire (cf. Sections 1.2.4.1 et 1.2.5.1) ne traversant pas la zone à haute température du four rotatif, il convient d'imposer des limites qualitatives aux matières entrantes et aux paramètres du procédé. Cependant, de nombreux précalcinateurs modernes, où la température est supérieure à 850 °C et le temps de séjour est prolongé de 2 secondes, sont adaptés à l'utilisation de déchets.

La Section 4.2.2.1, avec ses Tableaux 4.5 et 4.6, donne des exemples de caractéristiques ainsi que le résultat de la surveillance des émissions annuelles d'un four à ciment allemand qui utilise des déchets combustibles.

Impacts sur l'efficacité énergétique

Les besoins en énergie thermique peuvent augmenter lorsque des déchets combustibles présentant une plus haute teneur en humidité, une plus forte granulosité ou une réactivité moindre sont utilisés à la place, par exemple, de combustibles fins, secs et/ou à haute teneur calorifique. Une plus faible efficacité énergétique peut également accroître les quantités de polluants atmosphériques émis en raison de l'augmentation du volume de gaz résiduaire.

[3, Autriche, 1997], [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [137, Klein/Hoenig, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

1.3.4.14 Impacts de l'utilisation des déchets sur la qualité des produits

L'utilisation de déchets dans la cuisson du clinker peut modifier les concentrations en métal du ciment produit. En fonction de l'apport total par le biais des matières premières et des combustibles, la concentration de chaque élément dans le produit peut fluctuer en conséquence de l'utilisation de déchets.

Étant donné que le ciment est mélangé avec des granulats, par exemple des graviers ou du sable, pour la production du béton ou du mortier, c'est donc le comportement des métaux dans le matériau de construction (béton ou mortier) qui finalement est déterminant dans l'évaluation des impacts environnementaux des déchets utilisés dans la cuisson du clinker.

Les émissions de métaux provenant du béton ou du mortier sont faibles. Les résultats de tests approfondis ont confirmé que les métaux étaient fermement incorporés dans le bloc de ciment. De plus, le béton sec présente une haute résistance à la diffusion qui empêche également la libération de métaux.

Des tests réalisés sur le béton et le mortier ont montré que les concentrations en métaux des éluats sont sensiblement inférieures aux limites prescrites par exemple par la réglementation nationale. Le stockage sous différentes conditions, en partie extrêmes, n'a donné lieu à aucune émission ayant un impact sur l'environnement. Cela est également vrai lorsque l'échantillon de matériau est broyé ou réduit avant les essais de lixiviation.

Un choix rigoureux des déchets accompagné d'une surveillance attentive permet d'éviter que des émissions de métaux dans une mesure dommageable pour l'environnement ne se produisent en raison de l'utilisation de déchets. Les ordres de grandeur des émissions de métaux sont en partie inférieurs aux normes de réduction de la pollution atmosphérique en vigueur. L'utilisation de déchets n'a aucun impact négatif sur la qualité environnementale du produit. Dans ces conditions, il est possible de continuer à utiliser du ciment sans restriction dans la production du béton et du mortier. La recyclabilité de ces matériaux ne sera nullement affectée.

La teneur en métaux des ciments allemands est régulièrement analysée. Les dernières valeurs publiées remontent à 2001. Leur comparaison avec les résultats d'études antérieures n'a révélé aucune augmentation de la teneur en métaux des ciments malgré une augmentation considérable de l'utilisation de déchets sur la période concernée [76, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

1.3.5 Pertes/déchets de procédé

Les pertes/déchets de procédé provenant de la fabrication du ciment se composent principalement des matériaux ci après :

- des roches indésirables éliminées des matières premières pendant la préparation du cru ;
- des poussières de four collectées dans le by-pass et à la cheminée ;
- les déchets des filtres presses utilisés en voie semi-humide qui sont relativement alcalins et contiennent des particules solides en suspension ;
- les poussières induites par les dispositifs d'épuration des effluents gazeux ; par exemple dépoussiéreur
- les agents de sorption usés (granules et poussières de calcaire) provenant du dispositif d'épuration des gaz résiduels ;
- les emballages (matière plastique, bois, métal, papier, etc.) de l'étape de conditionnement.

Des parties des pertes de procédé accumulées susmentionnées peuvent être recyclées ou réutilisées dans la cimenterie sur la base des exigences du procédé et des spécifications du produit. Les déchets qui ne peuvent être recyclés en interne peuvent être utilisés par d'autres industries ou bien sont envoyés à des installations de revalorisation ou d'élimination des déchets extérieures. La poussière du four peut être directement réutilisée dans le procédé de fabrication du ciment ou à d'autres fins.

Les déchets et matériaux solides de l'industrie du ciment contiennent également des PCDD/F. En 2006, une étude rapportait les informations suivantes :

- poussières de four à ciment filtrées
 - concentration moyenne de 6,7 ng I-TEQ/kg
 - concentration maximale de 96 ng I-TEQ/kg
- clinker
 - concentration moyenne de 1,24 ng I-TEQ/kg
 - concentration maximale de 13 ng I-TEQ/kg.

Cette étude montre également que, par rapport à d'autres matériaux, les niveaux de dioxine dans les pertes/déchets du procédé de fabrication du ciment sont du même ordre de grandeur que dans les aliments tels que le poisson, le beurre, le lait maternel et inférieurs la concentration maximale admissible de 100 ng TEQ par kg de boues d'épuration répandues sur les terres agricoles [88, SINTEF, 2006].

1.3.6 Émissions dans l'eau

La production de ciment ne génère généralement pas d'effluents. Pour la production du ciment en voie sèche ou semi-sèche, l'eau n'est utilisée qu'en petites quantités, par exemple pour le nettoyage. Pas la moindre goutte d'eau n'est en principe rejetée, car l'eau est recyclée dans le procédé.

Dans la voie semi-humide, de la pâte est utilisée et débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Dans la voie humide, de l'eau est utilisée pour le broyage des matières premières et la formation de la pâte. Les matières premières utilisées présentent souvent une haute teneur en humidité. La pâte est ensuite introduite directement dans le four où l'eau s'évapore ou bien elle peut passer auparavant dans un sécheur.

L'eau parfois utilisée pour refroidir le clinker s'évapore directement en raison des températures élevées du clinker.

Le Tableau 4.24 de la Section 4.2.2.3 fournit à titre d'exemple le bilan eau d'une cimenterie.

1.3.7 Bruit

Des émissions sonores sont produites tout au long du procédé de production du ciment, de la préparation et de la transformation des matières premières à l'expédition du produit final en passant par la cuisson du clinker, le procédé de production du ciment et le stockage. Les équipements lourds et les ventilateurs de grande puissance utilisés à différentes étapes du procédé de fabrication du ciment peuvent être des sources de bruit ou de vibrations, ou les deux, notamment :

- les goulottes et trémies,
- toutes opérations dans lesquelles la matière première, les combustibles, le clinker et le ciment sont cassés, concassés, broyés ou tamisés,
- les ventilateurs extracteurs,
- les soufflantes,
- la vibration des conduites.

Les cimenteries doivent se conformer aux normes de réduction imposées par la réglementation nationale et des relevés de bruit sont réalisés et analysés. L'industrie du ciment utilise des écrans antibruit naturels tels que les bâtiments administratifs, des murs, les arbres et les buissons pour réduire les émissions sonores. Lorsqu'une cimenterie est implantée dans une zone résidentielle, la construction de tout nouveau bâtiment est conditionnée à la réduction des émissions sonores [45, Schorcht, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006]

1.3.8 Odeurs

Les émissions d'odeurs posent très rarement problème dans une installation bien conduite. Si les matières premières contiennent des composants combustibles (kérogènes) qui ne brûlent pas mais qui pyrolysent quand leur température s'élève dans le préchauffeur, des émissions d'hydrocarbures peuvent se produire. Ces rejets sont visibles au sommet de la cheminée sous forme d'un panache ou de fumée bleue et peuvent être à l'origine d'odeurs tout autour des cimenteries quand les conditions météorologiques sont défavorables.

L'utilisation de combustibles ou de matières premières contenant du soufre, ou les deux, peut entraîner des dégagements d'odeurs (ce problème touche plutôt les fours verticaux).

En outre, les déchets utilisés comme matières premières ou combustibles peuvent être à l'origine d'émissions d'odeurs, notamment pendant les différentes étapes de transformation comme la préparation ou le stockage. L'utilisation d'ammoniac pour la réduction des NO_x peut également causer des émissions d'odeurs pendant certaines étapes du procédé s'il n'est pas manipulé correctement.

1.3.9 Surveillance

1.3.9.1 Surveillance des paramètres et des émissions

Il est recommandé de contrôler le fonctionnement du four en mesurant en continu les paramètres suivants :

- la pression,
- la température,
- la teneur en O₂,
- les NO_x
- le CO, si possible quand la concentration en SO_x est élevée,
- le SO₂ (l'optimisation simultanée du CO, des NO_x et du SO₂ est une technique en cours de développement).

Il est recommandé de mesurer en continu les paramètres suivants pour pouvoir déterminer avec précision les émissions (il faut parfois mesurer une nouvelle fois ces paramètres si leur niveau risque de changer entre le point de mesure et la cheminée et si cette valeur est utilisée pour le contrôle du procédé) :

- volume des gaz résiduels (calcul possible mais parfois jugé difficile),
- humidité (calcul possible mais parfois jugé difficile),
- température,
- poussières,
- O₂,
- NO_x,
- SO₂, et
- CO.

Il faut surveiller régulièrement les substances suivantes :

- les métaux et leurs composés,
- le COT,
- le HCl,
- le HF,
- le NH₃, et
- le PCDD/F.

Il est toutefois possible de mesurer et de surveiller en permanence le COT, le NH₃, le HCl et le HF ainsi que d'échantillonner les PCDD/F et les PCB en continu pour une analyse de 1 à 30 jours. En outre, deux États membres de l'UE des 27 mesurent en permanence le Hg.

Il peut être nécessaire de mesurer de temps en temps les substances suivantes en cas de régime de fonctionnement spécial :

- BTX (benzène, toluène, xylène),
- HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques),
- d'autres polluants organiques (comme les chlorobenzènes, les PCB (polychlorobiphényles) y compris les congénères coplanaires, chloronaphtalènes, etc.).

Il est particulièrement important de mesurer les métaux en cas d'utilisation comme matières premières ou comme combustible de déchets à forte teneur en métaux volatils. En fonction des combustibles utilisés, des conditions du procédé et de l'importance des émissions, il peut en outre être nécessaire d'effectuer des mesures supplémentaires. Il convient de prendre en considération les exigences des réglementations européennes et nationales existantes. Par exemple, lors de la co-incinération des déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets doivent être observées [59, Commission européenne, 2000]. Lorsque les fours à ciment utilisent des déchets, et tout particulièrement des boues d'épuration, les émissions de COT et de mercure sont souvent surveillées dans leurs gaz résiduels (parfois en continu) en plus des mesures continues régulières des émissions de poussières, de NO_x, de SO₂ et de CO. La section de conclusions et de recommandations relatives à l'industrie du ciment contient d'autres informations sur les mesures continues du mercure dans des cimenteries allemandes (cf. Section 1.7). D'autres mesures sont effectuées pour le HCl, le HF, les métaux lourds, le benzo-a-pyrène, le benzène, les polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF) en fonction de l'apport et des types de déchets combustibles utilisés, des conditions du procédé et de l'importance des émissions. En outre, des mesures récurrentes sont souvent effectuées lorsque des déchets sont utilisés, par exemple une fois par an [76, Allemagne, 2006].

Il faut avoir fait toutes ces mesures au moins une fois pour pouvoir fournir les informations nécessaires lors du dépôt d'une première demande d'autorisation conforme à l'IPPC.

Le document de référence sur les Principes généraux de surveillance fournit des informations utiles complémentaires [151, Commission européenne, 2003].

1.4 Techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD

Cette section présente les mesures/techniques qui, de l'avis général, permettent d'atteindre des niveaux de protection de l'environnement élevés dans les industries concernées par le présent document. Les systèmes de management, les mesures/techniques intégrées aux process et les mesures/techniques curatives y sont inclus, mais il convient de souligner que ces trois éléments peuvent être combinés dans le but d'obtenir des résultats optimums.

En plus des procédures de prévention, de contrôle, de minimisation et de recyclage, cette section traite également de la réutilisation des matériaux et de l'énergie.

Dans le but d'atteindre les objectifs fixés par la Directive IPPC, les mesures/techniques peuvent être présentées individuellement ou de façon combinée. L'Annexe IV de cette Directive recense un certain nombre de considérations à prendre en compte en général lors de la détermination des MTD. Les mesures/techniques de la présente section les aborderont individuellement ou bien de façon groupée. Une structure standard sera utilisée dans la mesure du possible afin d'expliquer chaque mesure/technique dans les grandes lignes. Elle permettra de comparer ces dernières et en fournira une évaluation objective sur la base de la définition des MTD fournie par la Directive IPPC.

La liste fournie dans cette section n'est nullement exhaustive et d'autres mesures/techniques existantes ou développées peuvent être tout aussi valables dans le cadre de l'IPPC et des MTD.

Le Tableau 1.30 présente la structure standard utilisée pour présenter chaque mesure/technique. Afin de refléter chaque cas individuel, cette structure n'est toutefois pas figée, car les éléments ci-dessous peuvent se recouper dans une certaine mesure.

Type d'information	Contenu
Description	Description technique de la mesure/technique (incluant des plans et schémas si nécessaire)
Avantages pour l'environnement	Principaux avantages environnementaux (incluant les économies d'énergie, d'eau et de matières premières ainsi que les augmentations du taux de production, l'efficacité énergétique, etc.) visés par la mesure/technique
Effets croisés	Principaux effets secondaires et inconvénients environnementaux pour d'autres milieux causés par l'utilisation de la mesure/technique. Détails des effets sur l'environnement de la mesure/technique par rapport aux autres.
Données d'exploitation	Données sur les niveaux de consommation et d'émission d'unités en exploitation qui utilisent la mesure/technique (incluant toutes conditions de référence et les méthodes de surveillance utilisées). Toutes autres informations pertinentes sur la manière de mettre en œuvre, de maintenir et de contrôler la mesure/technique.
Applicabilité	Indication du type d'unité où la mesure/technique est applicable compte tenu, par exemple, de l'âge de l'installation (nouvelle ou existante), de sa taille (grande ou petite), des mesures/techniques déjà en place et du type ou de la qualité du produit.
Aspects économiques	Informations sur les coûts (tant d'investissement que d'exploitation) et sur les éventuelles économies possibles (par exemple, réduction de la consommation de matières premières ou d'énergie, redevance sur les déchets) ou sur les revenus, incluant des détails sur les méthodes de calcul/estimation de ces coûts/économies ou revenus.
Motivation pour la mise en œuvre	Situations ou exigences locales qui sont à l'origine de la mise en œuvre ou qui peuvent l'encourager. Considérations non environnementales qui ont motivé la mise en œuvre (par exemple l'augmentation de la productivité, la sécurité).
Installations de référence	Référence à une ou plusieurs unités où la mesure/technique est appliquée et où des informations ont été recueillies et ont servi à la rédaction de la section.
Documentation de référence	Documents ou autres références (par exemple, livres, rapports, études, sites Internet) qui ont été utilisés pour la rédaction de la section et qui contiennent des informations approfondies sur la mesure/technique.

Tableau 1.30 : Détail des informations relatives à chaque mesure ou technique décrite dans cette section

Les coûts des mesures/techniques de réduction doivent être évalués en rapport avec le type de four à ciment, la taille des installations, l'efficacité des mesures/techniques et les circonstances de leur application.

Dans ce contexte, la Section 1.4.8 fournit des exemples de données financières, par exemple les coûts d'investissement, de maintenance et d'exploitation de différentes mesures/techniques s'appliquant aux gaz résiduels, comme la réduction de la poussière, des composés gazeux inorganiques et des composés gazeux organiques.

1.4.1 Consommation de matières premières

Description et avantages pour l'environnement

Le recyclage ou la réutilisation, ou les deux, dans les procédés de production des poussières collectées dans les filtres diminue la consommation totale de matières premières. Les poussières peuvent être réintroduites directement dans le four, être mélangées au cru (la limite étant la teneur en métaux alcalins) ou au ciment.

L'utilisation comme matières premières de déchets appropriés peut réduire la consommation de ressources naturelles, mais elle suppose toujours la maîtrise satisfaisante des matières introduites dans le four.

Effets croisés

Économie de ressources naturelles.

En fonction des caractéristiques des déchets appropriés utilisés, d'autres émissions peuvent se produire.

Les coûts du contrôle qualité des déchets et de surveillance des émissions peuvent augmenter.

Données d'exploitation

Cf. Section 1.2.4.2.

Applicabilité

En principe, cette mesure est applicable à l'industrie du ciment en ce qui concerne le contrôle qualité, les composés organiques volatils et la teneur en métaux lourds.

Aspects économiques

Il est possible de réduire le coût des matières premières.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Considérations économiques.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.
[168, TWG CLM, 2007]

1.4.2 Réduction de la consommation d'énergie (efficacité énergétique)

Le document de référence sur les meilleures techniques disponibles en ce qui concerne l'efficacité énergétique (ENE) fournit des informations utiles à ce sujet [181, Commission européenne, 2008].

1.4.2.1 Réduction de l'utilisation d'énergie thermique

La prise en compte et la mise en œuvre de différentes mesures/techniques, comme la mise en œuvre de mesures/techniques d'optimisation de l'énergie thermique dans le four (cf. Section 1.4.2.1.1.), peuvent mener à une réduction de la consommation. Dans les fours à ciment modernes, plusieurs facteurs influent sur la consommation d'énergie, tels que les propriétés des matières premières, par exemple leur teneur en humidité et leur aptitude à la cuisson (cf. Section 1.4.2.1.2), l'utilisation de combustibles aux propriétés et aux paramètres variables (cf. Section 1.4.2.1.3) ainsi que l'utilisation d'un système de bypass des gaz (cf. Section 1.4.2.1.4). Applicables individuellement, toutes les mesures/techniques doivent toutefois être envisagées dans un contexte global, l'une par rapport à l'autre.

En outre, la capacité de production du four a une influence sur les besoins énergétiques.

1.4.2.1.1 Systèmes de fours

Description

Les fours avec préchauffeurs à plusieurs étages de cyclones (quatre à six) équipés d'un précalcinateur intégral et d'une conduite d'alimentation d'air tertiaire sont considérés comme la norme pour les usines neuves et les modifications substantielles. Des installations avec trois étages cycloniques sont utilisées dans certains cas où des matières premières avec une haute teneur en humidité sont utilisées. Dans des conditions optimales, une telle configuration consommera 2 900 à 3 300 MJ/tonne de clinker.

Des mesures/techniques d'optimisation de l'énergie thermique peuvent être mises en œuvre à différents niveaux de l'installation, notamment sur :

- le refroidisseur :
 - installation d'un refroidisseur à clinker moderne, par exemple première grille fixe,
 - utilisation de grilles de refroidisseur présentant une résistance accrue au flux afin de répartir l'air de refroidissement de manière plus uniforme,
 - alimentation de l'air de refroidissement maîtrisée pour chaque grille.
- le four :
 - utilisation à haute capacité,
 - rapport longueur : diamètre optimisé,
 - conception optimisée du four par rapport au type de combustible utilisé,
 - systèmes de chauffe du four optimisés,
 - régime de fonctionnement stable et uniforme,
 - optimisation des contrôles de procédé,
 - conduite d'alimentation d'air tertiaire,
 - conditions presque stœchiométriques, mais oxydantes à l'intérieur du four,
 - utilisation de minéralisateurs,
 - réduction des fuites d'air vers l'intérieur.

- le calcinateur :
 - faible perte de charge,
 - répartition uniforme du cru chaud dans la conduite montante du four,
 - formation de dépôts minimale grâce à une faible circulation d'éléments alcalins,
 - précalcination complète du cru.
- le préchauffeur :
 - faible perte de charge et haut niveau de récupération thermique dans les cyclones,
 - taux de collecte des cyclones élevé,
 - répartition uniforme du cru sur les sections transversales des conduites de gaz,
 - répartition uniforme des flux solides et de gaz dans un préchauffeur à double colonne,
 - étages de cyclones (trois à six au total).
- la manipulation des matières :
 - matières premières et combustibles avec une faible teneur en humidité,
 - combustibles brûlant facilement avec pouvoir calorifique élevé,
 - homogénéisation et alimentation régulière (pesage précis) du cru,
 - homogénéisation et alimentation régulière des combustibles.
- les broyeurs :
 - fonctionnement compound des broyeurs.

Avantages pour l'environnement

Réduction de la consommation d'énergie thermique.

Effets croisés

L'utilisation d'un échangeur gaz/air ou d'un système de trempe pour les fours longs ainsi que d'un bypass des gaz dans les fours à préchauffeur/précalcinateur entraîne une hausse de la consommation d'énergie thermique.

En cas d'utilisation du refroidissement de la flamme, de la chaleur en plus peut être requise pour l'évaporation de l'eau, ce qui réduit l'efficacité énergétique.

Un nombre réduit de cyclones implique de plus grandes pertes thermiques avec les gaz résiduels qui sortent du préchauffeur.

Données d'exploitation

Dans les conditions optimales d'un essai de performance à court terme (par exemple 36 heures), la consommation d'énergie thermique est de 2 900 à 3 300 MJ/tonne de clinker. En raison des écarts par rapport aux conditions de conduite normales (par exemple les démarrages et les arrêts), les moyennes annuelles sont supérieures d'environ 160 à 320 MJ/tonnes de clinker.

Dans les cas où les installations ont été spécifiquement conçues pour permettre l'utilisation de certains types de déchets combustibles, la consommation d'énergie thermique peut toujours être maintenue entre 3 120 et 3 400 MJ/t de clinker. Les propriétés des déchets combustibles utilisés, comme le pouvoir calorifique, la réactivité ou la granulométrie, ont une influence sur l'efficacité énergétique (cf. Sections 1.2.4.3 et 1.3.3.3) [92, Autriche, 2006], [162, A TEC, 2006], [171, A TEC, 2007].

Les valeurs calculées correspondent à un four d'une capacité de 3 000 t/j. La capacité de production a également une influence sur les besoins énergétiques. La cuisson du clinker dans des fours d'une plus grande capacité, par exemple de 5 000 t/j, permet une économie de 100 MJ/tonne de clinker alors que dans des fours plus petits, produisant par exemple 1 500 t/j, la consommation d'énergie peut augmenter de 200 MJ/tonne de clinker. Cela est principalement dû aux différentes pertes de chaleur de la paroi par tonne de clinker produite. Toute évaluation de la consommation d'énergie d'un four doit nécessairement prendre cela en compte [84, CEMBUREAU, 2006].

Plus les étages cycloniques sont nombreux, plus l'efficacité énergétique du four sera élevée. Il est possible d'atteindre la consommation d'énergie la plus basse avec cinq ou six cyclones (cf. Section 1.3.3.1 et Tableau 1.17). Cependant, le nombre d'étages cycloniques est principalement déterminé par la teneur en humidité de la matière première (cf. également Section 1.4.2.1.2).

Applicabilité

La production et la teneur en humidité des matières premières et des combustibles qui doivent être séchés par la chaleur résiduelle des gaz résiduels déterminent le nombre d'étages cycloniques approprié, car d'un endroit à l'autre les propriétés des matières premières (teneur en humidité ou aptitude à la cuisson) peuvent être très variables [76, Allemagne, 2006].

Sept facteurs peuvent affecter la consommation d'énergie des installations modernes équipées de précalcinateurs et de préchauffeurs à cyclones :

- les propriétés des matières premières comme la teneur en humidité et l'aptitude à la cuisson (cf. Sections 1.2.2, 1.2.4.2 et 1.4.2.1.2),
- l'utilisation de combustibles aux propriétés variables (cf. Sections 1.2.3, 1.2.4 et 1.4.2.1.3),
- l'utilisation d'un système de bypass des gaz (cf. Sections 1.2.5.4.1 et 1.4.2.1.4),
- la qualité visée du clinker,
- la taille et la capacité du four.

Aspects économiques

La part de l'énergie (thermique et électrique) dans les coûts de production se situe généralement entre 30 et 40 %.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Les coûts de l'énergie et l'échange de quotas d'émissions incitent les entreprises à rechercher l'efficacité énergétique.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [84, CEMBUREAU, 2006], [86, EURITS, 2006], [92, Autriche, 2006], [136, Commission européenne, 1993], [153, Castle Cement UK, 2007], [154, CEMEX UK, 2006], [162, A TEC, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [171, A TEC, 2007], [181, Commission européenne, 2008].

1.4.2.1.2 Propriétés des matières premières

Description et avantages pour l'environnement

La production recherchée et la teneur en humidité des matières premières influencent l'efficacité énergétique globale. Ces paramètres déterminent le nombre approprié d'étages cycloniques à utiliser, car les matériaux devront être séchés, de préférence par la chaleur des gaz résiduels (cf. Sections 1.2.4.2, 1.3.3 et Tableau 1.17). Plus la teneur en humidité est élevée, plus les besoins énergétiques seront importants. Il convient de noter que plus les cyclones sont nombreux, moins le préchauffeur a de pertes thermiques avec les gaz résiduels.

Effets croisés

Certains combustibles contiennent également une partie de minéraux humides utilisés comme matière première qui sont séchés dans le four, ce qui peut faire augmenter la consommation d'énergie spécifique par tonne de clinker.

Données d'exploitation

Dans une cimenterie moderne, les gaz résiduels d'un préchauffeur à quatre, cinq ou six étages peuvent assurer le séchage des matières premières introduites dans le four à condition que celles-ci aient un taux d'humidité inférieur à 8,5 %. Le sixième étage cyclonique permettra une économie d'environ 60 MJ/tonne de clinker par rapport à un préchauffeur à cinq étages, car les besoins en énergie pour le séchage sont moindres.

D'après les calculs, pour le préchauffeur du four seul, un préchauffeur à quatre étages de cyclones consomme environ 90 MJ/tonne de clinker de plus qu'un à cinq étages. Avec trois étages de cyclones, la différence de besoins énergétiques augmente encore à plus de 250 MJ/tonne de clinker. Cette configuration à trois étages cycloniques n'est utilisée que dans des cas spéciaux pour des matériaux très humides.

Cependant, lorsque les matières premières présentent une teneur en humidité comprise entre 8,5 % et 10 – 11 %, il est préférable de réduire le nombre d'étages cycloniques (par exemple quatre) de manière à pouvoir utiliser la chaleur pour le séchage (broyeur à cru).

Applicabilité

Applicable en principe à l'industrie du ciment.

Aspects économiques

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [84, CEMBUREAU, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [86, EURITS, 2006], [92, Autriche, 2006], [136, Commission européenne, 1993], [137, Klein/Hoenig, 2006], [153, Castle Cement UK, 2007], [154, CEMEX UK, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

1.4.2.1.3 Propriétés des combustibles**Description**

Les caractéristiques des combustibles utilisés, comme le pouvoir calorifique approprié, la faible teneur en humidité, la teneur appropriée en soufre, en métaux, en composés halogènes et en substances volatiles, ainsi que l'injection à entraînement d'air ont un effet positif sur la consommation d'énergie spécifique du four.

La préparation des combustibles fossiles, comme le séchage partiel ou complet du charbon ou du lignite hors du four, voire à l'extérieur de la cimenterie, permet d'améliorer l'efficacité énergétique du four, car c'est elle qui a le plus d'impact sur la consommation d'énergie. Le lignite, par exemple, tel qu'il est extrait, peut présenter une teneur en humidité supérieure à 50 % et doit donc être séché avant sa livraison à la cimenterie. En outre, l'utilisation du surplus de chaleur pour le séchage des combustibles induit des économies d'énergie thermique. Le remplacement de combustibles à haute teneur en humidité par des combustibles séchés entraîne une réduction de la consommation d'énergie par tonne de clinker dans le four.

Avantages pour l'environnement

Faire fonctionner le calcinateur avec des combustibles de qualités très variées, allant du hautement réactif au non réactif, influence l'efficacité énergétique. Utiliser un combustible finement broyé, sec et d'un pouvoir calorifique approprié à la place d'un combustible faiblement réactif ou lourd amène des améliorations en matière d'efficacité énergétique.

Effets croisés

Certains combustibles contiennent également une partie de minéraux humides utilisés comme matière première qui sont séchés dans le four, ce qui peut faire augmenter la consommation d'énergie spécifique par tonne de clinker.

Différents types d'émissions peuvent se produire selon les caractéristiques des déchets utilisés.

Un taux de substitution élevé des déchets combustibles associé à des combustibles lourds ou moins réactifs impliquera une augmentation de la quantité des combustibles nécessaires pour satisfaire aux besoins en énergie thermique (cf. Sections 1.3.3, 1.3.3.3, 4.2.2.2 et Tableau 4.21).

De l'énergie en plus pourra être consommée pour le séchage des combustibles à l'extérieur du système de four.

Données d'exploitation

La comparaison de fours identiques alimentés d'une part avec de la houille et d'autre part avec du lignite, deux combustibles fossiles couramment utilisés, montre une différence de près de 100 MJ/tonne de clinker qui s'explique par les différentes qualités de combustible.

Utiliser un combustible finement broyé à la place d'un combustible faiblement réactif ou lourd peut réduire les besoins énergétiques de par exemple plus de 300 MJ/tonne de clinker. Il est possible d'atteindre de faibles besoins en énergie thermique (même pour les installations plus petites) en utilisant des combustibles à faible teneur en humidité qui brûlent facilement.

Si les installations ont été spécifiquement conçues pour permettre l'utilisation de certains types de déchets combustibles, la consommation d'énergie thermique peut toujours être maintenue entre 3 120 et 3 400 MJ/t de clinker au maximum. Les paramètres et les propriétés des déchets combustibles utilisés, comme le pouvoir calorifique approprié, la réactivité ou la granulométrie, ont une influence sur l'efficacité énergétique (cf. Sections 1.2.4.3 et 1.3.3.3) [92, Autriche, 2006], [162, A TEC, 2006], [171, A TEC, 2007]. En outre, une consommation d'énergie de 3 473 kJ/kg a été signalée pour un four équipé d'un précalcinateur à cinq étages [81, Castle Cement UK, 2006], [163, Castle Cement UK, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

Applicabilité

Applicable en principe à tous les types de fours à ciment.

Les principaux paramètres à prendre en considération lors de la définition d'une combinaison de combustibles sont la disponibilité des combustibles au niveau local, les possibilités techniques et la pérennité de la source d'alimentation.

Quand des déchets combustibles sont utilisés, il convient de tenir compte de leur pouvoir calorifique. Il faut souligner que lorsque leur pouvoir calorifique est moindre, les déchets combustibles seront nécessaires en plus grande quantité que les combustibles fossiles afin de satisfaire aux besoins en énergie thermique.

Aspects économiques

Le coût des différents types de combustibles fossiles ou déchets, ou les deux, et de leur préparation est très variable.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.
 Impératifs économiques.
 Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27, tout particulièrement en Autriche et au Royaume-Uni.
 [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [84, CEMBUREAU, 2006], [86, EURITS, 2006], [92, Autriche, 2006], [136, Commission européenne, 1993], [153, Castle Cement UK, 2007], [154, CEMEX UK, 2006], [162, A TEC, 2006], [163, Castle Cement UK, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [171, A TEC, 2007]

1.4.2.1.4 Système de bypass des gaz**Description et avantages pour l'environnement**

Les matières premières et les combustibles à faible teneur en chlore, soufre et éléments alcalins peuvent limiter le cycle d'enrichissement résultant de la circulation interne entre le four et le préchauffeur. En outre, la formation de dépôts dans la zone de l'entrée du four, du calcinateur et des deux étages inférieurs peut être limitée, ce qui peut être causé par de plus fortes concentrations. Il convient toutefois d'éviter les arrêts causés par la formation de dépôts étant donné qu'une production de clinker économe en énergie repose essentiellement sur un fonctionnement uniforme du four avec le moins de dérèglements possibles. Une faible circulation d'éléments alcalins, de chlore et, dans une moindre mesure, de soufre peut limiter l'utilisation d'un bypass des gaz à l'entrée du four. L'élimination d'une partie des gaz de procédé évacue non seulement le chlore, le soufre et les éléments alcalins mais aussi d'autres substances (cf. Section 1.2.5.4.1).

Effets croisés

L'élimination de matières premières chaudes et de gaz chauds augmente la consommation d'énergie spécifique d'environ 6-12 MJ/tonne de clinker par pour cent de gaz éliminé à l'entrée du four. Par conséquent, la minimisation de l'utilisation d'un bypass des gaz a un effet positif sur la consommation d'énergie spécifique.

Données d'exploitation

Cf. Section 1.3.3 pour la consommation d'énergie.

Applicabilité

Applicable en principe à l'industrie du ciment.

Aspects économiques

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Impératifs techniques.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.
 [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [76, Allemagne, 2006], [84, CEMBUREAU, 2006], [86, EURITS, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [92, Autriche, 2006], [136, Commission européenne, 1993], [153, Castle Cement UK, 2007], [154, CEMEX UK, 2006].

1.4.2.1.5 Réduction de la teneur en clinker des ciments

Description

Une des techniques de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de polluants de l'industrie du ciment exprimée par unité de masse consiste à réduire la teneur en clinker des ciments. Ceci peut être obtenu au stade du broyage par l'ajout de fillers et d'additions comme le sable, le laitier de haut fourneau, le calcaire, les cendres volantes et la pouzzolane.

Avantages pour l'environnement

Réduction de la consommation d'énergie.
Réduction des rejets de polluants dans l'air.
Économie de ressources naturelles.
Non mise en décharge des déchets.

Effets croisés

L'ajout de fillers et d'additions dans le produit final à la cimenterie permet de maîtriser le stockage et le transport des matériaux ainsi que les exigences de qualité du ciment fini.

Données d'exploitation

Le ciment produit en Europe contient en moyenne 80 à 85 % de clinker. De nombreux fabricants travaillent sur la possibilité de diminuer encore cette proportion. Une des techniques envisagées permettrait de remplacer 50 % du clinker sans dégrader la qualité et les performances du produit et sans augmenter les coûts de production. Les normes de fabrication du ciment définissent certains ciments contenant moins de 20 % de clinker, le reste étant du laitier de haut fourneau. Cependant, les ciments contenant une faible proportion de clinker ne sont destinés qu'à des usages spéciaux.

Applicabilité

Applicable en principe à l'industrie du ciment.

Aspects économiques

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.
Impératifs économiques.
Disponibilité de déchets appropriés.
Exigences imposées par des impératifs techniques et d'efficacité en matière de carbone. Exigences imposées par les normes relatives au ciment.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.
[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [168, TWG CLM, 2007]

1.4.2.2 Réduction de l'utilisation d'énergie électrique

Description

Il est possible de réduire l'utilisation de l'énergie électrique en installant des systèmes de gestion de la puissance et en utilisant des équipements à haute efficacité énergétique, comme les installations de broyage sous haute pression du clinker et les variateurs de vitesse pour les ventilateurs, ainsi que, dans certains cas, en remplaçant les anciens broyeurs à matière première par des nouveaux (cf. Section 1.3.3.2). L'utilisation de systèmes de surveillance améliorés et la réduction des fuites d'air dans le système peuvent également optimiser la consommation d'électricité. Certaines des techniques de réduction décrites dans les sections suivantes, comme

l'optimisation de la conduite des fours, auront aussi un effet positif sur l'utilisation de l'énergie.

Avantages pour l'environnement

Réduction et limitation de la consommation d'électricité.

Économie de ressources et réduction des émissions et des déchets.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

La Section 1.3.3 et le Tableau 1.19 comparent les caractéristiques essentielles des techniques de broyage. Dans certains cas, il a suffi de remplacer les anciens broyeurs à cru par des neufs pour réduire la consommation d'électricité.

Applicabilité

Applicable en principe à tous les fours à ciment.

Aspects économiques

En 2006, la part de l'énergie électrique dans le coût total de production du ciment se situait généralement entre 15 et 25 % (cf. Section 1.3.3.2).

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Impératifs économiques, réduction des coûts. Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[76, Allemagne, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [181, Commission européenne, 2008], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.2.3 Choix du procédé

Description

Le procédé choisi aura une influence sur les émissions de tous les polluants et aura aussi un impact déterminant sur l'utilisation de l'énergie comme le montre également une étude sur les technologies énergétiques dans le secteur du ciment diligentée par la Commission européenne en 1993. Cette étude a identifié une série d'améliorations et de modifications techniques accompagnées des économies d'énergies potentielles correspondantes, par exemple des modifications apportées au procédé, des améliorations dans le broyage, la préparation du cru ainsi que le développement de systèmes de gestion de l'énergie [136, Commission européenne, 1993].

L'énergie thermique requise pour le séchage et le préchauffage de la matière première dépend principalement de sa teneur en humidité comme le montrent les exemples de la Section 1.3.3.1 et du Tableau 1.17. Moins la teneur en humidité est élevée, moins les besoins énergétiques seront importants.

En cas de construction d'unités neuves ou de modifications substantielles, les fours en voie sèche à plusieurs étages de préchauffage et précalcination sont considérés comme l'état de l'art. Il est probable que les exploitants des fours en voie humide, comme en voie semi-humide et semi-sèche, en service en Europe les convertiront à la voie sèche à la faveur d'une rénovation. [12, Pays-Bas, 1997].

Avantages pour l'environnement

Réduction de la consommation d'énergie.

Économie de ressources et réduction des émissions et des déchets.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

Dans une cimenterie moderne, les gaz résiduels d'un préchauffeur à quatre ou cinq étages peuvent assurer seuls le séchage des matières premières introduites dans le four si celles-ci présentent un taux d'humidité inférieur à 8,5 %. Un exemple montre que la stratégie visant à se doter de l'usine la plus efficace a impliqué la fermeture d'usines situées sur des gisements de matières premières à base de craie présentant une teneur en humidité élevée (la craie contient plus de 20 % d'humidité).

Au Royaume-Uni (Padeswood Works), deux fours en voie humide avec des besoins calorifiques de 5 649 MJ/t de clinker au total ont été remplacés par un seul four à précalcinateur. Par rapport à ces deux fours en voie humide, le nouveau four à précalcinateur en voie sèche avait un besoin calorifique total, en 2006, de 3 473 MJ/t de clinker, soit une amélioration d'environ 2 176 MJ/t de clinker et une réduction des besoins énergétiques avoisinant les 36 %. Cependant, ces besoins calorifiques sont supérieurs à ceux que devrait avoir un four avec précalcinateur à cinq étages, car le carbone organique présent dans les déchets utilisés comme matières premières brûle dans les étages cycloniques les plus hauts de la tour du préchauffeur, d'où de hautes températures dans sa partie supérieure. Dans le cadre du développement du procédé, les températures de la tour seront réduites, ce qui abaissera la consommation calorifique globale à environ 3 150 MJ/t. Le four a l'autorisation d'utiliser jusqu'à 100 % de déchets combustibles ; cependant, il n'en consommait que 30 % en 2008 [81, Castle Cement UK, 2006], [163, Castle Cement UK, 2006], [182, TWG CLM, 2008].

Applicabilité

Applicable en principe à l'industrie du ciment pour de nouvelles installations/des modifications substantielles.

Aspects économiques

Le passage de la voie humide à la voie sèche coûte très cher et la facture peut s'élever jusqu'à 100 millions d'euros.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Padeswood Works, Castle Cement UK.

[12, Pays-Bas, 1997], [81, Castle Cement UK, 2006] [136, Commission européenne, 1993] [163, Castle Cement UK, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.2.4 Récupération de l'énergie des fours et des refroidisseurs/cogénération**Description**

L'utilisation d'installations de cogénération pour la vapeur et l'électricité et d'installations de production combinée de chaleur et d'électricité s'applique en principe à la fabrication du ciment en raison du besoin simultanée de chaleur et l'électricité (cf. Section 1.2.2.8). Le procédé à cycle organique de Rankine (ORC) et les procédés à cycle de vapeur conventionnel sont en œuvre. De plus, le surplus de chaleur des refroidisseurs à clinker ou des gaz de rejet du four est récupéré pour le chauffage urbain.

L'élément fondamental de l'installation de cogénération est la machine d'entraînement. Cependant, deux cimenteries produisent de l'électricité à partir de gaz résiduaire à faible température. Le plus souvent, le surplus de chaleur récupéré provient du refroidisseur à clinker et, dans une moindre mesure, des effluents gazeux du four.

Avantages pour l'environnement

Valorisation du surplus de chaleur du procédé et cogénération d'énergie thermique et électrique en plus d'une plus grande indépendance vis-à-vis de la variation des coûts énergétiques et d'une réduction des émissions de CO₂.

Économie de ressources et réduction des émissions.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

Procédé à cycle de vapeur conventionnel et procédé à cycle organique de Rankine (ORC)

La cimenterie de Slite, en Suède, utilise le procédé du cycle de vapeur conventionnel. La chaleur valorisable est envoyée vers une centrale électrique existante voisine de la cimenterie ; celle-là est exploitée par un tiers qui a remis en fonctionnement une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. La vapeur est générée dans une chaudière de récupération de chaleur à deux étages, l'un au niveau du refroidisseur à clinker et l'autre dans la conduite descendante du four. Cette centrale fournit environ 6 MW d'énergie. Si l'on calcule depuis 1999, les investissements se sont élevés à 8 millions d'euros pour la chaudière et le système de distribution de la vapeur, subventionnés à hauteur de 25 %. La réutilisation de la turbine à vapeur existante a permis de réaliser de grosses économies, cependant le coût n'a pas été comptabilisé. La production annuelle d'électricité est d'environ 50 GWh, soit 1/4 du total des besoins électriques de l'usine. La Section 4.2.3.1 fournit une description plus détaillée.

Le cycle organique de Rankine (ORC) est utilisé dans une cimenterie à Lengfurt en Allemagne pour valoriser la chaleur résiduelle à faible température du refroidisseur à clinker pour produire de l'électricité. Cette technique est essentiellement basée sur l'utilisation d'un fluide organique, le pentane. Les résultats montrent qu'il est ainsi possible de générer 1,1 MW de puissance électrique. La disponibilité atteinte était de 97 % du temps de marche du four à ciment. La production de chaleur résiduelle du refroidisseur à clinker à travers son air d'exhaure est de 14 MW et la température des gaz résiduels varie entre 300 et 350 °C. En moyenne 9 MW sont extraits. Cette technique ORC à la cimenterie de Lengfurt fonctionne bien depuis environ 10 ans. La Section 4.2.3.2 fournit davantage d'informations.

Valorisation de la chaleur des refroidisseurs à clinker ou des effluents gazeux du four pour le chauffage urbain.

Il est possible de valoriser la chaleur résiduelle du refroidisseur à clinker pour l'alimentation en eau chaude. La chaudière se trouve le plus souvent du côté gaz épuré du filtre, car le collecteur de poussières doit dans ce cas être un filtre électrostatique. Autrement, si un filtre à manches est installé pour le dépoussiérage après la chaudière de récupération, celle-ci doit être robuste et anti-abrasion.

Les cimenteries de Burglengenfeld, en Allemagne, de Büyükçekmece et de Canakkale, toutes deux en Turquie, comptent parmi celles équipées de systèmes d'eau chaude basés sur la valorisation de la chaleur résiduelle.

La cimenterie de Skövde, en Suède, possède également une chaudière de récupération de chaleur qui se trouve dans la conduite descendante des effluents gazeux du four. Comme à la cimenterie de Slite, la chaleur valorisée, 1,2 MW, ne correspond pas à ce qui a été prévu à la conception, 2,5 MW. La situation est semblable à celle de Slite : les propriétés de la fine poussière caractéristique de la tour du préchauffeur entravent l'efficacité de l'échange thermique.

Ce problème tant technique qu'économique met en question l'utilisation des effluents gazeux du préchauffeur comme source de chaleur.

Applicabilité

Applicable en principe à tous les fours à ciment si un surplus de chaleur suffisant est disponible et si le procédé réunit toutes les conditions appropriées. Il convient de tenir compte de la situation locale et des aspects financiers.

Aspects économiques

Une grande centrale électrique de taille normale coûte en moyenne entre 0,8 et 1,2 million d'euros par MW de capacité de génération électrique installée. L'installation de Lengfurt, en Allemagne (procédé basé sur le cycle organique de Rankine (ORC)) a des coûts environ 3,3 fois plus élevés. Avec 1 MW, l'installation ORC de Lengfurt est particulièrement petite, mais elle est économiquement viable grâce au financement dont elle bénéficie des autorités allemandes.

La situation est semblable pour la cimenterie de Slite (procédé avec cycle de vapeur conventionnel). En effet, la turbo-génératrice à vapeur a bénéficié d'un financement à hauteur de 25 % et de la disponibilité d'une partie essentielle et coûteuse de l'équipement. Les seuls revenus d'exploitation justifient difficilement un investissement complet dans une chaudière à vapeur d'eau et un système de génération électrique.

Avec l'entrée en service de plus de nouvelles tours de préchauffeur et de nouveaux refroidisseurs à clinker efficaces, le surplus de chaleur non utilisé va diminuer et les économies d'échelle pour la cogénération pourraient ne plus être intéressantes, notamment lorsque le gros de la chaleur est requis pour le séchage des matériaux. La valorisation de la chaleur résiduelle du four et du refroidisseur à clinker pour la génération électrique peut être évaluée au cas par cas. La viabilité économique peut également dépendre du prix local de l'électricité et de la taille de l'installation.

Outre le chauffage urbain, la valorisation de la chaleur, notamment d'un refroidisseur à clinker, est également possible si :

- une certaine quantité de chaleur en excès est disponible,
- la chaleur valorisée est vendable par le biais du chauffage urbain,
- le chauffage urbain est existant ou est financé et exploité par un partenaire,
- une génératrice produit de l'électricité utilisable soit pour la cimenterie soit pour le réseau d'électricité public.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales, par exemple la Directive Cogénération [94, Commission européenne, 2004]. Réduction des coûts.

Économie de ressources.

Exemples d'installations et documentation de référence

En plus des deux installations de cogénération à partir de la chaleur résiduelle décrites ci-dessus (cimenteries en Suède et en Allemagne), il existe également d'autres usines comme Alpena (40 MW) dans le Michigan, Etats-Unis ; Halla (10.6 MW) en Corée ; Tagada et Kanda au Japon [133, CEMBUREAU/Federhen, 2007].

[76, Allemagne, 2006], [78, E. Baatz + G. Heidt, 2000], [79, Allemagne, 2001], [94, Commission européenne, 2004], [168, TWG CLM, 2007], [181, Commission européenne, 2008]

1.4.3 Techniques générales

1.4.3.1 Optimisation de la conduite des fours

Description

L'optimisation du procédé de clinkérisation vise en général à diminuer la consommation calorifique, à améliorer la qualité du clinker et à augmenter la durée de vie des équipements (le revêtement réfractaire par exemple) en stabilisant les paramètres du procédé. La réduction des émissions (NO_x , SO_2 et poussières) est un effet secondaire de cette optimisation. La conduite régulière et stable d'un four au plus près des valeurs nominales des paramètres du procédé appliqué est bénéfique pour toutes les émissions des fours. L'optimisation inclut des mesures/techniques comme l'homogénéisation des matières premières, la régularité du dosage du charbon et l'amélioration du fonctionnement du refroidisseur. Pour que le débit d'alimentation en combustibles solides soit régulier, avec un minimum de pointes, il est essentiel que la configuration des trémies, des convoyeurs et des distributeurs soit satisfaisante et permette la mise en place d'un système moderne d'alimentation en combustible solide par gravité.

Les émissions de NO_x diminuent quand la longueur de la flamme, la température de cuisson et la consommation de combustibles diminuent et avec la création d'une atmosphère réductrice dans le four (cf. également Section 1.4.5.1.6). Le contrôle de la teneur en oxygène de l'atmosphère du four (facteur d'excès d'air) joue un rôle essentiel dans la réduction des NO_x . En général, plus la teneur en oxygène (facteur d'excès d'air) est faible à l'arrière du four, plus la production de NO_x est faible. Ceci doit cependant être pondéré avec les augmentations de CO et de SO_2 pour de plus faibles teneurs en oxygène [37, Royaume-Uni, 1996].

L'effet de l'optimisation du procédé du four sur les émissions de SO_2 est considérable sur les fours longs en voie humide et sèche et marginale pour les fours à préchauffeur. Les émissions de SO_2 diminuent avec le CaO produit par la calcination, la volatilité du SO_2 , provoquée par la réduction de la longueur de la flamme, la baisse des températures de cuisson et la création d'une atmosphère oxydante dans le four, le tout associé à un régime de fonctionnement stable [9, CEMBUREAU, novembre 1997].

La stabilité des conditions de marche des fours et l'élimination des pics de CO en cas d'utilisation de filtres électrostatiques réduisent les émissions de poussières ce qui diminue les émissions de substances adsorbées par les poussières, comme les métaux. Les systèmes de régulation modernes utilisant des appareils de mesure et de contrôle à réaction rapide acceptent des consignes plus fines, ce qui réduit le nombre de déclenchements de la sécurité sur « pics de CO » (cf. également Sections 1.3.4.1.1, 1.4.5.3 et 4.2.6).

Plusieurs fournisseurs d'équipements de fabrication du ciment ont développé des systèmes experts de régulation automatique généralement basés sur le contrôle de la cuisson par la surveillance des niveaux de NO_x [37, Royaume-Uni, 1996].

La surveillance et la mesure des paramètres et des émissions du procédé jouent un rôle essentiel dans l'optimisation de la conduite des fours.

Avantages pour l'environnement

La réduction de la longueur de la flamme et des températures de cuisson entraîne des réductions d'émissions de NO_x . Cela permet en outre de réduire la consommation de combustibles. Pour réduire les émissions de poussières, il convient d'assurer la stabilité des conditions de marche du four et d'éviter les pics de CO en utilisant des filtres électrostatiques.

Effets croisés

Réduction des émissions et de la consommation de combustible.

Données d'exploitation

En fonction des niveaux de NO_x initiaux, des réductions de NO_x pouvant atteindre 30 % et de SO_2 atteignant 50 % ont été signalées pour des fours longs en voie humide et en voie sèche. Elles sont toutefois marginales sur les fours à préchauffeur [9, CEMBUREAU, novembre 1997].

Applicabilité

La conduite de tous les fours peut être optimisée ; cette opération peut inclure de nombreux aspects allant de la formation théorique et pratique des opérateurs à l'installation de nouveaux équipements comme les systèmes de dosage, les silos d'homogénéisation, les lits de pré-mélange et les nouveaux refroidisseurs à clinker. L'effet de l'optimisation de la conduite des fours sur les émissions de SO_2 est considérable sur les fours longs en voie humide et sèche et marginale pour les fours à préchauffeur.

L'utilisation de filtres électrostatiques permet d'appliquer la gestion des pics de CO à l'industrie du ciment (cf. Section 1.4.5.3).

Aspects économiques

Le coût des mesures/techniques d'optimisation de la conduite des fours est très variable et peut atteindre les 5 millions d'euros.

L'investissement requis par le développement de systèmes de régulation automatiques experts généralement basés sur la régulation de la cuisson à travers le contrôle des niveaux de NO_x , c'est-à-dire un système de régulation informatisé de haut niveau, s'élève approximativement à 300 000 euros. Un investissement supplémentaire peut être nécessaire pour équiper une cimenterie de systèmes de dosage et de mesure.

L'optimisation d'un four vise avant tout à réduire les coûts d'exploitation, à augmenter la capacité de production et à améliorer la qualité du produit. Le coût d'exploitation d'un four optimisé est généralement moins élevé après optimisation. La diminution de la consommation de combustibles et de produits réfractaires, la réduction de la maintenance et l'augmentation de la productivité sont quelques-uns des éléments qui permettent de réaliser des économies.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [37, Royaume-Uni, 1996] [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.3.2 Choix des combustibles et des matières premières**Description**

La sélection et le contrôle soigneux des matières introduites dans un four peuvent réduire les émissions. La limitation de la teneur en soufre des matières premières et des combustibles peut par exemple diminuer les rejets de SO_2 . Ceci s'applique aussi aux matières premières et aux combustibles contenant d'autres substances comme l'azote, les métaux, les composés organiques volatils, le HCl et le HF. Il existe cependant des différences selon les fours et les points d'alimentation. La teneur en soufre ne pose par exemple pas de problème dans les fours en voie sèche à préchauffeur et précalcinateur et tous les composés organiques des combustibles brûlés par le brûleur principal seront complètement détruits.

La limitation de la teneur en chlore des matières introduites dans le four diminue la formation des chlorures alcalins et des autres chlorures métalliques ; qui peuvent provoquer des colmatages, perturber les conditions de marche du four, nuire au bon fonctionnement des filtres électrostatiques et finalement faire augmenter les émissions de poussières. Quand des matières sont très alcalines, il faut parfois évacuer une partie des poussières au lieu de les recycler dans le four pour éviter que l'alcalinité des produits finaux soit trop élevée. Dans ce cas, l'utilisation de matières peu alcalines peut permettre de recycler les poussières dans le procédé ce qui réduit la quantité de déchets qu'il produit.

Les combustibles et les matières premières conventionnels peuvent être remplacés par différents types de déchets. Il est toutefois essentiel de soumettre certaines caractéristiques et certains paramètres spécifiques de ces déchets à un contrôle qualité rigoureux (cf. Sections 1.2.4 et 1.2.4.3.2). Des déchets appropriés utilisés comme combustible sélectionnés pour leur pouvoir calorifique et leur réactivité ainsi que pour leur faible teneur en humidité et en substances polluantes peuvent économiser des combustibles fossiles (cf. Sections 1.3.3 et 1.4.3.3).

Les déchets utilisés comme matières premières qui contiennent des COV, des composés halogénés et du mercure peuvent poser problème, tout particulièrement en matière d'émissions. Il faut éviter d'introduire des matériaux à forte teneur en métaux volatils dans le four (cf. Sections 1.3.4.7, 1.3.4.7.1 et 1.4.7). La teneur en mercure des matières doit être réduite et il peut être nécessaire de limiter l'apport de mercure dans le four (cf. Sections 1.2.4.13). A ce sujet, cf. également Section 4.2.2.1.1 où sont présentés des exemples de plages de concentration des substances contenues dans les déchets. Les déchets qui contiennent des COV/composés halogénés ne peuvent être utilisés que si les composants volatils peuvent se décomposer à haute température avec un temps de séjour suffisant. Un contrôle systématique est obligatoire dans le cas de l'utilisation de déchets.

Avantages pour l'environnement

Un choix rigoureux des combustibles et des matières premières peut limiter l'apport de substances pouvant être à l'origine d'émissions. L'utilisation de déchets combustibles présente deux avantages : l'économie de combustibles fossiles et la réduction de la mise en décharge.

Effets croisés

Quel que soit leur type, les combustibles et les matières premières, y compris déchets, peuvent avoir un effet sur les émissions (notamment celles produites par les métaux volatils comme le mercure).

Données d'exploitation

Aucune donnée disponible.

Applicabilité

Les mesures/techniques peuvent en principe s'appliquer à l'industrie du ciment. L'utilisation de déchets appropriés est applicable lorsque la combustion complète de la matière organique est assurée et que le contrôle tant des déchets entrants que des émissions garantit un faible niveau d'émissions, par exemple de métaux et de dioxines.

Aspects économiques

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.
Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[74, CEMBUREAU, 2006], [76, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.3.3 Utilisation de déchets comme combustibles

Description

Les déchets sélectionnés en raison de leur pouvoir calorifique (net) adéquat (cf. Section 1.3.3.3 et Tableau 1.20) peuvent servir de combustibles dans un four à ciment à la place des combustibles fossiles conventionnels, comme le charbon, s'ils répondent à certaines spécifications et caractéristiques (cf. Section 1.2.4.1, Section 1.2.4.3). Ils ne peuvent souvent être utilisés qu'après un prétraitement afin d'alimenter la cuisson du clinker avec des combustibles sur mesure (cf. Section 1.2.4.3.2). Différents critères pèsent dans le choix des déchets combustibles, car ils peuvent avoir un impact sur la conduite du four et sur les émissions, il s'agit notamment de :

- critères physiques, par exemple l'entraînabilité à l'air,
- critères chimiques, par exemple la teneur en chlore, en soufre, en éléments alcalins et en phosphate, la réactivité et la teneur en métaux volatils.

Un système d'assurance qualité est nécessaire de manière à garantir les caractéristiques du combustible résiduaire ; il doit notamment contenir des dispositions concernant l'échantillonnage, la préparation des échantillons, l'analyse et le contrôle extérieur. Les spécifications techniques du Comité européen de normalisation, comme le CEN/TC 343 « Combustibles solides de récupération », fournissent des informations détaillées. A ce sujet, cf. également Section 4.2.2.1.1 où sont présentés des exemples de plages de concentration des substances contenues dans les déchets.

En fonction des types de déchets utilisés et de leurs caractéristiques, il convient de tenir compte des points où ils sont introduits dans le four (cf. Section 1.2.5.1), car le mode d'introduction des combustibles dans le four peut avoir une incidence sur les émissions. En général, les combustibles introduits par le brûleur principal sont soumis aux températures de combustion les plus élevées. Pour tous les points d'alimentation, les températures et les temps de séjour dépendent de la conception et de la conduite du four (cf. Section 1.2.4.1). Afin de satisfaire aux exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID), les gaz de procédé doivent rester à une température de 850 °C pendant deux secondes (cf. Sections 1.2.4.3.2 et 1.3.4.5). Lorsque les déchets utilisés contiennent plus de 1 % de chlore, le four doit fonctionner à 1 100 °C et le temps de séjour doit être de deux secondes.

D'autres équipements de surveillance de l'environnement peuvent être installés afin de contrôler les émissions. Des mesures/techniques spéciales appliquées au contrôle et au procédé sont nécessaires afin de respecter les normes relatives à l'environnement, à la sécurité et à la qualité.

Quand des déchets dangereux sont utilisés (déchets combustibles liquides), la gestion de la sécurité doit être prise en compte lors de leur manipulation, par exemple durant le stockage et l'introduction dans le four (cf. Section 1.2.4.3.3). Il est en outre possible de prendre en considération la gestion de la sécurité relative aux matériaux potentiellement auto-inflammables lors de l'utilisation de combustibles issus de fractions de déchets triés et prétraités.

Avantages pour l'environnement

Le choix des déchets combustibles est motivé par un certain nombre de facteurs étroitement liés dont il convient de tenir compte. Les points principaux suivants en font partie :

- réduction des émissions, par exemple CO₂ fossile et NO_x,
- réduction de l'utilisation de ressources naturelles, par exemple les combustibles fossiles et les matières premières.

Effets croisés

Les caractéristiques des différents types de déchets combustibles (par exemple l'humidité, le pouvoir calorifique) peuvent avoir une incidence sur la consommation d'énergie spécifique par tonne de clinker. Par exemple, un faible pouvoir calorifique (net) et une haute teneur en humidité peuvent entraîner une augmentation de la consommation d'énergie spécifique par tonne de clinker. Afin de répondre aux mêmes besoins énergétiques, il faudra utiliser davantage de déchets combustibles à pouvoir calorifique réduit que de combustibles conventionnels avec un pouvoir calorifique plus important.

Les déchets combustibles peuvent avoir un effet sur les émissions en fonction de leurs caractéristiques, par exemple leur teneur en métaux hautement volatils. Un contrôle approprié des matières entrantes permet de maîtriser et de limiter ces émissions.

Données d'exploitation

Tout changement de la combinaison de combustibles utilisée peut modifier la consommation d'énergie spécifique par tonne de clinker en fonction du type et du pouvoir calorifique des combustibles utilisés. La documentation technique montre que les combustibles fossiles présentent un pouvoir calorifique (moyen, net) de 26 à 30 MJ/kg, par exemple, pour le charbon standard ou de 40 à 42 MJ/kg pour le fioul standard, alors que la matière plastique affiche un pouvoir calorifique compris entre 17 et 40 MJ/kg. Il convient de noter que le pouvoir calorifique de ces déchets est très variable (jusqu'à 40 MJ/kg). Le pouvoir calorifique des farines animales (farines d'équarrissage) utilisées dans les fours à ciment s'échelonne entre 14 et 22 MJ/kg.

Applicabilité

Les mesures/techniques peuvent en principe s'appliquer à l'industrie du ciment à condition que les matières organiques soient complètement brûlées. Le contrôle des déchets entrants et des émissions garantit un faible niveau d'émissions, par exemple des métaux et des PCDD/F.

Aspects économiques

Par rapport aux combustibles fossiles, l'utilisation de déchets combustibles peut induire une baisse des coûts d'exploitation. La part de l'énergie dans les coûts de production se situe généralement entre 30 et 40 %. Le coût des combustibles constitue donc une part importante des coûts de fabrication du ciment. Les déchets combustibles peuvent être meilleur marché que les combustibles fossiles conventionnels, avec toutefois des variations en fonction du type de combustible et de la situation locale. Cependant, des coûts supplémentaires peuvent être encourus en raison du prétraitement dont les déchets combustibles bénéficient fréquemment, notamment leur homogénéisation, afin d'être utilisables dans un four à ciment. En outre, d'autres coûts liés aux contrôles et aux analyses peuvent être encourus.

Motivation pour la mise en œuvre

Impératifs économiques.

Réduction des coûts des combustibles.

Situation locale.

Disponibilité des ressources.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[59, Commission européenne, 2000], [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [74, CEMBUREAU, 2006], [76, Allemagne, 2006], [92, Autriche, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.4 Émissions de poussières (particules)

Cette section décrit les mesures/techniques visant à prévenir des émissions de poussières canalisées (cf. Sections 1.3.4.1.1 et 1.3.4.1.2) et diffuses (cf. Section 1.3.4.1.3). Des informations complémentaires sur ce sujet sont disponibles dans le BREF sur les Émissions dues au stockage et dans le BREF sur les Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique [95, Suède, 2006], [96, Commission européenne, 2006]

1.4.4.1 Mesures/techniques pour les opérations génératrices de poussières

Description

Les émissions de poussières diffuses sont principalement liées au stockage et à la manutention des matières premières, des combustibles et du clinker ainsi qu'à la circulation des véhicules sur le site de fabrication. Une implantation simple et linéaire est préférable, car elle permet de minimiser les éventuelles sources d'émissions de poussières diffuses. La maintenance correcte et complète de l'installation réduit toujours indirectement les émissions diffuses, car elle diminue les fuites d'air et les points de déversement accidentel de matériaux. L'utilisation d'équipements automatiques et le bon fonctionnement continu de l'installation contribuent également à réduire les émissions diffuses.

Plusieurs mesures/techniques différentes de réduction des poussières diffuses sont présentées ici. Elles sont applicables individuellement ou en association (cf. 1.3.4.1) :

- capoter les activités qui dégagent de la poussière, comme le broyage, le tamisage et le mélange,
- recouvrir les convoyeurs et les tapis élévateurs qui sont construits sous la forme de systèmes clos si des matériaux poussiéreux sont susceptibles de causer des émissions de poussières diffuses,
- diminuer les fuites d'air et les points de déversement, achèvement de l'installation,
- utiliser des équipements automatiques et des systèmes de régulation,
- veiller à un fonctionnement sans problème,
- nettoyer à l'aide de systèmes d'aspiration fixes et mobiles pour une maintenance correcte et complète de l'installation :
 - au cours des opérations de maintenance ou en cas de problème avec les convoyeurs, des matériaux peuvent se déverser. Il est indispensable d'utiliser des systèmes de nettoyage par aspiration pour empêcher les émissions de poussières diffuses pendant les opérations d'enlèvement. L'équipement des bâtiments neufs avec des systèmes fixes de nettoyage par aspiration ne pose pas de problèmes. Par contre, il est préférable d'équiper les bâtiments existants de systèmes mobiles et de raccords souples.
 - Pour des systèmes de transport pneumatiques, un système à circulation pourrait être favorisé dans certains cas particuliers,
- ventilation et collecte dans des filtres à manches :
 - les matériaux doivent autant que possible être manipulés dans des circuits fermés en dépression. L'air de succion utilisé à cet effet est ensuite dépoussiéré dans un filtre à manches avant d'être renvoyé à l'air.

- effectuer le stockage en milieu clos avec un système de manutention automatique :
 - les silos de stockage du clinker et les zones de stockage des matières premières clos entièrement automatisés sont considérés comme la solution la plus efficace au problème des émissions de poussières diffuses liés à la présence de stocks volumineux. Les installations de stockage de ce type sont équipées d'un ou de plusieurs filtres à manches pour empêcher les émissions de poussières diffuses pendant les opérations de chargement et de déchargement.
 - procéder au stockage dans des silos aux capacités adéquates, dotés d'indicateurs de niveau, d'interrupteurs et de filtres afin de gérer l'air chargé de poussière mis en mouvement lors des opérations de remplissage,
- pour l'expédition et le chargement du ciment, utiliser des tuyaux de remplissage flexibles dotés d'un système d'extraction de poussières et orientés vers le plancher de chargement du camion.

Avantages pour l'environnement

Réduction des émissions de poussières diffuses.

Le confinement des machines permet aussi de réduire les niveaux de bruit.

Effets croisés

Augmentation de la consommation d'énergie due à l'utilisation de systèmes d'aspiration. Les opérations de maintenance peuvent produire des déchets supplémentaires.

Données d'exploitation

En fonction de la mesure/technique spécifique.

Applicabilité

Les mesures/techniques peuvent en principe s'appliquer à l'industrie du ciment.

Aspects économiques

En fonction de la mesure/technique spécifique.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exigences de santé et de sécurité sur le lieu de travail.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[76, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

1.4.4.2 Mesures/techniques pour les zones de stockage en vrac et les stocks

Description et avantages pour l'environnement

Afin de réduire les émissions de poussières diffuses des lieux de stockage des matières premières minérales poussiéreuses ou des combustibles en plein air, les stocks ou les zones de stockage en vrac peuvent être recouverts ou encloisonnés par des grilles, des parois ou un recouvrement végétal vertical (pare-vents artificiels ou naturels pour la protection contre le vent des matériaux stockés à ciel ouvert).

Exemples de mesures/techniques de réduction des émissions de poussières diffuses :

- protection contre le vent des matériaux stockés à ciel ouvert :
 - Il faut éviter de stocker en plein air les réserves de matériaux poussiéreux, mais lorsque c'est le cas, l'utilisation de pare-vents correctement conçus permet de diminuer les

émissions de poussières diffuses.

- pulvérisation d'eau et d'agents chimiques permettant d'éviter la formation de poussières :
 - quand la source de poussières diffuses est bien localisée, un circuit de pulvérisation d'eau peut être installé. L'humidification des poussières facilite leur agglomération et favorise leur dépôt. Par ailleurs, de très nombreux agents permettent d'améliorer l'efficacité générale des pulvérisations d'eau.
- pavage, humidification des chaussées, propreté :
 - les zones de circulation des camions doivent être empierrées chaque fois que possible et la surface doit être maintenue dans un bon état de propreté. L'humidification des routes peut réduire les émissions de poussières diffuses, en particulier par temps sec. Des balayeuses peuvent également nettoyer la voirie. L'application de bonnes règles de maintenance permet de minimiser les émissions de poussières diffuses.
- humidification des stocks :
 - les émissions de poussières diffuses des stocks peuvent être réduites grâce à une humidification suffisante des points de chargement et de déchargement ainsi qu'avec l'utilisation de convoyeurs réglables en hauteur.

Si les émissions de poussières diffuses aux points de chargement et de déchargement des sites de stockage sont inévitables, elles peuvent toutefois être réduites en ajustant, si possible automatiquement, la hauteur de déchargement à la hauteur du tas ou en réduisant la vitesse de déchargement.

Effets croisés

L'humidification des zones de stockage fait augmenter la consommation d'eau.

L'utilisation de systèmes d'aspiration et de pulvérisation d'eau suppose une augmentation de la consommation d'énergie.

Les opérations de maintenance peuvent produire des déchets supplémentaires.

Données d'exploitation

En fonction de la mesure/technique spécifique.

Applicabilité

Les mesures/techniques peuvent en principe s'appliquer à l'industrie du ciment.

Aspects économiques

En fonction de la mesure/technique spécifique.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exigences de santé et de sécurité sur le lieu de travail.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27, cimenterie de Gador en Espagne.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [45, Schorcht, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.4.3 Réduction des émissions de poussières canalisées

Il existe différents points principaux d'émission de poussières dans les cimenteries : les fours, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs à matière première, à ciment et à charbon, ainsi que les procédés secondaires. Il est possible de réduire une grande partie des poussières fines (PM_{10} , $PM_{2,5}$) en réduisant de la concentration totale de poussière et en utilisant des installations de dépoussiérage à haute efficacité. Différents systèmes de dépoussiérage ont été utilisés par le passé, mais en 2007 les principaux systèmes de filtration de gaz résiduaires secs utilisés pour la réduction des poussières étaient les filtres à manches, les filtres électrostatiques ou bien une combinaison des deux que l'on appelle les filtres hybrides. On signale dans certains cas l'utilisation de filtres lamellaires frittés, toutefois pas pour des applications de four à ciment. Le Tableau 1.24 fournit des exemples de types de systèmes de filtres électrostatiques et de filtres à manches ainsi que de la quantité des poussières filtrées et de l'extraction de poussières. Les émissions de poussières diffuses liées à la manutention et au stockage des matériaux ainsi qu'au concassage et au broyage des matières premières et des combustibles peuvent aussi être importantes (cf. Sections 1.4.4.1 et 1.4.4.2). Le Tableau 1.31 récapitule les données d'exploitation mentionnées dans cette section. C'est une vue d'ensemble qui doit être examinée conjointement avec les informations données dans les sections et paragraphes ci-après.

Les filtres électrostatiques et filtres à manches ont leurs avantages et leurs inconvénients. Ils sont tous deux très efficaces dans les conditions de service normales. Dans des conditions spéciales - forte concentration en CO, démarrage ou arrêt du four, passage du fonctionnement compound (broyeur à cru en marche) au fonctionnement direct (broyeur à cru arrêté), les performances des filtres électrostatiques peuvent être diminuées alors que celles des filtres à manches sont moins affectées. Cependant, comme l'explique la Section 4.2.6, lorsque l'on utilise des filtres électrostatiques, les effets des pics de CO peuvent être minimisés. Les filtres électrostatiques et les filtres à manches présentent une efficacité globale élevée, car ils retiennent plus de 99 % des particules et les deux dépendent de la taille des particules. Afin de conserver leur efficacité, les deux types de filtres doivent être dûment entretenus (régulièrement). Il convient d'utiliser différents types d'éléments filtrants en fonction de la température des gaz résiduaires. Les manches ont l'inconvénient de constituer un déchet quand elles sont usées ; elles doivent être éliminées conformément aux dispositions des réglementations nationales [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008].

Mesure/technique	Applicabilité	Données sur les émissions ⁵⁾		Coût ³⁾	
		mg/Nm ³ ₁₎	kg/tonne ²⁾	Investissement en million(s) d'euros	Exploitation euro(s)/t de clinker
Filtres électrostatiques	Tous les fours, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs à ciment	<10 – <20 <10 – <20 <10	0,02 – 0,05 0,02 – 0,05 0,02	2,1 – 6,0 0,8 – 1,2 0,8 – 1,2	0,1 – 0,2 0,09 – 0,18 0,09 – 0,18
Filtres à manches	Tous les fours, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs (broyeurs à matière première, à ciment et à charbon)	<5 <5 <10	0,01 0,01 0,02	2,1 – 6,0 ⁴⁾ 1,0 – 1,4 ⁴⁾ 0,3 – 0,5 ⁴⁾	0,15 – 0,35 0,1 – 0,15 0,03 – 0,04
Filtres hybrides	Tous les fours, les refroidisseurs à clinker et les broyeurs à ciment	<10 – 20	0,02 – 0,05		
Réduction des émissions de poussières diffuses	Toutes les cimenteries	-	-	-	-

1) Pour les fours ; exprimées normalement en moyennes journalières, mesurées sur gaz secs, 273 K, 101,3 kPa et 10 % O₂
2) kg/tonne de clinker : sur la base de 2 300 m³/tonne de clinker
3) Coût pour réduire les émissions à 10 – 30 mg/Nm³, pour un four produisant 3 000 tonnes de clinker par jour et des émissions initiales ne dépassant pas les 500 g de poussières/Nm³
4) Dépend de l'élément filtrant utilisé, cf. Tableau 1.32, pour une efficacité de séparation de plus de 99,9 %
5) Les données sur les émissions se trouvent dans le paragraphe correspondant de cette section.

Tableau 1.31 : Tableau synoptique des mesures/techniques de réduction des émissions de poussières dans le procédé de production du ciment

La Section 1.3.4.1.1 et le Tableau 1.24 fournissent d'autres exemples de types de systèmes de filtres électrostatiques et de filtres à manches ainsi que de la quantité des poussières filtrées et de l'extraction de poussières. Ces valeurs représentent les plages standard et cette présentation générale permet également une estimation des poussières filtrées et de l'extraction de poussières le cas échéant [76, Allemagne, 2006].

1.4.4.3.1 Filtres électrostatiques

Description et avantages pour l'environnement

Ces filtres créent un champ électrostatique en travers de la trajectoire des matières particulaires en suspension dans la veine d'air. Leur charge électrique devient négative et elles se dirigent vers les plaques collectrices chargées positivement. Celles-ci vibrent ou sont frappées régulièrement, ce qui fait tomber la poussière dans des bacs de récupération placés en-dessous. Il est important d'optimiser les cycles de frappe des filtres électrostatiques pour minimiser le réentraînement des particules et donc limiter le potentiel de voir le panache formé au sommet de la cheminée. Les filtres électrostatiques se caractérisent par leur aptitude à supporter des températures élevées (jusqu'à 400 °C environ) et de forts taux d'humidité.

Exemples des différents paramètres de fonctionnement dont dépend la performance d'un filtre électrostatique :

- teneur en humidité du gaz,
- composition chimique des gaz résiduaux,
- débit des gaz résiduaux,
- distribution granulométrique des particules et composition chimique,
- résistivité électrique des particules,
- taux de charge des particules,

- température du gaz,
- mise en marche et à l'arrêt,
- intensité du champ électrique,
- surface et forme des électrodes,
- concentration en SO_2 ,
- teneur en humidité,
- phases de transition des différents régimes de fonctionnement.

Leurs performances peuvent en particulier être affectées par l'accumulation sur les électrodes de matières formant une couche isolante qui diminue l'intensité du champ électrique. Ce phénomène peut se produire en cas d'introduction de quantités importantes de chlore et de soufre dans le four, à l'origine de la formation de chlorures et de sulfates de métaux alcalins. Les chlorures de métaux alcalins peuvent se présenter sous la forme d'une poussière submicronique (0,1 à 1 μm), leur résistivité spécifique est élevée (10^{12} à 10^{13} Ω/cm) et ils forment une couche isolante sur les électrodes, ce qui nuit au traitement des poussières.

Les problèmes de résistivité élevée de la poussière peuvent en partie être résolus par injection d'eau dans des refroidisseurs-évaporateurs. L'utilisation de filtres à manches est une solution permettant également de résoudre ce problème.

Effets croisés

Formation possible de chlorures et de sulfates de métaux alcalins avec particules de poussières submicroniques. De hauts niveaux de concentration en CO entraînent l'apparition d'un risque d'explosion (cf. Section 1.4.5.3).

La consommation d'énergie électrique augmente parallèlement à l'efficacité de traitement des poussières. Les opérations de maintenance peuvent produire des déchets supplémentaires.

Les poussières peuvent être réutilisées.

Données d'exploitation

Des dimensions correctes, un bon conditionnement et des conditions de nettoyage optimisées peuvent réduire les émissions moyennes mensuelles de poussière à 5-15 mg/m^3 (mesure sur gaz sec, 273 K, 10 % O_2). L'efficacité nominale du collecteur de particules est supérieure à 99,99 % et les émissions peuvent donc être réduites à quelques mg/Nm^3 . Les filtres électrostatiques sont très efficaces pour collecter des particules ultrafines (<0,5 μm), à condition que celles-ci aient la capacité de s'agglomérer. Les filtres électrostatiques sont robustes d'où leur vaste champ d'application et une insensibilité relative aux dérèglements du procédé.

Les installations de filtration électrostatiques existantes peuvent souvent être améliorées sans qu'il soit nécessaire de les remplacer en totalité, ce qui limite les coûts : les installations anciennes peuvent être dotées d'électrodes plus modernes, de systèmes de contrôle automatique de la tension. Par ailleurs, il est possible d'améliorer la circulation des gaz dans le filtre ou d'augmenter le nombre d'étages de filtration. En 2006, de nombreux filtres électrostatiques bien conçus et bien entretenus obtenaient des niveaux d'émissions de poussières inférieurs à 10 mg/Nm^3 (moyenne journalière). Il est possible de mettre en œuvre un filtre électrostatique capable de réduire les émissions à moins de 10 mg/Nm^3 avec l'application des commandes les plus modernes, une alimentation haute tension optimale, une taille appropriée et un nombre de champs électriques adapté.

Les filtres électrostatiques éliminent non seulement les poussières, mais aussi les substances qui s'adsorbent sur ces particules, comme la dioxine et les métaux, s'ils sont présents.

La taille et la consommation électrique des filtres électrostatiques augmentent de façon exponentielle parallèlement à la réduction du niveau de poussières dans les gaz épurés. Le fonctionnement optimal d'un filtre électrostatique dépend de caractéristiques définies du gaz brut, comme sa température et son taux d'humidité. Un filtre électrostatique correctement entretenu peut avoir une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Certaines pièces, comme les marteaux et les paliers, doivent être remplacées régulièrement après quelques années de service dans le cadre de l'entretien courant.

Applicabilité

C'est grâce à leur haute efficacité, à leur faible perte de charge, à leur haute disponibilité et à leur efficacité énergétique que les filtres électrostatiques ont réussi à s'imposer pour collecter les poussières des gaz qui s'échappent des fours rotatifs et des refroidisseurs à clinker. Il est possible d'utiliser des filtres électrostatiques dans presque toutes les applications des fours à ciment pour collecter les poussières des gaz résiduels du four, du gaz de bypass ou de l'air rejeté des grilles des refroidisseurs.

La documentation technique disponible n'indique pas de restriction concernant l'applicabilité des filtres électrostatiques aux différents procédés utilisés dans l'industrie de la fabrication du ciment. Cependant, ces filtres sont rarement choisis pour les installations de broyage des cimenteries car, en plus du coût d'investissement, ils n'empêchent pas l'apparition d'émissions de poussières relativement importantes au démarrage et à l'arrêt.

Les filtres électrostatiques se caractérisent par leur aptitude à supporter des températures élevées (jusqu'à 400 °C environ) et de forts taux d'humidité. Les principaux inconvénients de cette mesure/technique sont une baisse d'efficacité lors de la formation d'une couche isolante et une accumulation de matière causée par l'introduction de chlore et de soufre. Les performances générales des filtres électrostatiques seront bien meilleures si on évite les pics de CO (cf. Sections 1.2.5.6.1, 1.4.5.3 et 4.2.6).

Les filtres électrostatiques doivent parfois être arrêtés pour des raisons de sécurité lorsque les niveaux de CO dans les gaz résiduels sont élevés (pics de CO) (cf. également Sections 1.3.4.1.1, 1.4.3.1, 1.4.5.3 et 4.2.6).

Aspects économiques

En 2000, l'investissement pour un filtre électrostatique neuf pour un four d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour, avec des niveaux d'émission initiaux pouvant atteindre 500 g/Nm³ et 10-50 mg de poussières/Nm³ dans les gaz épurés, variait de 1,5 à 3,8 millions d'euros, auxquels s'ajoutent le cas échéant, 0,6 à 0,8 million d'euros pour l'installation de la tour de conditionnement et le ventilateur du filtre. Le coût d'exploitation du filtre électrostatique de ce four était de 0,1 à 0,2 euro/tonne de clinker. Pour un refroidisseur à clinker associé à un four d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour, avec des niveaux initiaux d'émission pouvant atteindre 20 g de poussières/Nm³ (10-50 mg/Nm³ dans les gaz épurés) et pour un broyeur à boulets d'une capacité de 160 tonnes de ciment/heure, des niveaux initiaux d'émission pouvant atteindre 300 g de poussières/Nm³ et 10-50 mg/Nm³ dans les gaz épurés, l'investissement dans un filtre électrostatique variait de 0,8 à 1,2 million d'euros et le coût d'exploitation est de 0,09 à 0,18 euro/tonne de clinker.

En 2006, on rapportait un investissement compris entre 4,5 et 6 millions d'euros pour le dépoussiérage des gaz résiduels d'un four (3 000 t/j). Ce grand écart s'explique par les coûts de fabrication locaux, les coûts d'édification (qui varient considérablement) et la taille du four et du filtre électrostatique (selon l'efficacité). Les coûts d'exploitation et d'entretien sont généralement faibles. La différence dépend dans une large mesure de l'évaluation locale de la consommation d'électricité et des coûts d'entretien (cf. également Section 1.3.4.1.1, Tableau 1.24) [76, Allemagne, 2006].

Cf. également Section 1.4.8.1 et Tableau 1.39 pour des exemples de données financières relatives aux techniques de réduction des émissions de poussières.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exigences d'hygiène et de sécurité sur le lieu de travail. Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[3, Autriche, 1997], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [10, Cementa AB/Hagström, 1994], [12, Pays-Bas, 1997], [27, Université de Karlsruhe, 1996], [76, Allemagne, 2006], [86, EURITS, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006] [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.4.3.2 Filtres à manches

Description et avantages pour l'environnement

Les filtres à manches sont efficaces pour collecter les poussières. Le principe de base d'un filtre à manches consiste à utiliser une membrane en tissu perméable aux gaz mais retenant les poussières. L'élément filtrant est disposé géométriquement, mais on distingue les manches cylindriques (suspendues verticalement), illustrées sur la Figure 1.60, des poches qui s'installent horizontalement. Dans un premier temps, les poussières se déposent sur les fibres en surface et à l'intérieur du tissu mais comme une couche de poussière se forme à la surface du filtre, la poussière devient le principal élément filtrant. Les gaz de dégagement peuvent circuler de l'intérieur de la manche vers l'extérieur ou l'inverse. Au fur et à mesure que la couche de poussière s'épaissit, la résistance au passage des gaz augmente ; c'est pourquoi le filtre doit être nettoyé régulièrement pour contrôler la perte de charge dans le filtre. Il existe plusieurs méthodes de nettoyage, mais les plus courantes sont le contre-courant à jets d'air comprimé (filtres à jet d'air pulsé), le frappage ou le battage mécanique et le nettoyage par vibration. Un filtre à manches doit avoir plusieurs compartiments isolés les uns des autres en cas de rupture d'une manche ; elles doivent être suffisamment nombreuses pour que le filtre conserve son efficacité si l'une d'elles est percée. Chaque compartiment doit être muni d'un « détecteur de manche percée » indiquant qu'il faut la remplacer, si nécessaire.

Les manches sont disponibles dans une gamme de tissus tissés et non tissés. Pour les applications à température élevée, il faudra utiliser d'autres tissus que ceux « couramment » disponibles. Il en existe une gamme très satisfaisante. Les tissus synthétiques modernes peuvent supporter des températures assez élevées (jusqu'à 280 °C). Le Tableau 1.32 détaille les principales caractéristiques des différents filtres à manches ainsi que leurs coûts.



Figure 1.60 : Exemple de filtre à manches et de matière filtrante utilisés dans une cimenterie du Royaume-Uni
[82, CEMEX Rugby, Royaume-Uni, 2006]

Effets croisés

La consommation d'électricité augmente avec l'efficacité de traitement des poussières. Plus d'air comprimé pour le nettoyage.

Les opérations de maintenance peuvent produire des déchets supplémentaires. L'utilisation de filtres lamellaires frittés peut générer des émissions sonores.

Données d'exploitation

Les tissus synthétiques modernes incluent des matériaux qui peuvent supporter des températures assez élevées (jusqu'à 280 °C). Le taux de filtration se situe généralement entre 0,5 et 2,0 m/min. Avec une efficacité de séparation pouvant être supérieure à 99,9 %, il est donc possible d'atteindre des niveaux d'émissions inférieurs à 5 mg/Nm³ avec des filtres à manches bien conçus et bien entretenus (gaz sec, 273 K, 10 % O₂). Outre la poussière, les filtres à manches éliminent aussi les substances adsorbées par les particules de poussière, comme les dioxines et les métaux, le cas échéant.

Le Tableau 1.32 détaille les principales caractéristiques des différents filtres à manches ainsi que leurs coûts :

Application technique des fibres dans les procédés de fabrication du ciment et dans les cimenteries											
Types de fibres (marques non citées)		Température (°C)		Résistance aux acides	Résistance aux éléments alcalins (la plupart)	Hydrolyse/Humidité chaude	Oxydation/oxygène > 13 %	Résistance à l'abrasion pour les cimenteries	Efficacité de filtration sans traitement de surface	Traitement de surface chimique et mécanique pour une meilleure filtration et des économies	Coût relatif spécifique
		Nominale	Max.								
Coton		80	80	Faible	Bonne			Bonne	Très bonne		Faible
Polypropylène	PP	90	100	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Bonne	Pas nécessaire pour les applications	Faible
Laine				Moyenne	Faible				Très bonne		Faible
Polyester	PES	150	160	Faible	Moyenne	Faible	Excellente	Excellente	Bonne	Oui pour le procédé, non pour les silos de collecteurs de poussières diffuses	Faible
Copolymère polyacrylonitrile	PAN	110	120	Bonne	Moyenne	Excellente	Excellente	Bonne	Bonne		Faible
Homopolymère polyacrylonitrile > 95 %		125	135						Bonne		Faible
Nylon			205	Faible à moyenne	Excellente			Excellente	Excellente		
Aramide (méta)/polyamide aromatique	AR/PA	180	200	Moyenne	Bonne	Moyenne	Excellente	Bonne	Bonne	Oui pour les applications de traitement des gaz du procédé	Moyen
Polyphénylène Sulphide	PPS	180	200	Excellente	Excellente	Bonne	Faible	Bonne	Bonne		Moyen
Polyimide	PI	180	240	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Bonne	Bonne	Excellente	Non nécessaire en raison de la structure de la fibre	Élevé
Tissu de fibres de verre	GF	280	280	Bonne, sauf HF	Excellente	Excellente	Excellente	Faible	Moyenne	Faible vitesse de filtration recommandée	Moyen
Fibre de verre avec membrane en PTFE (expansé)	GF+Mem.	260	280					Moyenne	Supérieure	Inclus en raison de la membrane	Élevé
polytétrafluoréthylène ★★★★★											
Polytétrafluoroéthylène	PTFE	250	260	Supérieure	Supérieure	Supérieure	Supérieure	Moyenne	Faible	Fortement recommandé	Très élevé
Le tableau indique le coût moyen pour des achats en grandes/moyennes quantités, caractéristiques des cimenteries. Le coût variera en fonction de la consommation d'énergie et de l'élément filtrant.											
Fourchettes de coûts	Faible	jusqu'à 10 euros par m² de tissu filtrant, sortie d'usine, conditionné, non monté									
	Moyen	de 10 à 20 euros par m² de tissu filtrant, sortie d'usine, conditionné, non monté									
	Élevé	de 20 à 40 euros par m² de tissu filtrant, sortie d'usine, conditionné, non monté									
	Très élevé	plus de 40 euros par m² de tissu filtrant, sortie d'usine, conditionné, non monté									

Tableau 1.32 : Caractéristiques principales de différents éléments filtrants et coûts
 [86, EURITS, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006] [134, CEMBUREAU/Federhen, 2007]

Applicabilité

Cette mesure/technique peut en principe s'appliquer à l'industrie du ciment et peut être utilisée dans presque toutes les applications des fours à ciment pour collecter les poussières des gaz résiduels du four, du gaz de bypass ou de l'air rejeté des grilles des refroidisseurs. La documentation technique disponible n'indique pas de restriction concernant l'applicabilité des filtres à manches aux différents procédés utilisés dans l'industrie de la fabrication du ciment. Il convient toutefois de tenir compte du taux d'humidité et de la température.

La performance des filtres à manches est fortement influencée par différents facteurs, tels que la compatibilité de l'élément filtrant avec les caractéristiques des gaz résiduels et des poussières, ses propriétés adéquates de résistance thermique, physique et chimique (hydrolyse, acide, élément alcalin et oxydation) et la température. La surface de filtration, l'efficacité de séparation et la résistance à la filtration (autrement dit la « pression différentielle du filtre ») sont autant de caractéristiques importantes pour un filtre. Ces valeurs dépendent des propriétés de l'élément filtrant et des poussières. Le paramètre servant de base à la conception d'un filtre est le débit volumétrique. Il convient donc de définir le degré de filtration qui dépend du type, de la quantité et des propriétés des poussières et du gaz.

Les contraintes thermiques et mécaniques ont une incidence sur la durée de vie, la consommation d'énergie et les besoins d'entretien. Le débit du gaz, l'épaisseur de la couche de poussière, la porosité et le cycle de nettoyage peuvent affecter l'efficacité de traitement des poussières. Des améliorations telles qu'une réduction de la perte de charge dans le filtre, la détection rapide des éventuelles fuites grâce à un contrôle continu et à des détecteurs ainsi que les systèmes de nettoyage prolongent la durée de vie du filtre et font baisser les coûts. En outre, les cycles et méthodes de nettoyage de la matière filtrante peuvent affecter l'efficacité du système de nettoyage. Des essais ont montré que l'utilisation par exemple d'un système de nettoyage à jet basse pression permet de renforcer l'efficacité tout en réduisant la consommation d'énergie et les émissions sonores. Ce système peut être utilisé pour le dépoussiérage aussi bien des gaz résiduels des fours rotatifs que des rejets en éléments alcalins du bypass, du refroidisseur à clinker, des broyeurs et des classificateurs.

Les refroidisseurs à clinker peuvent également bénéficier de cyclones en plus des filtres à manches. Dans un séparateur à cyclones/centrifuge, les particules de poussières à éliminer des effluents gazeux sont projetées sur la paroi extérieure de l'unité par une force centrifuge, puis éliminées à travers une ouverture située au fond de l'unité. Il existe deux moyens de développer les forces centrifuges : en orientant le flux de gaz dans un mouvement tourbillonnaire descendant à travers une cuve cylindrique (séparateurs à cyclones) ou en faisant tourner le compresseur centrifuge installé dans l'unité (séparateurs centrifuges mécaniques). Dans l'industrie du ciment, les cyclones sont associés à un échangeur thermique à air pour abaisser la température et à un filtre à manches pour dépoussiérer par exemple les gaz résiduels de refroidissement. Un cyclone peut réduire la concentration en poussières de 70 % et, combiné avec un échangeur thermique à air et un filtre à manches, il peut atteindre une efficacité de nettoyage élevée pouvant atteindre 99,99 % avec de faibles niveaux d'émission de 5 à 7 mg/Nm³. Cette installation requiert toutefois un espace suffisant en raison des grandes dimensions du cyclone (par exemple 25 m de long, 6,4 m de haut et 6,4 m de diamètre) et de l'échangeur thermique associé. Elle entraîne en outre une augmentation de la consommation d'électricité, mais la collecte et la valorisation des poussières séparées peut induire une réduction de la consommation de matières premières [148, Reitemeier, 2005].

Des filtres lamellaires frittés sont parfois utilisés comme éléments filtrants, toutefois pas pour des applications de four à ciment. Il est connu par expérience que les lamelles frittées sont très robustes et nécessitent peu d'entretien en raison de leur forme frittée et compacte et de leur revêtement spécial en PTFE. Une très haute efficacité de dépoussiérage des effluents gazeux associée à de faibles pertes de charge et à une grande résistance à l'abrasion constituent les principaux avantages de cet élément filtrant moderne. La géométrie du filtre garantit une structure très compacte qui autorise une installation même dans des espaces restreints. Les émissions sonores peuvent être réduites à l'aide d'un capot antibruit [144, Adlhoj, 1996].

Aspects économiques

L'investissement nécessaire pour installer un filtre à manches neuf sur un four d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour, avec un niveau initial d'émissions pouvant atteindre 500 g de poussières/Nm³ et 10 à 50 mg/Nm³ dans les gaz épurés varie de 1,5 à 6 millions d'euros, auxquels peuvent s'ajouter 0,6 à 0,8 million d'euros pour une tour de conditionnement et un ventilateur pour le filtre. Pour une efficacité de dépoussiérage des gaz résiduels du four supérieure à 99,9 %, l'investissement dans une installation à filtres à manches peut aller de 4 à 8 millions d'euros en fonction du type et du nombre de manches.

Le coût de l'entretien peut être faible et ne pas excéder 10 euros par Nm² de manche comme l'indique le Tableau 1.32. Cependant, les filtres des gaz résiduels du four peuvent contenir plusieurs milliers de manches et une grande surface de tissu filtrant correspond à plusieurs milliers de Nm². Les coûts d'exploitation et d'entretien varient dans une large mesure en fonction de l'évaluation locale de la consommation d'électricité et des coûts d'entretien (cf. également Section 1.3.4.1.1 et Tableau 1.24).

Des tours de conditionnement sont généralement installées pour obtenir les températures nécessaires au bon fonctionnement des filtres à manches. Le coût d'exploitation d'un filtre à manches pour ce type de four est de 0,10 à 0,35 euro par tonne de clinker. Un filtre à manches à jets d'air pulsé, avec échangeur de chaleur air/air et ventilateur, pour un refroidisseur à clinker à grilles associé à un four d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour, avec un niveau de poussières initial pouvant atteindre 20 g /Nm³ et 10 à 50 mg/Nm³ dans les gaz épurés coûte de 1,0 à 1,4 million d'euros et le coût d'exploitation est de 0,10 à 0,15 euro par tonne de clinker. Pour un broyeur à boulets capable de produire 160 tonnes de ciment/heure, avec un niveau de poussières initial pouvant atteindre 300 g/Nm³ et 10 à 50 mg/Nm³ dans les gaz épurés, l'investissement dans un filtre à manches à jets d'air pulsé s'élève à 0,3 - 0,5 million d'euros, ventilateur du filtre compris, et le coût d'exploitation est de 0,03 à 0,04 euro par tonne de clinker [9, CEMBUREAU, novembre 1997].

En vue d'optimiser les coûts d'exploitation, plusieurs cimenteries ont installé des systèmes de nettoyage à jet optimisés. La charge surfacique du filtre, sa pression différentielle et le système de nettoyage sont les trois principaux facteurs ayant une incidence sur la réduction du coût des filtres à manches. Étant donné que ces paramètres s'influencent mutuellement, l'objectif est d'atteindre le rapport air : tissu le plus élevé possible, la pression différentielle la plus basse possible et la pression de nettoyage la plus faible possible. Des réductions du coût total (investissement et coût d'exploitation) de 12 à 25 % ont été signalées.

Cf. également le Tableau 1.32 ci-dessus qui détaille les principales caractéristiques des différents filtres à manches ainsi que leurs coûts. En outre, cf. également Section 1.4.8.1 et Tableau 1.39 pour des exemples de données financières relatives aux techniques de réduction des émissions de poussières.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exigences d'hygiène et de sécurité sur le lieu de travail.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27 ; cimenterie de Dudfield, Afrique du Sud (cyclone associé à un échangeur thermique air/air et à des filtres à manches), cimenterie en Allemagne (filtres lamellaires frittés).

[3, Autriche, 1997], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [12, Pays-Bas, 1997], [76, Allemagne, 2006], [81, Castle Cement UK, 2006], [86, EURITS, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006], [134, CEMBUREAU/Federhen, 2007], [144, Adlhoch, 1996], [145, Leibinger/Köberl, 2001], [146, Leibinger/Neumann, 2003], [147, Marmor/Petzold, 2006], [148, Reitemeier, 2005], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.4.3.3 Filtres hybrides

Description et avantages pour l'environnement

Les filtres hybrides sont la combinaison de filtres électrostatiques et de filtres à manches dans le même dispositif. Ils sont généralement le résultat de la conversion de filtres électrostatiques existants. Ils permettent une réutilisation partielle de l'ancien équipement. La Figure 1.61 illustre le principe d'un filtre hybride.

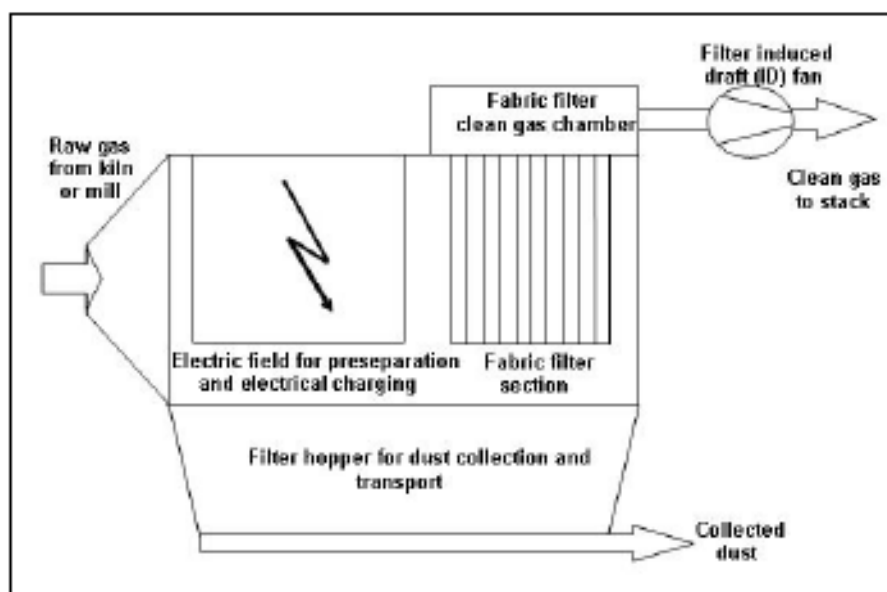


Figure 1.61 : Filtre hybride pour la collecte des poussières
[135, CEMBUREAU/Federhen, 2007]

Effets croisés

De hauts niveaux de concentration en CO entraînent l'apparition d'un risque d'explosion (pics de CO). Les opérations de maintenance peuvent produire des déchets supplémentaires. Réduction de la consommation d'eau par rapport aux filtres électrostatiques.

Réduction du volume des pertes/déchets de procédé par rapport aux filtres à manches.

Données d'exploitation

Les chiffres rapportés des émissions de poussières des filtres hybrides s'échelonnent de <10 à 20 mg/Nm³ comme moyenne journalière (cf. Section 1.3.4.1.1). Cependant, des émissions de poussières inférieures à 10 mg/Nm³ sont possibles avec des filtres à manches bien entretenus (cf. Section 1.4.4.3.2).

Applicabilité

Les mesures/techniques sont en principe applicables à l'industrie du ciment.

Aspects économiques

Cf. également Section 1.4.8.1 et Tableau 1.39 pour des exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des émissions de poussières.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.
Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries de Sagunto et de Gador en Espagne, cimenteries dans l'UE des 27.

[86, EURITS, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006], [135, CEMBUREAU/Federhen, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5 Composés gazeux**1.4.5.1 Réduction des émissions de NO_x**

L'application d'une ou d'un ensemble de mesures/techniques primaires ou secondaires, ou les deux intégrées aux process est jugée appropriée en vue de réduire ou de maîtriser les émissions de NO_x. Les mesures/techniques primaires sont les suivantes :

- refroidissement de la flamme, par exemple déchets liquides/solides avec une haute teneur en eau,
- brûleurs bas NO_x,
- chauffe en milieu de four,
- addition de minéralisateurs pour améliorer l'aptitude à la cuisson du cru (clinker minéralisé),
- combustion étagée (combustibles conventionnels ou déchets) également conjointement avec un précalcinateur et l'utilisation d'une combinaison de combustibles optimale,
- optimisation du procédé.

Exemples de mesures/techniques secondaires pouvant en outre être utilisées pour la réduction des NO_x :

- Technique SNCR et technique SNCR haute efficacité,
- Technique SCR.

Pour des raisons environnementales, sécuritaires et économiques, le procédé de réduction des émissions de NO_x doit commencer de préférence par la mise en œuvre de mesures/techniques primaires générales (mesures/techniques de régulation intégrées aux process, combustion étagée, refroidissement de la flamme, amélioration de la technique de cuisson, optimisation des liaisons des refroidisseurs et sélection des combustibles) qui permettent également de réduire les émissions de NO_x (par exemple, utilisation de déchets sélectionnés). Certains fours bien optimisés, équipés de préchauffeurs et de préchauffeurs/précalcinateurs, parviennent à abaisser le niveau de leurs émissions de NO_x au-dessous de 500 mg/Nm³ grâce à des mesures/techniques primaires appliquées seules ou conjointement avec la combustion étagée ainsi que grâce à l'association d'une combinaison de combustibles et de mesures/techniques intégrées aux process. La qualité des matières premières, comme l'aptitude à la cuisson des crus, les combinaisons de combustibles et la configuration du four peuvent constituer des obstacles pour parvenir à ce niveau de réduction. Cependant, dans de nombreuses cimenteries de l'UE des 27 (42 % en 2008), la technique SNCR est utilisée conjointement avec des mesures/techniques primaires de réduction des émissions de NO_x comme le montre le Tableau 1.33 [76, Allemagne, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006]. En outre, deux cimenteries utilisent la technique SCR (configuration avec forte teneur en poussières).

Le Tableau 1.33 présente le nombre connu d'installations en grandeur réelle dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire) qui utilisent des mesures/techniques de réduction des émissions de NO_x.

Mesures/techniques de réduction/régulation des émissions de NO _x						
Pays		Refroidissement de la flamme	Clinker minéralisé	Combustion étagée	SNCR	SCR
Belgique	BE	2			2	
Bulgarie	BG					
République tchèque	CZ				2 ³⁾	
Danemark	DK		2		1	
Allemagne	DE			7	33	1 ¹⁾
Estonie	EE					
Grèce	EL			1		
Espagne	ES		4	2	3 + 5 (phase pilote)	
France	FR	2		7	14 + 4 ⁶⁾	
Irlande	IE			1	2 ⁵⁾	
Italie	IT	2		7	16 ¹⁾	1 ²⁾
Chypre	CY					
Lettonie	LV					
Lituanie	LT					
Luxembourg ¹⁾	LU					
Hongrie	HU				3	
Malte	MT					
Pays-Bas	NL				1	
Autriche	AT	3		2	8 ³⁾	
Pologne	PL			9		
Portugal	PT	6			4	
Roumanie	RO					
Slovénie	SI					
Slovaquie	SK					
Finlande	FI				2	
Suède	SE				3	
Royaume-Uni	UK			1	9 ⁴⁾	
Suisse	CH	2	1	1	4	
Norvège	NO					
Turquie	TR	1	1	2		
1) Signalée en service, mais données indisponibles 2) L'une est en service depuis 2006 et l'autre depuis 2007 3) Ouverture prévue en 2008 4) Mise en service en 2007 5) Mise en service prévue en 2007 6) Ouverture prévue en 2008						

Tableau 1.33 : Mesures/techniques de réduction des émissions de NO_x utilisées dans l'industrie cimentière des pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+
[85, CEMBUREAU, 2006]

Le Tableau 1.34 donne une vue d'ensemble des mesures/techniques de réduction des émissions de NO_x liées à la fabrication du ciment (effets positifs pas nécessairement cumulés). Le tableau récapitule les données d'exploitation mentionnées dans cette section et doit être examiné conjointement avec les sections correspondantes ci-après.

Mesure/technique	Applicabilité au type de four	Efficacité de la réduction (%)	Données sur les émissions ¹⁵⁾		Données financières ³⁾	
			mg/Nm ³ 1)	kg/t ²⁾	Investissement (million(s) d'euros)	Exploitation euro(s)/t de clinker
Refroidissement de la flamme ⁵⁾	Tous	0 – 35	Primaires réduites à <500 – 1000 ⁹⁾	1,15 – 2,3	Jusqu'à 0,2	Jusqu'à 0,5
Brûleur bas NOx	Tous	0 – 35	500 – 1 000	1,15 – 2,3	Jusqu'à 0,45	0,07
Mesures/techniques primaires EGTEI 2003 ⁴⁾	Tous	25	1 400 réduites à 1 050	2,4	0,25	0,056
Chauffe en milieu de four	Longs	20 – 40	Aucune information	-	0,8 – 1,7	Aucune information
Clinker minéralisé	Tous	10 – 15	Aucune information	-	Aucune information	Aucune information
Combustion étagée	Précalcinateur	10 – 50	<450 – 1 000 ⁹⁾	1,04–2,3	0,1 – 2	Aucune information
	Préchauffeur				1 – 4	
SNCR ^{4) 5) 6) 12)}	Préchauffeur et précalcinateur	30 à 90 ¹⁰⁾	<200 ^{10, 11)} – 500 ¹⁴⁾	0,4 – 1,15	0,5 – 1,2	0,1 – 1,7
	Préchauffeur à grilles	35	<500 ¹⁶⁾ – 800 ^{5, 6)}	1,15 – 1,84	0,5	0,84
SCR ⁷⁾	Potentiellement tous, préchauffeur et précalcinateur	43 ¹³⁾ – 95	<200 ⁸⁾ – 500	0,23 – 1,15	2,2 – 4,5	0,33 – 3,0

1) Pour des moyennes journalières, mesurées sur gaz secs, 273 K, 101,3 kPa et 10 % d'O₂
2) kg/tonne de clinker : sur la base de 2 300 m³/tonne de clinker
3) Normalement pour un four produisant 3 000 tonnes de clinker/jour et un niveau initial d'émissions de 2 000 mg NOx/Nm³
4) Estimation des coûts EGTEI pour un four d'une capacité de 1100 t/j en 2000
5) Expérimentation en France en coopération avec le ministère de l'Environnement, l'ADEME et l'ATILH en 2000 (publication 2003)
6) Contribution CEMBUREAU à la réduction des émissions de NOx en 2006, moyennes annuelles, cf. Section 1.3.4.2 et Figure 1.29
7) Allemagne et Italie, cf. également Tableaux 1.35 et 1.36, données financières basées sur un four d'une capacité de 1 500 m³/tonne de clinker
8) Résultats d'un essai pilote en Allemagne, en Italie et en Suède et résultats d'un essai réalisé en 2007 (200 mg/Nm³) dans une cimenterie italienne utilisant la SCR ; en 1997, deux fournisseurs en Europe proposaient une unité de SCR en grandeur réelle à l'industrie du ciment avec des niveaux de performance garantis de 100 à 200 mg/Nm³
9) Résultats d'un essai réalisé dans une cimenterie française (projet 10), four à précalcinateur, niveau d'émissions de NOx initial de 1 000 mg/Nm³ et obtenu de 800 mg/Nm³
10) Cimenteries suédoises, moyenne annuelle, niveau initial de NOx de 800 à 1 000 mg/Nm³, fuite d'ammoniac de 5 à 20 mg/Nm³ (cf. Section 4.2.4.1), SNCR haute efficacité, la fuite d'ammoniac doit être prise en considération
11) Allemagne : 200 – 350 mg/Nm³ comme moyenne journalière, la fuite d'ammoniac doit être prise en considération
12) La plage d'émissions de NOx inférieure peut entraîner une augmentation des émissions de NH₃ (fuite d'ammoniac), selon le niveau de NOx dans le flux de gaz brut
13) Résultats d'un essai pilote et de la conduite à long terme de l'unité de démonstration, cf. Tableau 1.35
14) Conjointement avec des mesures/techniques intégrées aux process ; niveau initial de NOx de 1 200 mg/Nm³ ; le Guide d'actions de réduction des NOx de l'industrie cimentière française, France/ADEME/MEDD
15) Les données sur les émissions se trouvent dans le paragraphe correspondant de cette section.
16) [92, Autriche, 2006], [185, Hackl und Mauschitz, 2003], cf. également BAT 17

Tableau 1.34 : Mesures/techniques de réduction des émissions de NO_x dans la fabrication du ciment [12, Pays-Bas, 1997], [76, Allemagne, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [92, Autriche, 2006], [101, France/ADEME/MEDD, 2002], [114, Suède, 2006], [140, Italie, 2007], [141, Leibacher/Bellin/Linero, 2007], [173, Allemagne, 2007], [182, TWG CLM, 2008], [185, Hackl und Mauschitz, 2003]

1.4.5.1.1 Refroidissement de la flamme

Description

L'addition d'eau au combustible ou directement dans la flamme à l'aide de différentes méthodes d'injection, illustrées dans la Figure 1.62, comme l'injection d'un fluide (liquide) ou de deux fluides (liquide et air comprimé ou solides) ou l'utilisation de déchets liquides/solides avec une forte teneur en eau abaisse la température et augmente la concentration en radicaux hydroxyles. Cela peut avoir un effet positif sur la réduction des NO_x dans la zone de clinkérisation.

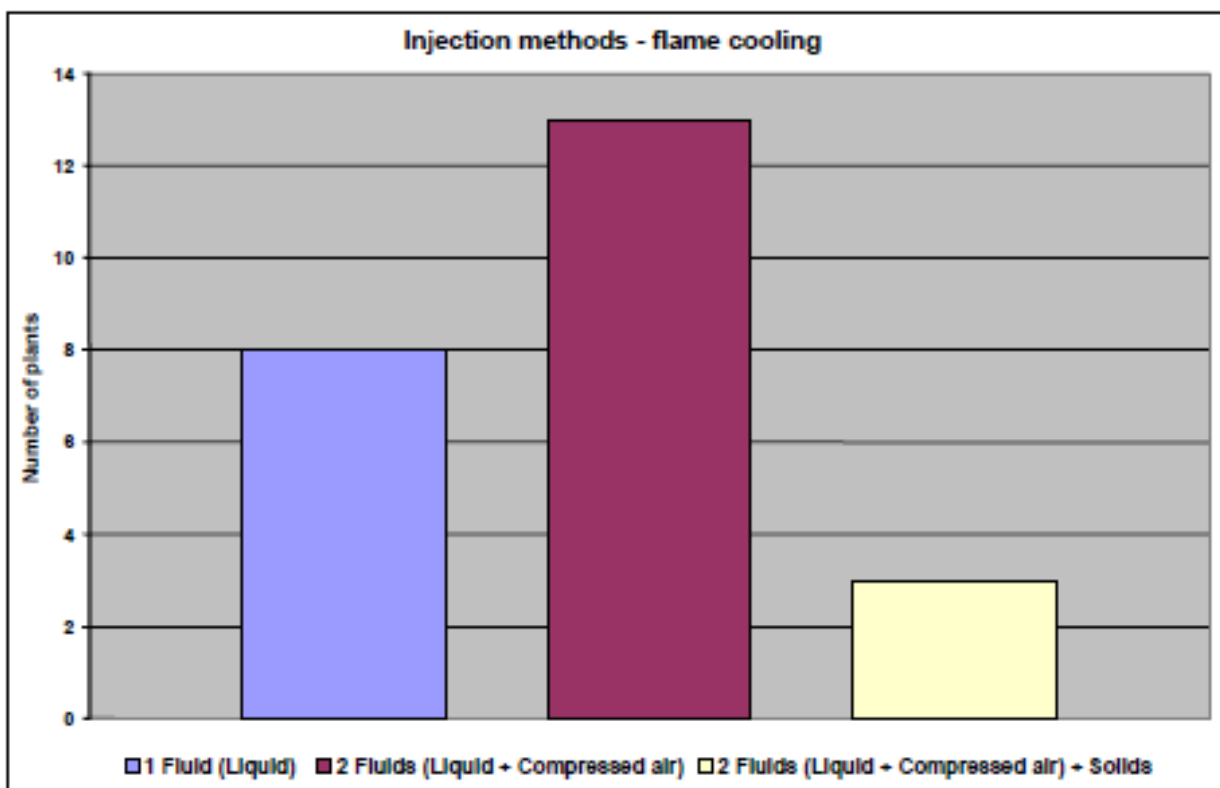


Figure 1.62 : Méthodes d'injection employées pour le refroidissement de la flamme en cimenterie dans les pays de l'UE des 23+
[85, CEMBUREAU, 2006]

Avantages pour l'environnement

Réduction des NO_x dans la zone de chauffe.

Réduction des émissions de NO_x .

Effets croisés

L'évaporation de l'eau peut nécessiter un apport de chaleur complémentaire, ce qui provoque de nouvelles émissions de CO_2 (de 0,1 à 1,5 %) qui restent cependant très faibles par rapport à la totalité des émissions de CO_2 du four.

L'efficacité énergétique du procédé de chauffe du four diminue.

L'injection d'eau peut perturber la marche du four, comme une réduction de la production, et peut affecter la qualité du clinker.

Données d'exploitation

Des taux/efficacités de réduction de l'ordre de 10 à 35 % ont été signalés. Des plages d'émissions de <500 à $1\,000 \text{ mg/Nm}^3$ ont été rapportées (moyennes annuelles) (cf. Section 1.3.4.2, Figures 1.27 et 1.28).

Applicabilité

Le refroidissement de la flamme peut s'appliquer à tous les types de fours utilisés dans la fabrication du ciment. Comme illustré dans la Figure 1.63, près de 40 fours à préchauffeur à suspension sont équipés d'un dispositif de refroidissement de la flamme.

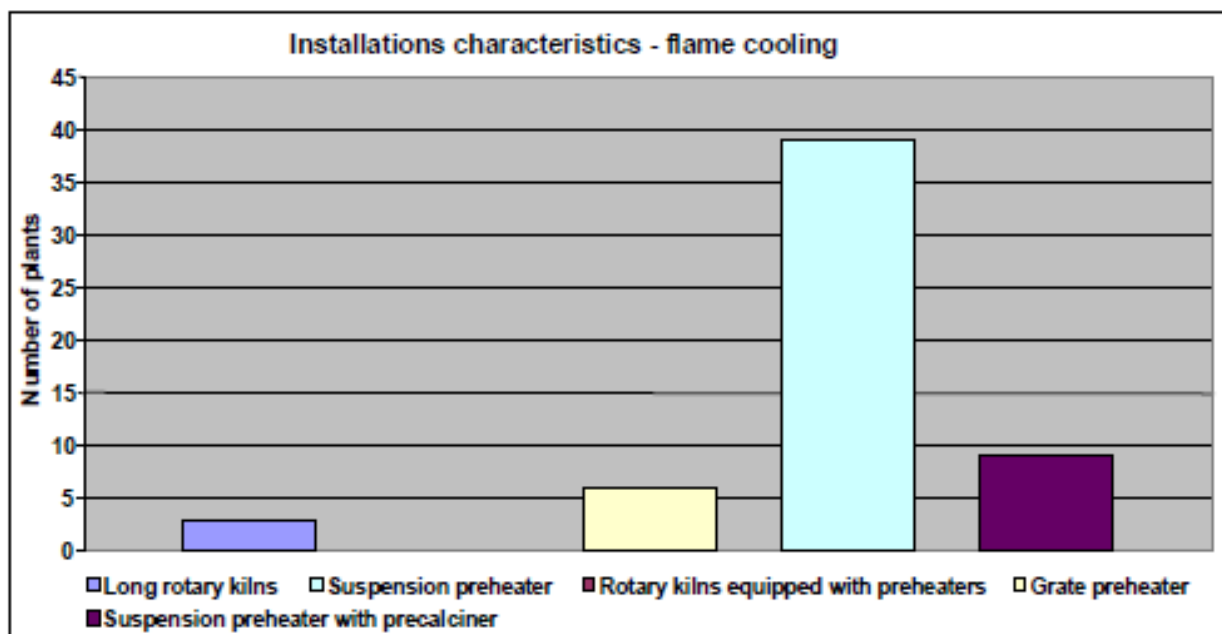


Figure 1.63 : Caractéristiques d'installations incluant le refroidissement de la flamme dans les pays de l'UE des 23+

[85, CEMBUREAU, 2006]

Aspects économiques

Pour un four produisant 3 000 t/j, l'investissement peut s'élever à 0,2 million d'euros et les coûts d'exploitation à 0,25 euro par tonne de clinker. En outre, comme le montre le Tableau 1.34, afin de parvenir à une efficacité de réduction des émissions de NO_x pouvant atteindre 35 %, un investissement s'élevant à 0,2 million d'euros et des coûts d'exploitation de 0,5 euro/t de clinker ont été signalés.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[8, CEMBUREAU, 2001], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [76, Allemagne, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.1.2 Brûleurs bas NO_x

Description et avantages pour l'environnement

La conception des brûleurs bas NO_x (chauffe indirecte) varie dans les détails, mais pour l'essentiel, le combustible et l'air sont injectés dans le four par des conduites concentriques. La proportion d'air primaire ne représente plus que 6 à 10 % de ce qui est nécessaire dans une combustion stœchiométrique (en règle générale, 10 à 25 % dans des brûleurs classiques). De l'air axial est injecté à grande vitesse dans la conduite extérieure. Le charbon peut être injecté par la conduite centrale ou par la conduite intermédiaire. Une troisième conduite sert à injecter un flux d'air tourbillonnaire mis en mouvement par des aubes situées à la sortie ou avant la sortie de la cane d'alimentation en combustible.

Cette conception de brûleur provoque une inflammation très rapide, en particulier des composés volatils du combustible dans une atmosphère appauvrie en oxygène, ce qui tend à réduire la formation de NO_x.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

Dans certaines installations bien conçues, des réductions de 35 % du niveau des émissions de NO_x ont été obtenues ainsi que des niveaux d'émissions de 500 à 1 000 mg/Nm³ (moyenne journalière).

Applicabilité

Ce type de brûleurs peut être monté sur tous les fours rotatifs, dans le four comme dans le précalcinateur. Cependant, la mise en place de brûleurs bas NO_x n'est pas toujours suivie d'une réduction des émissions de NO_x.

L'installation du brûleur doit être optimisée. Si la tuyère initiale fonctionne avec un pourcentage d'air primaire faible, l'effet d'une tuyère bas NO_x sera marginal.

Aspects économiques

Une tuyère bas NO_x neuve exige un investissement de 150 000 à 450 000 euros pour un four produisant 3 000 tonnes de clinker/jour. Cependant, le remplacement d'un brûleur par une tuyère bas NO_x peut représenter un investissement de 600 000 euros, sans compter si nécessaire les travaux d'adaptation du stockage et du dosage du charbon. Si l'installation existante utilise la combustion directe, il convient de la remplacer par une installation à combustion indirecte pour permettre la combustion avec un faible débit d'air primaire pour la combustion, ce qui représente un investissement supplémentaire de 600 000 à 800 000 euros pour un four produisant 3 000 tonnes de clinker/jour.

Cf. également Tableaux 1.39 et 1.40 (Section 1.4.8.2) pour des exemples de coûts.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [12, Pays-Bas, 1997], [20, Rother, janvier 1996,] [76, Allemagne, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [101, France/ADEME/MEDD, 2002], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.1.3 Combustion étagée

Description et avantages pour l'environnement

La combustion étagée est utilisée dans les fours à ciment possédant un précalcinateur spécifiquement conçu. Le premier étage de la combustion est le four rotatif où les conditions de cuisson du clinker sont optimales. Le deuxième étage est un brûleur situé à l'entrée du four ; il crée une atmosphère réductrice qui décompose une partie des oxydes d'azote formés dans la zone de clinkérisation. La température élevée de cette zone favorise la reconversion des NO_x en azote élémentaire. Au troisième étage, le combustible est introduit dans le calcinateur avec une certaine quantité d'air tertiaire ce qui crée là aussi une atmosphère réductrice. Ce procédé diminue la formation des NO_x combustibles et les NO_x venant du four. Au quatrième et dernier étage de combustion, le reste d'air tertiaire est introduit dans l'installation en tant qu'air final et utilisé pour la combustion résiduelle.

Les calcinateurs se différencient principalement par l'emplacement de l'arrivée de combustible, par le mode d'alimentation en combustible, en cru et en air tertiaire et par leur configuration géométrique.

La technique de la combustion étagée ne peut en général être utilisée que dans les fours équipés d'un précalcinateur. Les installations de préchauffage avec cyclones, mais sans précalcinateur, exigent des aménagements importants. Si cela ne peut s'accompagner d'une augmentation de la capacité de production, la solution proposée par les fabricants consiste à installer une « petite » conduite d'alimentation en air tertiaire et un calcinateur. Dans ce cas, seule une faible proportion (10 à 25 %) de la quantité totale de chaleur que le four doit fournir passe dans le calcinateur mais cela suffit pour créer une zone réductrice permettant la décomposition des oxydes d'azote.

D'autre part, des expériences menées sur un four où 10 % de la cuisson s'effectue à l'entrée du four montrent que cela ne suffit pas toujours pour produire une zone réductrice suffisante.

L'utilisation de déchets combustibles en morceaux (pneus usagés par exemple) est une variante possible de la technique de la combustion étagée, car ce type de combustible crée un milieu réducteur en brûlant. Dans les fours à précalcinateur/préchauffeur ce type de combustible, qui selon les études aurait un effet positif sur la réduction des NO_x , peut être introduit à l'entrée du four ou dans le précalcinateur (réduction pouvant atteindre 20 à 30 %) [76, Allemagne, 2006]. Il est cependant très difficile de créer une atmosphère réductrice contrôlée en brûlant des combustibles en morceaux [9, CEMBUREAU, novembre 1997].

Effets croisés

Les émissions de CO et de SO_2 peuvent augmenter si le procédé de combustion n'est pas achevé dans le précalcinateur et des problèmes de colmatage et de CO ont été relevés lors d'essais pour atteindre de hauts rendements.

Données d'exploitation

Certaines installations modernes et bien optimisées atteignent des niveaux d'émissions de NO_x inférieurs à 450 mg/Nm^3 (moyenne journalière) avec la combustion à plusieurs étages et en employant une combinaison de combustibles appropriée, comme des combustibles hautement réactifs, alors qu'avec des combustibles faiblement réactifs, on peut atteindre 800 à $1\,000 \text{ mg/Nm}^3$ (moyenne journalière), comme le montre également l'expérience en Espagne. Des réductions des NO_x similaires ont été signalées avec des combustibles secondaires.

Lors de tests réalisés en France en 2002 (par exemple, précalcinateur avec combustion étagée utilisant 100 % de coke de pétrole sulfuré comme combustible), une réduction des émissions de NO_x d'environ 200 mg/Nm^3 a été obtenue avec des niveaux initiaux de $1\,000 \text{ mg/Nm}^3$. Cependant, cette performance n'a pu être maintenue que pendant de courtes périodes lors des essais et en utilisant un cru d'une aptitude à la cuisson optimale. Des conditions de conduite plus extrêmes peuvent permettre de faire baisser les niveaux d'émissions de NO_x . Cependant, ces conditions de conduite entraînent souvent des problèmes de fonctionnement comme un accroissement des accumulations de matière dans les fours et les calcinateurs.

Une augmentation des émissions de CO n'est observée que dans très peu d'usines conçues avec des temps de séjour relativement courts ou lorsque la combustion n'est pas correctement optimisée.

Dans certains cas, les fournisseurs des différents systèmes de combustion étagée indiquaient qu'ils pouvaient permettre de réduire de 50 % la formation de NO_x. Cependant, les valeurs garanties seront difficiles à atteindre à ce niveau de réduction des NO_x quand on limite dans le même temps les émissions de CO.

Applicabilité

La technique de la combustion étagée ne peut en général être utilisée que dans les fours équipés d'un précalcinateur. Les installations de préchauffage avec cyclones, mais sans précalcinateur, exigent des aménagements importants.

Les fours à précalcinateur permettent de régler de manière indépendante les niveaux d'oxydation/réduction dans le four à ciment et dans la chambre de combustion du précalcinateur. L'injection d'une partie du combustible peut entraîner une diminution des émissions de NO_x.

L'ajout de combustible sur la grille du *four Lepol* peut induire une réduction importante des émissions de NO_x, toutefois au risque d'être à l'origine d'autres émissions ou de les augmenter.

Les fours à préchauffeur à cyclones sans précalcinateur permettent de réduire les émissions de NO_x ; cependant, ils peuvent faire augmenter les émissions de SO₂ et de COV en raison de leur zone réductrice localisée. Il convient de surveiller en continu le niveau de ces émissions.

Au Royaume-Uni, un *four long avec combustion étagée en milieu de four* est en service depuis plusieurs années.

Aspects économiques

L'investissement nécessaire pour équiper un four à précalcinateur d'un système de combustion étagée est de 0,1 à 2 millions d'euros, selon la conception du calcinateur existant. L'investissement nécessaire pour installer un précalcinateur et une conduite d'air tertiaire pour un four à préchauffeur avec refroidisseur à grilles d'une capacité de production de 3 000 tonnes/jour est de 1 à 4 millions d'euros. L'investissement nécessaire pour convertir un four à préchauffeur équipé d'un refroidisseur planétaire produisant 3 000 tonnes/jour en un four avec précalcinateur et refroidisseur à grilles est de 15 à 20 millions d'euros.

Cf. également Tableaux 1.34 et 1.40 (Section 1.4.8.2) pour des exemples de coûts.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [12, Pays-Bas, 1997], [42, Billhardt/Kuhlmann/Ruhland/Schneider/Xeller, octobre 1996], [76, Allemagne, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [92, Autriche, 2006], [101, France/ADEME/MEDD, 2002], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008], [185, Hackl und Mauschitz, 2003]

1.4.5.1.4 Chauffe en milieu de four

Description et avantages pour l'environnement

Dans les fours longs en voie humide et sèche, la création d'une zone réductrice par la combustion de combustibles en morceaux peut diminuer les émissions de NO_x. Comme il n'existe pas normalement de zone de température à 900 ou 1 000 °C dans les fours longs, des systèmes de cuisson ont été aménagés en milieu de four pour permettre l'incinération des déchets qui ne peuvent être brûlés par le brûleur primaire, comme par exemple les pneus [9, CEMBUREAU, novembre 1997].

Effets croisés

La vitesse de combustion des déchets combustibles peut faire brûler les chaînes ou bien avoir un effet sur la qualité du produit.

Données d'exploitation

Il existe quelques installations de ce type et des réductions de 20 à 40 % des émissions de NO_x ont été signalées dans certains cas.

Applicabilité

La cuisson en milieu de four peut en principe s'appliquer aux fours rotatifs.

La vitesse de combustion des combustibles peut être déterminante ; si elle est trop lente, une atmosphère réductrice se forme dans la zone de clinkérisation ce qui peut altérer gravement la qualité du produit et si elle est trop élevée, la température dans la zone de chaînage du four peut devenir excessive, ce qui endommage irrémédiablement les chaînes.

Des considérations de conception mécanique font que le combustible ne peut être injecté que par intermittence, à chaque rotation du four. Pour maintenir la continuité de l'apport de chaleur, il est possible d'utiliser des combustibles solides qui brûlent lentement comme les pneus ou d'autres types de déchets en conteneurs.

Une plage de températures inférieure à 1 100 °C exclut l'utilisation de déchets dangereux d'une teneur en chlore supérieure à 1 %.

Aspects économiques

Les coûts d'équipement nécessaires pour convertir le four et l'installation de transfert du combustible peuvent avoisiner de 0,8 à 1,7 million d'euros ; le coût annuel de la main-d'œuvre et de la maintenance peut être du même ordre.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.
Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [21, BCA, octobre 1997], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.1.5 Clinker minéralisé

Description et avantages pour l'environnement

L'apport de minéralisateurs, comme le fluorure, dans la matière première permet d'ajuster la qualité du clinker et d'abaisser la température dans la zone de clinkérisation, ce qui abaisse la température de cuisson et réduit aussi la formation des NO_x.

Effets croisés

Des apports excessifs de fluorure de calcium pourraient entraîner une augmentation des émissions de HF. Besoins énergétiques réduits.

Ces apports pourraient affecter la qualité du produit final.

Données d'exploitation

La réduction de NO_x pourrait atteindre 10 à 15 %, mais des études signalent des réductions de 50 %.

Applicabilité

Cette mesure/technique peut en principe s'appliquer aux fours rotatifs.

Aspects économiques

En fonction du prix des minéralisateurs.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[10, Cements AB/Hagström, 1994], [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

1.4.5.1.6 Optimisation du procédé (NO_x)

Description et avantages pour l'environnement

L'optimisation du procédé, comme la stabilisation et l'optimisation des conditions de fonctionnement du four et de la chauffe, l'optimisation de la régulation de la conduite du four et/ou l'homogénéisation des combustibles introduits, peut servir à réduire les émissions de NO_x. Des mesures/techniques d'optimisation primaires générales (mesures/techniques de régulation de la conduite, amélioration de la technique de chauffe indirecte, optimisation des liaisons des refroidisseurs et de la sélection des combustibles et optimisation des niveaux d'oxygène) ont également été mises en œuvre. Grâce au recours à des mesures/techniques intégrées aux process, des améliorations en matière de réduction des émissions de NO_x ont été observées jusqu'en 2007.

Effets croisés

Besoins énergétiques réduits.

Données d'exploitation

Avec l'application de mesures/techniques d'optimisation du contrôle de procédé, les émissions de NO_x oscillent entre 500 et 1 000 mg/Nm³. Certains fours modernes bien optimisés, équipés de préchauffeurs et de préchauffeurs/précalcinateurs, peuvent parvenir à abaisser les niveaux de leurs émissions de NO_x au-dessous de 500 mg/Nm³ uniquement grâce à des mesures/techniques intégrées au procédé.

Applicabilité

La qualité des matières premières (propriétés de chauffe du cru), la disponibilité de combustibles à forte teneur en matières volatiles et la conception du four sont autant de facteurs pouvant empêcher d'atteindre le niveau indiqué ci-dessus.

Aspects économiques

L'objectif de l'optimisation du procédé est l'amélioration des coûts.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[76, Allemagne, 2006], [101, France/ADEME/MEDD, 2002], [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.1.7 Réduction sélective non catalytique (SNCR)**Description et avantages pour l'environnement**

En 2008, environ 100 unités de SNCR en grandeur réelle fonctionnaient dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ (cf. Glossaire). La réduction sélective non catalytique (SNCR) consiste à injecter de l'eau ammoniacale (jusqu'à 25 % de NH_3), des composés de précurseurs d'ammoniac ou une solution d'urée dans les gaz de combustion pour réduire le NO en N_2 . La réaction est optimale entre 830 et 1 050 °C, et le temps de séjour doit être suffisant pour que les agents injectés aient le temps de réagir avec le NO.

Il convient de mener des expériences en laboratoire et des essais en grandeur réelle afin d'identifier la plage de températures optimale pour l'urée ou l'eau ammoniacale. Cette plage de températures est facile à obtenir dans les fours à préchauffeur à suspension, dans les fours à précalcinateur et dans les fours Lepol. Cependant, des cimenteries utilisant des longs fours rotatifs se sont aussi équipées de la SNCR dans le but de réduire leurs émissions de NO_x . La Figure 1.64 fournit un aperçu des caractéristiques des cimenteries où la SNCR a été mise en œuvre.

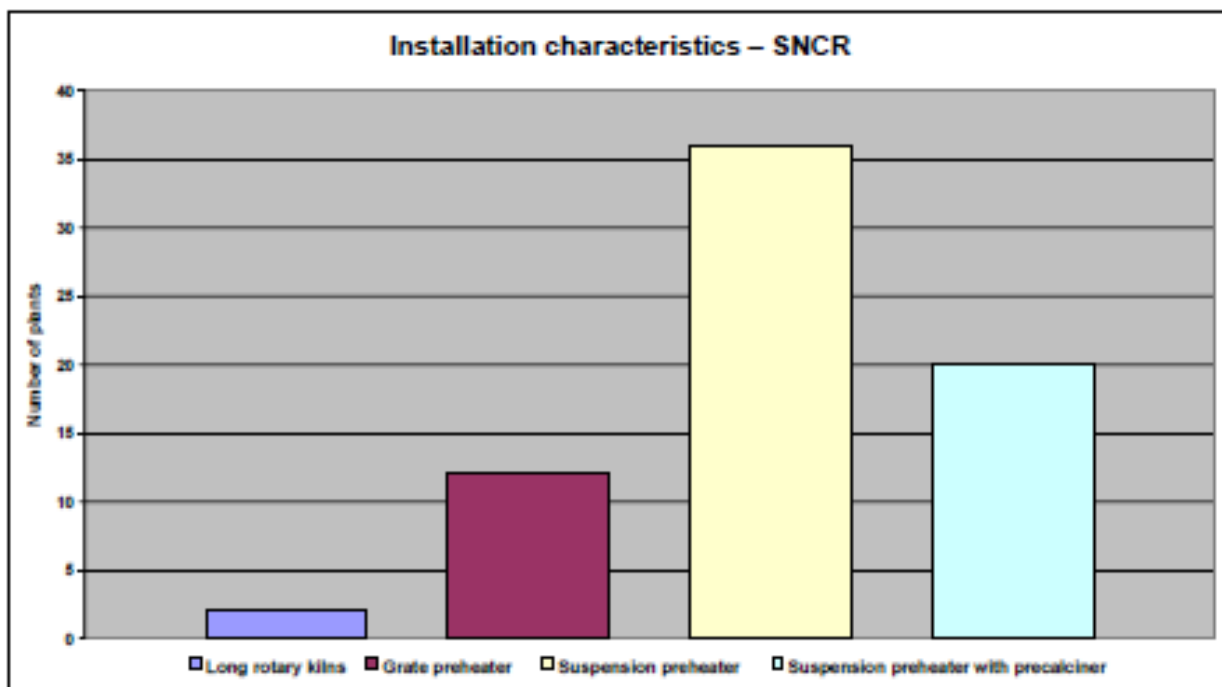


Figure 1.64 : Caractéristiques des cimenteries utilisant la SNCR dans les pays de l'UE des 23+ [85, CEMBUREAU, 2006]

Comme le montre la Figure 1.65, l'agent NH_3 -X le plus courant est l'urée à hauteur de 32 % suivi de l'eau ammoniacale à hauteur de 27 % [85, CEMBUREAU, 2006]. Il est également possible d'utiliser des solutions aqueuses provenant d'autres procédés de production [76, Allemagne, 2006]. D'autres réducteurs tels que le gaz ammoniac, les solutions de sel d'ammonium, l'urée déshydratée (pastilles d'urée), les solutions d'urée, la chaux nitrurée ou le cyanamide et autres substances similaires peuvent être utilisés à l'échelle industrielle [20, Rother, janvier 1996,]. Les installations de stockage et de transport doivent être conçues compte tenu des propriétés physico-chimiques de l'agent en question et peuvent nécessiter des mesures/techniques de sécurité complémentaires. L'expérience montre que dans la plupart des applications, l'eau ammoniacale est le réducteur le mieux adapté à la SNCR dans les fours avec préchauffeurs et précalcinateurs [9, CEMBUREAU, novembre 1997]. Une bonne distribution stœchiométrique de l'ammoniac est importante pour une réduction optimale des émissions de NO_x et de la fuite en ammoniac. Il convient de tenir compte des points ci-après dans la conception et la mise en application de la SNCR afin d'utiliser au mieux le réactif de réduction injecté (eau ammoniacale ou solution d'urée) et de veiller à l'efficacité de la réduction des NO_x . Ces points garantissent une exploitation technique et économique optimale d'un système SNCR :

- injecter l'agent dans la plage de températures appropriée de 830 à 1 050 °C ; faire en sorte d'éviter toute fuite d'ammoniac ou combustion de l'ammoniac, ceci étant une source potentielle de NO_x secondaires ;
- ajuster l'emplacement des buses en cas de variation de la plage de températures ; il faudra probablement plusieurs rangées de buses pour régler ce problème ; définir éventuellement un profil des températures de l'injection et le surveiller en continu pour répondre à cette exigence ;
- mettre au point l'angle de pulvérisation et la profondeur de pénétration de la solution aqueuse injectée en ajustant :
 - la teneur en eau de la solution ;
 - la pression de l'air de pulvérisation ;
 - l'emplacement de la buse ; et
 - l'orientation de l'ammoniac injecté.

- refroidir de préférence à l'air les buses temporairement non utilisées pour éviter l'usure due à la chaleur ; déposer les buses utilisées que de façon occasionnelle afin d'économiser l'air ;
- s'assurer que la zone d'injection est correctement recouverte de la bonne quantité de solution ammoniacale afin d'éviter une injection sur- ou sous-stœchiométrique. Ceci permet d'éviter toute fuite d'ammoniac indésirable ou du NO non traité bypassant la SNCR ;
- au besoin, mesurer le niveau de NO_x dans chaque colonne de cyclones, le cas échéant, (c'est-à-dire conduits ascendants doubles) et corriger l'injection en conséquence ;
- vérifier la stœchiométrie à travers un bilan massique des NO_x traités par rapport à l'ammoniac injecté de manière à éviter toute injection en excès d'ammoniac. Ceci permet de limiter toute fuite d'ammoniac. De plus, plus la stœchiométrie se rapproche de un, plus les avantages économiques se font ressentir.

La Figure 1.65 montre les différents porteurs d'azote/agents NH₂-X utilisés par la SNCR pour réduire les NO_x dans plusieurs cimenteries des pays de l'UE des 23+.

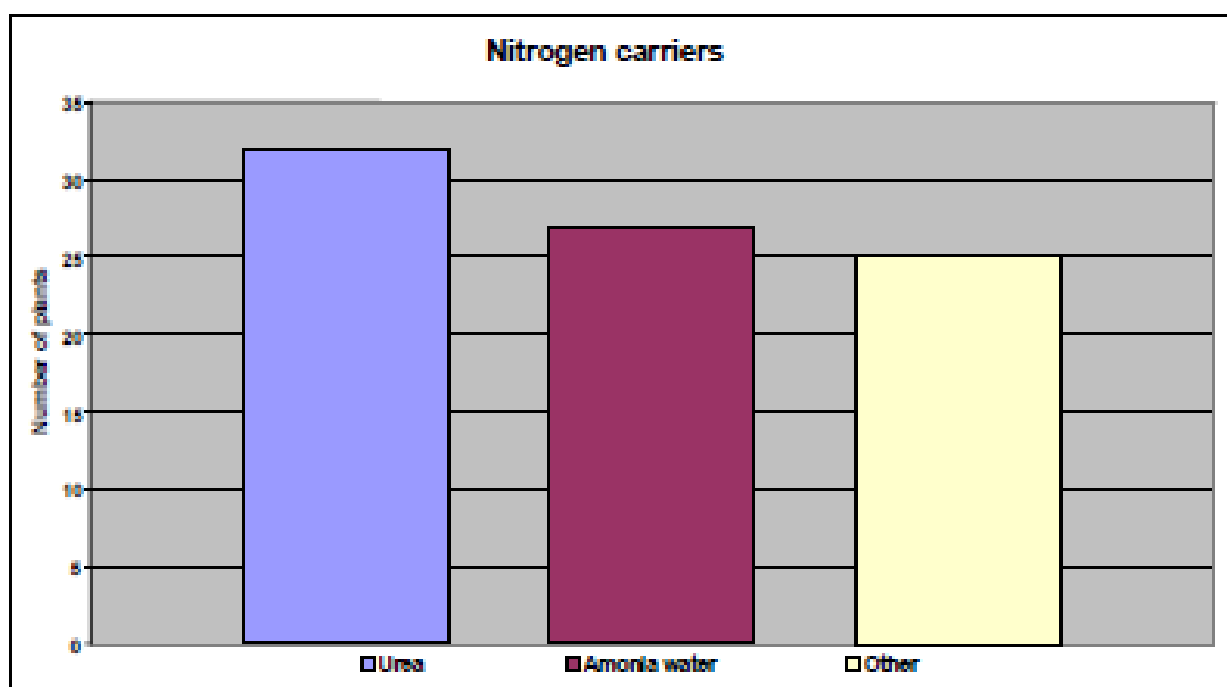


Figure 1.65 : Porteurs d'azote/agents NH₂-X utilisés par la SNCR dans les pays de l'UE des 23+ [85, CEMBUREAU, 2006]

Si la cimenterie est déjà équipée d'un système de combustion étagée, de nouveaux développements doivent être faits dans la mise en œuvre de la SNCR. L'utilisation simultanée de ces techniques exige que les températures, les temps de séjour et l'atmosphère gazeuse à l'endroit où la réaction a lieu soient compatibles. Des essais en marche industrielle ont été réalisés sur plusieurs fours équipés de précalcinateurs de manière à recueillir un retour d'expérience sur l'application simultanée de ces deux techniques d'abattement. Ces essais ont montré qu'il était en principe possible de combiner les deux techniques. Il est possible de réduire les émissions de NO_x en injectant le réducteur dans la zone d'oxydation ainsi que dans la zone réductrice d'un calcinateur à étages. L'injection dans la zone d'oxydation est à privilégier, car le risque d'augmentation des émissions de CO est moindre que si l'injection se produit dans la zone réductrice. Pour une conception et une régulation optimales de l'unité de SNCR, celle-ci doit être adaptée à la technique utilisée dans chaque calcinateur. Si le réducteur est introduit juste avant l'étage cyclonique inférieur, le temps de séjour des réactifs dans la plage de températures adéquate n'est pas suffisamment long pour parvenir à une réduction sensible des NO_x. Il y a donc un risque de fuite d'ammoniac.

D'autre part, plusieurs essais ont mis en évidence une possible augmentation des émissions de CO lorsque le réducteur est injecté avant la chambre de mélange du calcinateur dans une zone où la combustion du combustible du calcinateur est toujours en cours.

SNCR haute efficacité

La SNCR haute efficacité est une évolution de la SNCR qui est utilisée dans des cimenteries. Elle consiste à injecter de l'eau ammoniacale (solution ammoniacale à 25 %) dans le préchauffeur au moyen de rangées de buses (rampes) en conditions contrôlées. La disposition des rampes est déterminée par le profil des températures dans le conduit ascendant. L'injection de l'eau ammoniacale est contrôlée par le profil des températures mesurées dans le préchauffeur à proximité des rampes. Une bonne distribution de l'ammoniac peut réduire la fuite de NH_3 ainsi que la consommation d'eau ammoniacale. Cette technique de SNCR a été installée en 1996/97 dans deux cimenteries suédoises et dans au moins une en Allemagne.

Fuite d'ammoniac

Il est important que l'ammoniac soit injecté dans le four à une température comprise entre 830 à 1 050 °C. En dessous, de l'ammoniac non transformé se dégage (fuite de NH_3), et à des températures beaucoup plus élevées, l'ammoniac s'oxyde en NO_x . On peut aussi avoir une fuite de NH_3 quand le rapport molaire NH_3/NO_2 est élevé, c'est-à-dire à partir de 1,0 – 1,2. Dans d'autres secteurs de l'industrie, la fuite de NH_3 a parfois provoqué la formation d'aérosols de sels d'ammonium qui ont traversé le filtre et formé des panaches blancs en haut des cheminées d'évacuation des gaz résiduels. Les études ont démontré que les quantités d'aérosols produites par les cimenteries étaient très faibles. L'ammoniac inutilisé peut s'oxyder et se transformer en NO_x et en eau dans l'atmosphère ; la fuite de NH_3 peut aussi enrichir les poussières en ammoniac ce qui empêche de les recycler dans le broyeur. La possibilité d'une fuite de NH_3 doit être prise en compte dans la conception des unités de SNCR. Le niveau de réduction des NO_x ne peut pas être augmenté à volonté, car un dosage plus important risquerait d'entraîner une fuite de NH_3 (cf. également Figure 2.50 dans le chapitre sur la chaux). Le bon fonctionnement de l'unité de SNCR (système de régulation adapté, injection optimisée d'eau ammoniacale) ne provoque pas d'émissions d'ammoniac supérieures à la normale.

Effets croisés

Comme décrit ci-dessus, l'utilisation d'une solution d'eau ammoniacale en tant que réducteur peut entraîner une fuite d'ammoniac et un dégagement d'ammoniac non transformé. Des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) peuvent aussi se produire ; cependant, leur rôle n'est que mineur, car des tests ponctuels ont révélé des concentrations de l'ordre de 1 à 5 mg/ Nm^3 , soit environ la limite de détection. En outre, une augmentation des émissions de monoxyde de carbone (CO) peut se produire lorsque le réducteur est injecté avant la chambre de mélange du calcinateur dans une zone où la combustion du combustible du calcinateur est toujours en cours.

L'apport de chaleur supplémentaire nécessaire pour vaporiser l'eau est compensé par la chaleur libérée par la réaction exothermique du DeNO_x qui provoque une légère élévation des émissions de CO_2 . Le transport et le stockage de l'ammoniac en solution aqueuse sont potentiellement dangereux pour l'environnement et obligent à appliquer des mesures/techniques de sécurité supplémentaires. Il convient également d'étudier les impacts associés à la production d'ammoniac et à l'acheminement de l'eau servant à diluer la solution.

Lorsque le réducteur est de l'urée, les principaux produits ultimes sont l'ammoniac et le dioxyde de carbone. Des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) et diverses concentrations d'acide isocyanique (HNCO) et de monoxyde d'azote (NO) émanant de la décomposition de l'urée ont été signalées. Le niveau de N_2O de l'urée est toujours sensiblement supérieur à celui de l'ammoniac en solution aqueuse. La production de protoxyde d'azote à partir de l'urée varie selon la température. Des études montrent que la même plage de températures favorise à la fois une grande réduction des NO_x et une génération maximale de N_2O . La plus grande partie de l'acide isocyanique sera hydrolysée en ammoniac et en dioxyde de carbone ; cependant, on signale une échappée d'acide isocyanique d'unités de SNCR.

En outre, une étude montre qu'en plus du protoxyde d'azote (N_2O) et de l'acide isocyanique (HNCO), l'urée injectée produit aussi des ions cyaniques (NCO), phénomène inconnu avec l'ammoniac dans les conditions de la SNCR. Il convient également de souligner que l'utilisation d'urée produira des émissions de monoxyde de carbone (CO) plus importante que l'ammoniac.

Données d'exploitation

La plupart des unités de SNCR en service en 2006 ont été conçues ou conduites (ou les deux) pour réduire de 30 à plus de 50 % les niveaux de NO_x (pour des rapports molaires NH_3/NO_2 de 0,5 à 0,9) et abaisser leurs émissions à < 350 - 800 $\text{mg NO}_x/\text{Nm}^3$ (moyennes journalières), selon le niveau initial.

Les installations conçues ou conduites (ou les deux) pour améliorer ces performances obtiendront de meilleurs résultats comme décrit ci-dessous (SNCR haute efficacité). Deux cimenteries équipées d'unités de SNCR provenant de deux fournisseurs différents ayant tous deux garanti une réduction de 80 %, arrivent à réduire leurs émissions de 80 à 90 % (avec un niveau initial de NO_x compris entre 800 et 1100 mg/Nm^3) ce qui correspond à des rejets inférieurs à 200 mg de NO_x/m^3 , mesurés comme moyenne annuelle (cf. Section 4.2.4). En outre, des émissions de NO_x de 190 mg/Nm^3 (moyenne annuelle) ont été déclarées par une cimenterie suédoise en 2006.

La combinaison de mesures/techniques intégrées aux process avec des unités de SNCR haute efficacité, qui réduisent les émissions de NO_x de 80 à 90 %, permet d'atteindre des concentrations moyennes journalières inférieures à 500 mg/Nm^3 , même quand les niveaux initiaux sont supérieurs à 2 000 mg/Nm^3 [43, Wulf-Schnabel/Lohse, 1998].

SNCR haute efficacité et fuite d'ammoniac

La SNCR haute efficacité a été installée en 1996/97 dans deux cimenteries suédoises et dans au moins une en Allemagne. Ces cimenteries suédoises (au total trois fours) exploitent des fours en voie sèche avec précalcinateurs et préchauffeurs à cyclones. En appliquant un rapport molaire NH_3/NO de 1,0 – 1,2, elles sont parvenues à réduire les émissions de NH_3 de >80 % et ont mesuré jusqu'à présent une augmentation pouvant atteindre 20 mg/Nm^3 comme moyenne journalière. Aucune hausse importante des émissions de N_2O et de CO n'a été mesurée et pas la moindre trace de NH_3 n'a été trouvée dans le ciment. En 2001, dans une cimenterie, le rapport molaire initial se trouvait à 1,0 – 1,2 (nombre de molécules de NH_3 pour le nombre de molécules de NO_x présentes) estimé à 1,2 – 1,4 pour les NO_x supprimés avec une efficacité d'élimination moyenne de 80 %, alors que dans la seconde cimenterie, le rapport d'ammoniac était de l'ordre de 1,2 à 1,4 mol/mol (NO_x présents par rapport au NH_3 injecté) ou 1,5 – 1,8 (NO_x réduits par rapport au NH_3 injecté). Un niveau d'émissions de NO_x de 200 mg/Nm^3 a été signalé (moyenne annuelle). Il convient de souligner que ce niveau d'émissions de NO_x de 200 mg/Nm^3 est atteint depuis 1998 par les deux cimenteries suédoises avec un niveau initial de NO_x de 800 à 1 000 mg/Nm^3 , un taux de réduction de 80 % et un régime de fonctionnement stable.

En Allemagne, la SNCR (réducteur : eau ammoniacale à 25 %) a été installée sur un four avec préchauffeurs à quatre étages de cyclones pouvant produire environ 3 000 t de clinker/jour. Des niveaux d'émissions de NO_x compris entre 500 et 1 200 mg/Nm^3 (moyenne journalière) ont été signalés. Une expérience qui s'est déroulée sur plusieurs années a révélé que des niveaux d'émissions de NO_2 de 500 mg/Nm^3 maxi. (Moyenne journalière) pouvaient toujours être atteints sans aucune fuite d'ammoniac significative.

En 2007, les derniers résultats d'un essai à long terme (essai en service de six mois) montraient que des émissions de NO_x de 350 et 200 mg/Nm^3 (moyennes journalières) étaient atteintes par l'application de rapports molaires NH_3 : NO de 0,7 – 0,8 et 1,4 – 1,5 respectivement. Pendant ces essais en service, les émissions de NH_3 étaient mesurées en permanence. Les mesures de NH_3 ont toutefois révélé une fuite d'ammoniac non négligeable avec le maintien de 200 mg/Nm^3 de NO_x notamment avec le broyeur à l'arrêt (max. 50 – 200 mg/Nm^3). Tout compte fait, la fuite d'ammoniac était deux fois plus élevée pour atteindre le niveau d'émission de 200 mg/Nm^3 (NH_3 : moyenne trimestrielle de 11 mg/Nm^3) par rapport à un niveau de 350 mg/Nm^3 (NH_3 : moyenne trimestrielle de 21 mg/Nm^3). Le rendement du broyeur à l'arrêt était d'environ 10 à 20 %.

Aucun enrichissement pertinent de l'ammoniac dans le cru et la poussière du filtre électrostatique n'a pu être observé pendant l'essai en service. Les tests ont mis en évidence le fait que les émissions d'ammoniac devaient être prises en compte (cf. également Section 4.2.4.2). La fuite d'ammoniac découlant du procédé ci-dessus pose les limites de l'apport sur-stœchiométrique de réducteurs [160, Allemagne, 2007], [173, Allemagne, 2007].

En 2004 en Irlande, des études qui consistaient en des essais à court terme sur la SNCR ont mis en évidence de faibles concentrations en NH_3 s'échelonnant entre 4 et 26 mg/Nm^3 (10 % O_2) dans le gaz brut après le préchauffeur du four. La raison à cela était une configuration d'injection optimisée à l'origine d'une réaction de réduction très efficace et seulement de faibles volumes d'ammoniac non transformé. Pour mesurer ces concentrations, deux configurations d'injection ont été testées (conditions standard ; rapport molaire NH_3 : NO de un (1) avec un taux de réduction de NO_x de 50 %). La fuite de NH_3 pose les limites de l'ajout sur-stœchiométrique d'un réducteur [123, Irlande, 2005].

La Section 4.2.4 fournit des descriptions détaillées d'une technique de SNCR haute efficacité utilisée dans l'Union européenne. Les émissions d'ammoniac dans la fabrication du ciment sont décrites dans la Section 1.3.4.9.

Applicabilité

La SNCR et la SNCR haute efficacité sont en principe applicables aux fours à ciment rotatifs. Les zones d'injections varient en fonction du procédé de cuisson utilisé.

La température et le temps de séjour requis sont très difficiles à obtenir dans les fours longs en voie humide et sèche. Seule une cimenterie exploitant un four long en voie sèche et une autre (au Danemark) avec un four long en voie humide sont parvenues à mettre la SNCR en œuvre et à obtenir une efficacité de 40 à 50 %.

Les risques de stockage de l'ammoniac sont réduits en stockant une solution d'eau ammoniacale à 25 %.

Aspects économiques

Pour un four avec préchauffeur d'une capacité de production de 3 000 tonnes/jour dont les émissions initiales de NO_x atteignent 2 000 mg/m^3 et pour une réduction des émissions de NO_x pouvant atteindre 85 % (soit 300 $\text{mg NO}_x/\text{m}^3$), l'investissement dans une unité de SNCR utilisant l'eau ammoniacale comme réducteur varie de 0,5 à 1,2 million d'euros, ce coût dépendant très largement des réglementations européennes sur le stockage de l'eau ammoniacale. Le coût d'exploitation de ce même four se situe entre 0,3 et 0,5 euro/tonne de clinker et dépend en majeure partie du coût de l'ammoniac injecté [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [85, CEMBUREAU, 2006].

La SNCR a été installée en 1996/97 dans deux cimenteries suédoises. Pour un four, il a fallu investir près de 1,2 million d'euros (0,65 million d'euros pour l'unité de SNCR et 0,55 million d'euros pour le stockage de l'eau ammoniacale) et les coûts d'exploitation sont environ de 0,55 euro par tonne de clinker. Le coût total (investissement + coûts d'exploitation) est inférieur à 0,6 euro par tonne de clinker. L'investissement pour l'autre four était d'environ 0,55 million d'euros avec des coûts d'exploitation de 0,3 euro par tonne de clinker.

La politique suédoise en matière d'émissions de NO_x a incité les exploitants de ces usines à investir dans des unités de SNCR très performantes. Selon cette politique, un investissement de cette nature ayant un coût total (investissement + coûts d'exploitation) inférieur à 4,5 euros (40 couronnes suédoises) par kilo de NO_x (exprimé en NO_2) éliminé peut être acceptable.

Une enquête menée auprès de 26 cimenteries qui utilisent la SNCR en 2004 par l'industrie cimentière allemande a révélé un investissement moyen situé entre 0,5 et 0,75 million d'euros. Cependant, la France a signalé des investissements pouvant atteindre 1 million d'euros. La construction du stockage pour le réducteur représentait environ 50 % de l'investissement. Les coûts totaux de 0,5 à 0,7 euro par tonne de clinker ont été donnés pour l'utilisation d'une solution ammoniacale et des taux de réduction des émissions de NO_x de moyens à élevés.

Le calcul détaillé des coûts pour un four rotatif pouvant produire 1 500 tonnes de clinker par jour a permis de déterminer un coût spécifique de 0,4 et 1,2 euro par tonne de clinker, en fonction du taux de réduction des émissions de NO_x . D'autres calculs pour un four produisant 3 500 t/j atteignant une réduction des NO_x de 850 à 250 mg/Nm^3 ont permis de déterminer un investissement de 0,88 million d'euros et des coûts d'exploitation de 0,40 euro par tonne de clinker.

Cf. également Tableaux 1.39 et 1.40 (Section 1.4.8.2) pour des exemples de coûts de la SNCR.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27, SNCR haute efficacité en Suède et en Allemagne (Maerker). Les Sections 4.2.4.1 et 4.2.4.2 décrivent des installations de référence en Suède et en Allemagne respectivement.

[8, CEMBUREAU, 2001], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [10, Cementa AB/Hagström, 1994], [20, Rother, janvier 1996,], [24, Junker, 2001], [41, Kupper/Brentrup, 1992], [42, Billhardt/Kuhlmann/Ruhland/Schneider/Xeller, octobre 1996], [43, Wulf-Schnabel/Lohse, 1998], [76, Allemagne, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [101, France/ADEME/MEDD, 2002], [105, YARA, 2006], [114, Suède, 2006], [123, Irlande, 2005], [131, YARA, 2007], [160, Allemagne, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [173, Allemagne, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.1.8 Réduction sélective catalytique (SCR)

Description

La SCR réduit le NO et le NO_2 en N_2 à l'aide de NH_3 et d'un catalyseur entre 300 et 400 °C. Cette technique est très utilisée pour réduire les émissions de NO_x dans d'autres secteurs industriels (centrales thermiques au charbon, incinérateurs de déchets). Les fabricants de ciment s'intéressent surtout à deux systèmes : une configuration à faible teneur en poussières entre une unité de dépoussiérage et la cheminée et une configuration à forte teneur en poussières entre le préchauffeur et l'unité de dépoussiérage. Dans les systèmes rejetant des gaz résiduels faiblement poussiéreux, il faut réchauffer les effluents gazeux après les avoir épurés, ce qui peut induire des coûts énergétiques supplémentaires et des pertes de charge. Des raisons techniques et économiques incitent à préférer les systèmes de traitement des gaz fortement poussiéreux. Dans ces systèmes, le réchauffage n'est pas requis, car la température des effluents gazeux en sortie du préchauffeur est généralement celle requise pour le fonctionnement de la SCR.

Les systèmes de traitement des gaz résiduels fortement poussiéreux par la SCR doivent permettre d'espérer des réductions potentielles importantes des émissions de NO_x (85 à 95 %) et jusqu'en 2008, seuls ces systèmes ont été testés dans l'industrie du ciment.

En 2008 dans l'UE des 27, deux cycles de production en grandeur réelle ont été effectués de manière à éliminer les incertitudes techniques et économiques liées à la mise en œuvre de la SCR à une plus grande échelle à travers un retour d'expérience.

Ces incertitudes concernent principalement la forte teneur en poussières des gaz pouvant atteindre 100 g/Nm^3 , les mesures/techniques de dépoussiérage, le type et la durée de vie des catalyseurs, le montant total des investissements et les coûts d'exploitation. L'expérience montre également la grande importance d'une conception et d'une composition chimique appropriées pour les catalyseurs.

Étant donné son potentiel de réduction élevé, les bons résultats des essais pilotes, les deux unités SCR en grandeur réelle et le fait que la SCR représente l'état de l'art dans des installations comparables d'autres secteurs, la SCR est une technique intéressante pour l'industrie du ciment. Deux fournisseurs européens au moins proposent aux industriels de ce secteur des unités de SCR en grandeur réelle avec des niveaux de performance garantis de 100 à 200 mg/Nm^3 . Cependant, le coût d'équipement d'une unité de SCR est toujours plus élevé que celui d'une unité de SNCR [12, Pays-Bas, 1997].

Avantages pour l'environnement

Réduction des émissions de NO_x .

Comme les catalyseurs éliminent aussi les hydrocarbures, et si cette technique est conçue pour cela, la SCR diminuera également les émissions de COV et PCDD/F.

Effets croisés

Les besoins en énergie électrique peuvent augmenter à cause du système de dépoussiérage interne du réacteur SCR et des pertes de charge accrues.

Dans les systèmes rejetant des gaz résiduels faiblement poussiéreux, il faut réchauffer les effluents gazeux après les avoir épurés, ce qui peut induire des coûts énergétiques supplémentaires et des pertes de charge.

Il convient de recycler ou d'éliminer les catalyseurs.

Données d'exploitation

Dans les années 1990, les premiers essais réalisés dans des usines pilotes en Allemagne, en Italie et en Suède ont donné des résultats prometteurs. Les émissions de NO_x allaient de 100 à 200 mg/Nm^3 sans perte d'activité du catalyseur. Entre 1996 et 2000, trois essais pilotes dans des cimenteries autrichiennes ont été réalisés sur de petites portions (3 % des gaz résiduels) dans une configuration fortement poussiéreuse. Dans l'un des essais, l'efficacité de la réduction des émissions de NO_x a été probante bien que non continue. La disponibilité opérationnelle des catalyseurs posait problème. Les deux autres essais pilotes n'ont rien donné en raison de la désactivation des catalyseurs au bout de deux semaines du fait de la présence de métaux lourds et de composés métalliques alcalins. Dans une usine, d'importantes traces d'abrasion ont été constatées sur les catalyseurs au bout d'une période de fonctionnement d'environ 5 000 heures [18, Göller, 2001], [92, Autriche, 2006].

En 2000, la première unité de SCR de démonstration en grandeur réelle basée sur un système de traitement des gaz résiduels fortement poussiéreux a été construite en Allemagne avec le soutien financier de l'État. En service de 2001 à 2006, elle attendait toutefois en 2008 l'arrivée de catalyseurs améliorés. Par rapport à la SNCR, ce système consomme moins de NH_3 , d'où des coûts d'exploitation inférieurs pour le poste ammoniac. Autre élément contribuant à la réduction des coûts énergétiques, les effluents gazeux se trouvant dans la partie supérieure du préchauffeur à quatre étages sont à une température de 320 à 350°C , soit la température appropriée pour la SCR, et ils n'ont donc pas besoin d'être réchauffés comme cela est le cas dans une configuration où ils se trouvent entre le filtre à manches et la cheminée. L'efficacité de réduction des NO_x est généralement de l'ordre de 59 à 67 %. Cependant, dans le cas de conditions de conduite inhabituelles avec des niveaux de concentration dans le gaz brut de $3\,000 \text{ mg/Nm}^3$ ou plus, des taux d'efficacité de réduction des NO_x supérieurs à 80 % ont été observés. Dans des conditions de service normales, la SCR réduit les émissions de NO_x en les faisant passer d'une concentration initiale dans le gaz brut de $1\,000$ à $1\,600 \text{ mg/Nm}^3$ à un niveau de 400 à 550 mg/Nm^3 . Avec un rapport molaire de 0,8 à 0,9, la consommation de NH_3 est bien moindre qu'avec la SNCR.

Il convient de souligner que le NH_3 provenant de la matière première a également un rôle de réducteur dans le réacteur, d'où un niveau d'émission de NH_3 résiduel très faible. Dans cette usine allemande, la SCR permettait habituellement d'atteindre des émissions de NH_3 inférieures à 1 mg/Nm^3 en parvenant à un niveau d'émissions de NO_x de 300 mg/Nm^3 . Ces résultats peuvent témoigner du potentiel de cette technique, d'autant plus qu'ils ont également été obtenus avec seulement trois couches catalytiques et un niveau d'émission de NH_3 résiduel se maintenant autour de 1 mg/Nm^3 . La Section 4.2.5 fournit une description plus détaillée de cette installation, des plages d'émissions atteintes et des coûts.

En Italie, une unité de SCR est en service pour réduire les NO_x . Un système de traitement des gaz résiduaires fortement poussiéreux par la SCR en grandeur réelle est en service depuis 2006 pour réduire les émissions de NO_x sur une ligne de cuisson pouvant produire $1\,720 \text{ t/j}$ (capacité autorisée : $2\,400 \text{ t/j}$). La chambre qui contient les modules prévus pour sept couches (niveaux) de catalyseurs fait 4 m de large, 6 m de long et 27 m de hauteur, comme illustré dans la Figure 1.66.

Pour chaque niveau, le catalyseur présente un volume de 21 m^3 , soit 63 m^3 au total pour trois niveaux, plus une capacité de réserve non installée de 42 m^3 pour deux niveaux supplémentaires afin d'atteindre la capacité autorisée de $2\,400 \text{ t/j}$. Les catalyseurs sont automatiquement nettoyés à l'air comprimé à 5 ou 6 bars et la ligne du compresseur consomme $2,5 \text{ kWh/t}$ de clinker. Au bout de $7\,000$ heures de service, les catalyseurs n'avaient plus aucune fonction de réduction.



Figure 1.66 : Exemple d'installation SCR
[140, Italie, 2007]



Figure 1.67 : Exemple de catalyseur individuel utilisé dans la technique SCR
[140, Italie, 2007]



Figure 1.68 : Exemple de position d'un module dans l'unité de SCR
[140, Italie, 2007]

Une solution ammoniacale à 25 % est utilisée comme réducteur. Le débit oscille entre 30 et 300 litres par heure en fonction du régime de fonctionnement du four et du type de combustible utilisé alors que le débit du gaz est de $110\,000 \text{ m}^3/\text{h}$. La solution ammoniacale est injectée dans le flux de gaz avant le dernier étage cyclonique, le plus haut, là où le régime de température approprié de $320 - 350^\circ\text{C}$ est présent. Pendant les 10 premiers mois de service, la consommation moyenne de solution ammoniacale était de $0,7$ à 1 kg/t de clinker avec une réduction des émissions de NO_x inférieure à 450 mg/Nm^3 ($10\% \text{ O}_2$). Cependant, les rapports et les résultats des essais réalisés dans cette usine italienne montrent que la conception de cette technique SCR peut abaisser les émissions de NO_x en dessous de 200 mg/Nm^3 (au $\% \text{ O}_2$ réel) au niveau de la cheminée. En fonction du niveau d'entrée de NO_x et de la vitesse d'injection de NH_3 , l'efficacité de la réduction des NO_x s'échelonne de 43 à 95 %. Des corrections à 10 % de O_2 mèneraient à des concentrations en NO_x encore plus basses. Avant l'installation de l'unité de SCR, les mesures des gaz résiduaires révélaient 50 à 150 mg/Nm^3 d'ammoniac provenant des matières premières. Depuis, cette quantité d'ammoniac est utilisée dans le procédé SCR, d'où des émissions de NH_3 inférieures à 1 mg/Nm^3 et un rapport molaire (NH_3 injecté : NO_x) inférieur à l'unité. Le Tableau 1.35 résume les paramètres, les émissions et les coûts de la technique SCR rapportés par les cimenteries allemande et italienne qui utilisent cette technique de réduction des NO_x .

Technique	Applicabilité au four	Efficacité de réduction (%)	Emissions rapportées		Coûts rapportés	
			mg/Nm ³ (moyenne journalière)	kg NO _x /t de clinker	Investissement (EUR/tonne de clinker)	Exploitation (EUR/tonne de clinker)
SCR	Potentiellement applicable à tous les fours	43 – 97	300 – 500 ¹⁾	0,15 – 1,0	2,5 ²⁾ 3,2 – 4,5 ^{3) 4)}	1,75 – 2 ³⁾
1) Résultats d'essais pilotes et de la conduite à long terme de l'unité de démonstration. 2) Coûts évalués par l'UBA (office fédéral de l'environnement allemand) pour une unité en grandeur réelle - four produisant 1 500 t de clinker/j, émissions initiales de 1 200 mg/Nm ³ et niveaux atteints de 200, 500 et 800 mg/Nm ³ (moyenne journalière) 3) Coûts calculés par la VDZ (Association allemande de l'industrie du ciment) et couvrant les coûts d'exploitation, plus l'amortissement de l'investissement dans une unité en grandeur réelle (four produisant 1 500 t de clinker/j, émissions initiales de 1 200 mg/Nm ³ et niveaux atteints de 200, 500 et 800 mg/Nm ³). 4) La valeur la plus élevée se rapporte à l'unité de SCR italienne ; il inclut 0,9 million d'euros pour les catalyseurs (trois couches de modules installés et deux en réserve)						

Tableau 1.35 : Paramètres, émissions et coûts rapportés pour la SCR
[85, CEMBUREAU, 2006]

Applicabilité

La SCR n'a été testée que sur des fours avec préchauffeurs et sur des fours (Lepol) en voie semi-sèche dans le cadre d'essais pilotes, mais elle pourrait en principe être applicable à d'autres types de fours selon la plage de températures.

En raison des hauts niveaux de poussières, les catalyseurs sont soumis à des critères de durée de vie et de fonctionnement très stricts alors que leur conception et leur composition chimique revêtent une grande importance. Les catalyseurs conçus pour des applications peu poussiéreuses risquent de ne pas être adaptés aux cimenteries qui émettent beaucoup de poussières. Un réacteur SCR pour le traitement de gaz fortement poussiéreux doit posséder des catalyseurs d'une grande résistance mécanique, une taille de cellule plus large qu'à l'ordinaire pour le traitement de gaz peu poussiéreux et un système de dépoussiérage intégré afin d'éviter toute obstruction ou perte d'activité. Des essais avec des effluents gazeux de cimenterie à haute teneur en poussière devront être réalisés de manière à déterminer la composition chimique appropriée du catalyseur. En outre, compte tenu des dimensions de la chambre contenant les modules et du nombre de couches utilisées, un espace suffisant devra être disponible pour l'installation d'une unité de SCR.

Il n'existe pas encore de catalyseurs standards adaptés à l'industrie du ciment. Les divers types de catalyseurs utilisés font encore l'objet de tests.

Aspects économiques

L'utilisation de la SCR a indiqué un coût de 1,25 à 2,00 euros par tonne, en fonction de la taille de l'usine et de l'efficacité d'élimination des NO_x requise. Par rapport à la SNCR, la SCR se caractérise par un investissement 4 à 9 fois supérieur. L'utilisation de catalyseurs fait monter les coûts d'exploitation. En outre, la consommation d'énergie provient essentiellement des pertes de charge et de l'air de nettoyage du catalyseur. D'après les estimations, les coûts spécifiques à la SCR tournent autour de 1,75 euro par tonne.

La société Cementa AB à Slite, en Suède, exploite un four en voie sèche à préchauffeur à suspension et à précalcinateur d'une capacité de production de 5 800 tonnes de clinker/jour. En 1993, elle expérimentait une unité pilote de SCR sur des gaz résiduels fortement poussiéreux installée après une unité de SNCR depuis près d'un an ; elle a calculé le coût d'installation, en aval de l'unité de SNCR, d'une unité de SCR en grandeur réelle pour des niveaux initiaux de NO_x inférieurs à 200 mg/m³ à l'entrée de l'unité de SCR. L'investissement a été évalué à près de 11,2 millions d'euros et le coût d'exploitation à 1,3 euro par tonne de clinker, soit au total 3,2 euros par tonne de clinker. L'élimination de chaque kilo supplémentaire de NO_x coûtait de 5,5 à 7,3 euros pour la SCR, ce qui d'après cette société était trop élevé et déraisonnable.

L'investissement requis pour un four avec préchauffeur d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour a été évalué à 3,5 à 4,5 millions d'euros, sachant que les chiffres sur les investissements émanent uniquement des fournisseurs et qu'ils n'incluent pas les travaux de modification des usines de ciment.

Des études de faisabilité ont été réalisées en Autriche, en Allemagne, aux Pays-Bas et en Suède. L'évaluation du coût de l'application de la SCR à l'industrie du ciment est très variable, les coûts de production et la durée de vie du catalyseur étant les principales variables.

Cf. également Tableaux 1.34 et 1.35 dans la Section 1.4.5.1 ainsi que le Tableau 1.40 dans la Section 1.4.8.2 pour des exemples de coûts.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales. La mise en œuvre de la SCR peut convenir pour parvenir à une plus grande efficacité de réduction des NO_x ou bien pour faire baisser à la fois les émissions de NO_x et d'autres polluants, comme l'ammoniac des matières premières.

Installations de référence

Solnhofer Portland-Zementwerke (Allemagne), cimenterie Monselice (Italie).

Documents de référence

[4, Autriche, 1998] [8, CEMBUREAU, 2001], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [12, Pays-Bas, 1997], [18, Göller, 2001], [23, de Jonge, 2001] [24, Junker, 2001], [43, Wulf-Schnabel/Lohse, 1998], [57, Commission européenne, 2005], [76, Allemagne, 2006], [80, Alvaro A. Linero, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [92, Autriche, 2006], [140, Italie, 2007], [141, Leibacher/Bellin/Linero, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.2 Réduction des émissions de SO₂

La première phase du contrôle du SO₂ passe par la mise en œuvre des mesures/techniques primaires d'optimisation du procédé, comme l'optimisation de la cuisson du clinker, y compris la stabilisation de la conduite du four, la répartition homogène du cru chaud dans la conduite montante du four et la prévention de l'apparition d'une atmosphère réductrice pendant la cuisson ainsi que le choix des matières premières et des combustibles. En outre, la concentration en oxygène à l'entrée du four est cruciale pour capturer le SO₂ dans la charge du four. L'augmentation de la teneur en oxygène dans l'atmosphère des fours longs réduit le niveau de SO₂ et augmente celui des NO_x. Cependant, afin d'obtenir la qualité de produit spécifiée, la cuisson du clinker a besoin d'un excès d'oxygène. Par conséquent, il y a toujours un apport suffisant d'oxygène pour assurer la formation de sulfates dans la partie basse du préchauffeur à cyclones ou dans la chambre à gaz chaud du préchauffeur à grilles, lesquels sont évacués du four avec le clinker. L'optimisation des teneurs en NO_x/SO₂/CO via l'ajustement de la teneur en oxygène dans la partie arrière du four doit être recherchée pour trouver un équilibre qui protège l'environnement. Si ces mesures/techniques sont insuffisantes, d'autres mesures/techniques curatives peuvent être mises en œuvre. Les Tableaux 1.16 et 1.37 résument les mesures/techniques qui ont un effet favorable (c'est-à-dire qui réduisent) sur les émissions de SO₂ provoquées par la fabrication du ciment et sortant principalement du préchauffeur et du bypass.

Le Tableau 1.36 récapitule les données d'exploitation mentionnées dans cette section et doit être examiné conjointement avec les paragraphes correspondants des sections suivantes (cf. Sections 1.4.5.2.1 – 1.4.5.2.3) Il convient de noter dans ce contexte que lors de la co-incinération des déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

Mesures / techniques	Applicabilité au système de four	Efficacité de la réduction	Données sur les émissions		Coût	
			mg/Nm ³ ¹⁾	kg/tonne ²⁾	Investissement (million(s) d'euros)	Exploitation (euro(s)/t de clinker)
Addition d'absorbants	Tous	60 – 80 %	<200 – 400 ⁵⁾	0,23 – 0,92	0,2 – 0,3	0,1 – 0,4
Épurateur en voie humide	Tous	>90 %	<10 – 300 ⁴⁾	0,02–0,69	5,8 – 23 ⁶⁾	0,5 – 2 ⁶⁾
Charbon actif	Voie sèche	Jusqu'à 95 %	<50	<0,11	15 ³⁾	Pas d'info.

1) Pour des moyennes journalières, mesurées sur gaz secs, 273 K, 101,3 kPa et 10 % d'O₂
2) kg/tonne de clinker : sur la base de 2 300 m³/tonne de clinker
3) Coût incluant aussi celui d'une unité de SNCR, pour un four produisant 2 000 tonnes de clinker/jour et un niveau initial d'émissions de 50 à 600 mg SO₂/m³, données financières de 1997
4) Le niveau d'émission final pouvant être atteint dépend du niveau de SO₂ initial avant l'installation de l'épurateur en voie humide et il peut être supérieur
5) Pour un niveau initial de SO_x de 1 200 mg/Nm³ (cf. Section 1.4.5.2.1)
6) 2008

Tableau 1.36 : Tableau synoptique des techniques de contrôle et de réduction des émissions de SO₂

Le Tableau 1.37 présente le nombre connu d'installations en grandeur réelle dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ qui utilisaient des mesures/techniques de réduction des émissions de SO₂ en 2008.

Mesures/techniques de réduction/contrôle des émissions de SO ₂				
Pays		Addition d'absorbants	Épurateur en voie humide	Charbon actif
Belgique	BE	2		
Bulgarie	BG			
République tchèque	CZ	1		
Danemark	DK		2	
Allemagne	DE	11		
Estonie	EE			
Grèce	EL			
Espagne	ES			
France	FR	3		
Irlande	IE			
Italie	IT	1		
Chypre	CY			
Lettonie	LV			
Lituanie	LT			
Luxembourg	LU			
Hongrie	HU			
Malte	MT			
Pays-Bas	NL			
Autriche	AT	1	1	
Pologne	PL			
Portugal	PT	3		
Roumanie	Ro			
Slovénie	SI		1	
Slovaquie	SK			
Finlande	FI			
Suède	SE		1	
Royaume-Uni	UK		2	
Norvège	NO			
Suisse	CH	1	1	1
Turquie	TR			
TOTAL		23	8	1

Tableau 1.37 : Techniques de réduction des émissions de SO₂ employées dans les pays de l'UE des 27 et de l'UE des 23+ en 2008
 [73, CEMBUREAU, 2006], [182, TWG CLM, 2008]

Aucune cimenterie européenne n'utilise d'épurateurs en voie semi-humide et en voie sèche. Le principe de ces techniques est la neutralisation du SO_2 des gaz résiduels à travers l'injection d'agents de sorption chimiques ou physiques. Les produits réactionnels sont des sels dissous ou secs, selon les techniques. En 2003, la cimenterie d'Untervaz, en Suisse, qui était la seule en Europe à avoir installé un épurateur en voie sèche avec lit fluidisé circulant, a été fermée pour des raisons économiques et, dans une moindre mesure, techniques.

1.4.5.2.1 Addition d'absorbants

Description et avantages pour l'environnement

Les mesures/techniques de contrôle des émissions secondaires employées dans l'industrie du ciment consistent en l'addition de chaux hydratée en utilisant le « procédé d'additif sec » (addition d'absorbants à la matière première) ou le « procédé de sorption à sec » (injection de sorbant dans le flux de gaz). L'addition de chaux hydratée présente l'avantage supplémentaire que l'additif contenant du calcium forme des produits réactionnels qui peuvent être directement incorporés dans la cuisson du clinker.

La plage de températures optimale pour l'addition de chaux hydratée va de 350 à 400 °C et se situe en dessous de 150°C si le gaz est enrichi avec de l'eau. L'addition de chaux hydratée dans les fours rotatifs se fait de préférence dans les étages cycloniques supérieurs ou dans la conduite de gaz brut.

Autrement, la chaux hydratée peut être déversée dans le broyeur à cru avec les matières premières ou directement ajoutée dans le cru introduit dans le four. La chaux hydratée ou éteinte (Ca(OH)_2), la chaux vive (CaO) ou les cendres volantes activées à haute teneur en CaO sont injectées dans la trajectoire des gaz résiduels à des températures proches du point de rosée de l'eau, ce qui favorise l'absorption du SO_2 . Dans les fours à ciment, cette plage de températures se trouve dans la zone située entre le broyeur à cru et le collecteur de poussières. La chaux hydratée réagit avec le SO_2 dans les étages supérieurs du cyclone et est évacuée du four sous forme de poussière dans le gaz brut (collecteur de poussières) qui revient vers l'unité de broyage-séchage en aval avec le gaz brut. Les temps de séjour courts du gaz dans les étages supérieurs du cyclone (deux secondes minimum) et les niveaux de CO_2 élevés dans le gaz résiduel de plus de 30 % sont deux facteurs qui limitent l'efficacité de réduction de ce procédé.

Effets croisés

L'injection de grandes quantités de chaux a une incidence sur la qualité du cru.

Données d'exploitation

Le potentiel de réduction du SO_2 de l'addition de chaux hydratée est déterminé par le niveau initial de SO_2 et la qualité des gaz résiduels d'une part, et le niveau de concentration des cycles du soufre se formant dans l'unité concernée d'autre part. L'injection d'absorbants dans les fours à préchauffeurs à suspension permet de réduire les émissions de SO_2 de 60 à 80 %. Avec des niveaux initiaux ne dépassant pas 400 mg/Nm^3 , il est théoriquement possible d'arriver à 100 mg/Nm^3 . Si les niveaux initiaux de SO_2 n'excèdent pas 1 200 mg/Nm^3 , il est possible de les réduire à 400 mg/Nm^3 . Lorsque les niveaux initiaux de SO_2 sont supérieurs à 1 200 mg/Nm^3 , les quantités d'absorbants requises sont considérables, ce qui peut ne pas être rentable. En outre, une concentration initiale supérieure des cycles du soufre perturbe le procédé en raison de la formation de dépôts dans la zone de décarbonatation. Elle risque même de remettre en circulation une quantité de soufre plus importante et de perturber la stabilité de fonctionnement du four, car elle provoque le retour vers le four de fortes quantités de soufre.

Applicabilité

L'addition d'absorbants est en principe possible dans tous les fours même si cette méthode est surtout appliquée aux installations équipées de préchauffeurs à suspension. Il existe au moins un exemple de four long en voie humide où du NaHCO_3 sec est injecté dans les gaz résiduels en amont du filtre électrostatique pour diminuer les pointes d'émission de SO_2 . L'addition de chaux au cru altère la qualité des granules/nodules et provoque des problèmes d'avancement des matières dans les fours Lepol.

Le procédé de sorption à sec consiste à injecter des absorbants dans le flux de gaz sous forme sèche ou humide. L'expérience montre que dans les fours à préchauffeurs, l'injection directe de chaux éteinte dans les gaz résiduels était moins efficace que l'addition de chaux éteinte dans le cru introduit dans le four. Le SO_2 réagit avec la chaux en formant du CaSO_3 et du CaSO_4 qui pénètrent ensuite dans le four avec la matière première et sont intégrés dans le clinker. Cette technique permet d'épurer les flux de gaz résiduels dont la concentration en SO_2 est modérée et est applicable à une température de l'air dépassant 400°C . Les réductions les plus importantes sont obtenues au-dessus de 600°C . Il est recommandé d'utiliser un absorbant à base de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fortement poreux et d'une grande surface spécifique. La chaux éteinte ne semble pas avoir une forte réactivité, ce qui oblige à utiliser des rapports molaires $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{SO}_2$ compris entre 3 et 6. L'addition d'absorbants dans les courants de gaz résiduels à fortes concentrations en SO_2 doit être égale à 6 - 7 fois la quantité stœchiométrique, impliquant des coûts opératoires élevés.

Aspects économiques

L'addition d'absorbants est pratiquée dans plusieurs unités, pour assurer que les limites ne sont pas dépassées en cas de pointes d'émissions. Ceci signifie qu'elle n'est pas appliquée continuellement mais uniquement dans des circonstances particulières. Pour une concentration initiale en SO_2 ne dépassant pas $3\,000\text{ mg/Nm}^3$, un taux de réduction pouvant atteindre 65 % et un coût de 85 euros par tonne de chaux éteinte, l'investissement nécessaire pour un four avec préchauffeur d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour s'élève à environ 0,2 ou 0,3 million d'euros et les coûts d'exploitation à 0,1 – 0,4 euro par tonne de clinker.

Cf. également Tableau 1.36 et Section 1.4.8.3 pour des exemples de données financières.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[8, CEMBUREAU, 2001], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [12, Pays-Bas, 1997], [30, Marchal, 2001], [76, Allemagne, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007], [101, France/ADEME/MEDD, 2002], [168, TWG CLM, 2007]

1.4.5.2.2 Épurateur en voie humide

Description et avantages pour l'environnement

L'installation d'épuration en voie humide est la technique de désulfuration des gaz résiduels la plus utilisée dans les centrales à charbon. Dans les procédés de fabrication du ciment, la voie humide est une technique établie pour réduire les émissions de SO_2 . L'épuration en voie humide est basée sur la réaction chimique suivante :



Les SO_x sont absorbés par un liquide ou par un lait qui est pulvérisé dans une colonne de lavage. L'absorbant est du carbonate de calcium. De toutes les méthodes de désulfuration des gaz de combustion (FGD), les systèmes d'épuration en voie humide sont les plus efficaces pour l'élimination des gaz acides solubles avec les facteurs stœchiométriques d'excès les plus faibles et le taux de production de déchets solides le plus bas. Cependant, les épurateurs en voie humide réduisent aussi sensiblement les émissions de HCl, de poussières résiduelles et, dans une moindre mesure, de métaux et de NH_3 . La Figure 1.69 illustre le principe de base du fonctionnement d'un épurateur en voie humide.

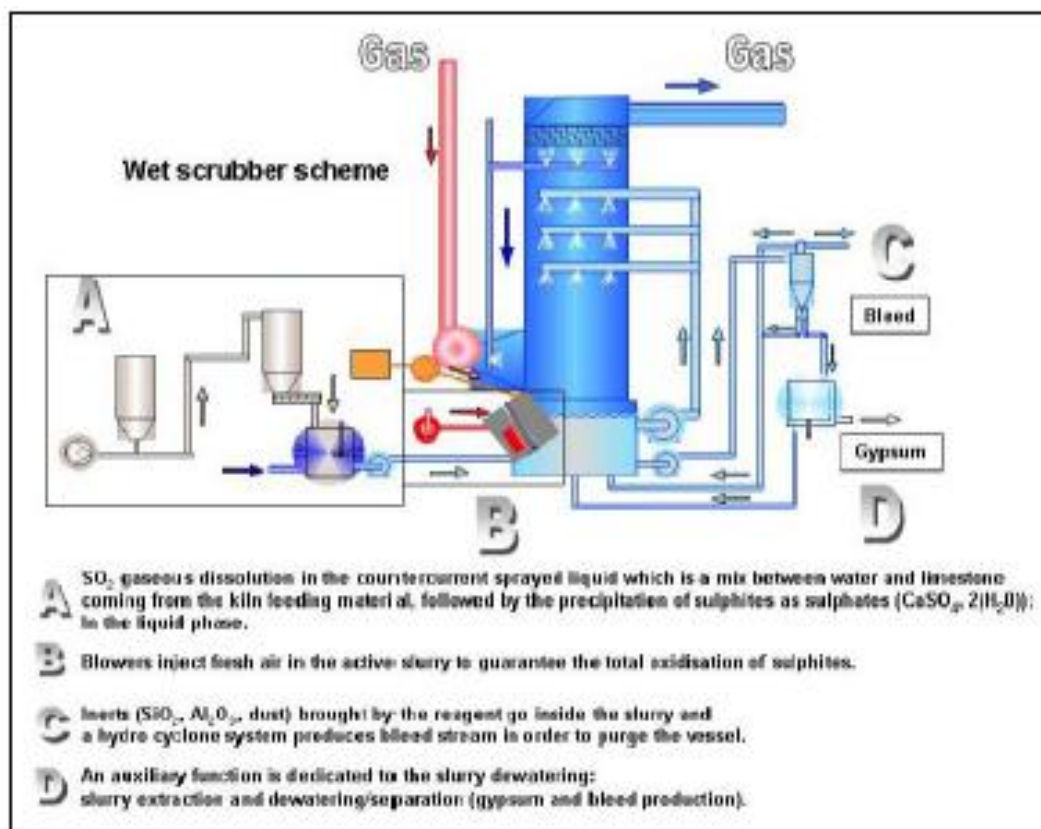


Figure 1.69 : Caractéristiques de fonctionnement élémentaires d'un épurateur en voie humide [91, CEMBUREAU, 2006]

En 2008, sept épurateurs en voie humide, tous de type colonnes de lavage à pulvérisation, étaient utilisés dans l'industrie européenne du ciment, plus un en projet. Le lait est pulvérisé à contre courant dans les gaz résiduels et collecté dans une cuve de recyclage située dans la partie inférieure de l'épurateur où le sulfite qui s'est formé s'oxyde avec l'air en sulfate et forme du sulfate de calcium dihydrate. Celui-ci est séparé et, en fonction des propriétés physico-chimiques du gypse, il peut être utilisé au cours du broyage du ciment tandis que l'eau retourne dans l'épurateur.

Par rapport à la voie sèche, le potentiel de génération de poussières de four à ciment (CKD) en voie humide est bien inférieur et les ressources naturelles de gypse sont économisées. A Untervaz, en Suisse, l'unique épurateur en voie sèche avec lit fluidisé circulant en Europe a été mis hors service pour des raisons économiques et, dans une moindre mesure, techniques. L'objectif est normalement de ne pas générer de poussières résiduelles pendant la fabrication du ciment ou l'épuration des gaz. Pendant le procédé de désulfuration en voie humide, du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ se forme et est utilisé pour remplacer le gypse naturel avant d'être intégré en tant qu'agent modulant dans le ciment. Dans un procédé de désulfuration en voie sèche/semi-sèche, une grande quantité de $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ se forme ; ce dernier est préjudiciable à la qualité du ciment et les possibilités d'intégration dans le ciment sont limitées. La majorité de la matière produite par l'épurateur en voie sèche devra donc être réintroduite dans le four ou bien être mise au rebut.

Effets croisés

Augmentation de la consommation d'énergie.

La désulfuration des gaz de combustion (FGD) accroît la production de déchets et les opérations de maintenance peuvent produire des déchets supplémentaires.

Augmentation des émissions de CO₂ (cf. la réaction chimique ci-dessus qui illustre la façon dont le procédé d'épuration en voie humide produit du CO₂).

Augmentation de la consommation d'eau.

Émissions dans l'eau et risque accru de contamination de l'eau.

Augmentation des coûts d'exploitation.

Remplacement du gypse naturel par du gypse artificiel.

Données d'exploitation

Cette méthode permet de réduire de plus de 95 % la concentration en SO₂. La société suédoise Cementa AB exploite un four à préchauffeur d'une capacité de production de 5 800 tonnes de clinker/jour ; la concentration initiale de SO₂ dans les gaz résiduaires est de 800 à 1 000 mg/Nm³ et les niveaux atteints sont <10 mg/Nm³. Castle Cement, au Royaume-Uni, exploite un four à préchauffeur d'une capacité de production de 2 500 tonnes de clinker/jour dans lequel la concentration initiale moyenne journalière en SO₂ des gaz résiduaires est de 800-1 400 mg/Nm³, avec des pointes pouvant dépasser 2 000 mg/Nm³. En outre, des émissions de SO₂ de 207 mg/Nm³ (moyenne annuelle) ont été signalées pour la période allant de 2002 à 2006 et les moyennes journalières maximales ont oscillé entre 248 et 296 mg/Nm³ en raison de la haute teneur en soufre de la matière première.

Applicabilité

Tous les types de fours peuvent être équipés d'un épurateur en voie humide à condition que ses niveaux de SO₂ soient appropriés (suffisants) afin de pouvoir fabriquer le gypse.

Aspects économiques

En 2008, les coûts d'équipement pour l'installation d'un épurateur en voie humide à Ribblesdale, Castle Cement, Royaume-Uni, étaient estimés par le fournisseur à environ 23 millions d'euros compte tenu de l'inflation. En 2000, Castle Cement a investi 7 millions d'euros (y compris la modification de l'installation) et les coûts d'exploitation étaient d'environ 0,9 euro par tonne de clinker. En 1998, pour Cementa AB en Suède, l'investissement était d'environ 10 millions d'euros avec des coûts d'exploitation de 0,5 euro par tonne de clinker. Pour une concentration initiale en SO₂ pouvant atteindre 3 000 mg/Nm³ et un four d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour, l'investissement, à la fin des années 1990, s'élevait à 6 - 10 millions d'euros et les coûts d'exploitation à 0,5 – 1 euro par tonne de clinker. En outre, en 1998, une cimenterie autrichienne a investi 5,8 millions d'euros dans une installation d'épuration en voie humide (réduction des émissions de SO₂ à moins de 200 mg/Nm³) et jusqu'en 2008, les coûts d'exploitation annuels étaient de 140 000 euros. En 2008, l'industrie du ciment européenne a rapporté des investissements compris entre 6 et 30 millions d'euros et des coûts d'exploitation de 1 à 2 euros par tonne de clinker.

Le Tableau 1.41 dans la Section 1.4.8.3 fournit des exemples de données financières avec une série de données différentes calculées pour une usine de référence ayant une capacité de production de 1 100 t/j.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cementa AB (Suède), Castle Cement (Royaume-Uni), Retznei plant (Lafarge, Autriche), Dunbar (Royaume-Uni), Trebovlje (Slovénie), Untervaz (Suisse).

[8, CEMBUREAU, 2001], [9, CEMBUREAU, novembre 1997], [10, Cementa AB/Hagström, 1994], [11, Coulburn, 2001], [24, Junker, 2001], [81, Castle Cement UK, 2006], [86, EURITS, 2006], [92, Autriche, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006], [114, Suède, 2006], [132, CEMBUREAU/Federhen, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [175, Lafarge, 2007], [182, TWG CLM, 2008], [183, Szednyj/Schindler, 2005]

1.4.5.2.3 Charbon actif

Description et avantages pour l'environnement

Les polluants comme le SO₂, les composés organiques, les métaux, le NH₃, les composés de NH₄, le HCl, le HF et les poussières résiduelles (après un filtre électrostatique ou à manches) peuvent être éliminés des gaz résiduels par adsorption sur du charbon actif. Le filtre à charbon actif est utilisé pour la technique par injection ou bien se présente comme un filtre à lit à garnissage cloisonné en modules. Grâce à cette configuration, le filtre peut épurer des débits de gaz différents et s'adapter à différentes capacités de production. Le charbon actif utilisé est retiré, stocké dans un silo séparé et remplacé par un adsorbant neuf à intervalles réguliers. L'utilisation de coke saturé comme combustible permet de renvoyer dans le four les substances collectées dans le filtre. Elles se fixent dans une large mesure dans le clinker.

Effets croisés

Les déchets produits par le charbon actif doivent être gérés comme des déchets dangereux.

Données d'exploitation

Le seul filtre à charbon actif toujours existant de l'industrie du ciment européenne est installé dans une cimenterie à Siggenthal, en Suisse. Le four de Siggenthal est équipé d'un préchauffeur à quatre étages de cyclones et possède une capacité de production de 2 000 tonnes de clinker/jour. Des mesures ont démontré qu'il éliminait très efficacement le SO₂, les métaux, les PCDD/F. Pendant un essai d'une durée de cent jours, la concentration en SO₂ à l'entrée du filtre a varié de 50 à 600 mg/Nm³, alors qu'en sortie elle a toujours été très inférieure à 50 mg/Nm³. De 30 mg/Nm³, les concentrations en poussières sont tombées très au-dessous de 10 mg/Nm³.

Applicabilité

Les filtres à charbon actif conviennent à tous les types de fours. Les déchets, comme le charbon actif usé avec des PCDD/F et autres polluants comme le mercure, doivent être gérés comme des déchets dangereux. Afin d'éviter tout risque d'incendie dans le filtre à coke, il est particulièrement important de surveiller et de contrôler la température et le CO.

Aspects économiques

L'installation de Siggenthal comporte aussi une unité de SNCR et en 1999 la ville de Zürich a financé près de 30 % de l'investissement total, soit environ 15 millions d'euros. Cet investissement a été réalisé pour permettre d'utiliser les boues de digestion des stations d'épuration comme combustible.

Possible augmentation des coûts d'exploitation.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Siggenthal, Suisse

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [10, Cementa AB/Hagström, 1994], [12, Pays-Bas, 1997], [86, EURITS, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.3 Réduction des émissions d'oxydes de carbone (CO) et pics de CO

Description

En plus de divers autres constituants, les gaz résiduels du four/broyeur à cru contiennent du CO₂, du N₂, de la vapeur d'eau et de l'oxygène ainsi que dans une moindre mesure du NO et des SO_x, et aussi du CO.

Le choix, chaque fois que possible, de matières premières à faible teneur en matières organiques contribue aussi à réduire les émissions de CO. Lorsqu'elles sont le produit d'une combustion incomplète, les émissions de monoxydes de carbone (CO) constituent généralement une perte d'efficacité. Par conséquent, les exploitants tendent à limiter les émissions de CO de leurs fours. L'amélioration de la combustion, par exemple à travers l'optimisation et la qualité du combustible, les propriétés et la configuration du brûleur, le tirage du four, la température de combustion et le temps de séjour peuvent réduire les émissions de CO.

En outre, toutes les mesures/techniques qui réduisent la consommation d'énergie thermique diminuent aussi les émissions de CO₂. Le choix, lorsque c'est possible, de matières premières à faible teneur en matières organiques et de combustibles à faible rapport teneur en carbone / pouvoir calorifique contribue aussi à réduire les émissions de CO₂.

Pics de CO

Les émissions de poussières provoquées par des pics de CO peuvent se produire au niveau des filtres électrostatiques et, dans une moindre mesure, des filtres hybrides. Les filtres électrostatiques devront être arrêtés pour des raisons de sécurité lorsque les niveaux de CO dans les gaz résiduels sont élevés.

De manière à réduire le temps d'arrêt du filtre électrostatique, il convient de procéder par étapes :

- fixer des objectifs et évaluer la situation en tenant compte des principaux facteurs qui influencent les pics de CO dont les causes peuvent être les suivantes :
 - perturbation dans le procédé,
 - niveaux élevés de CO ambiants dus à une haute teneur en matières organiques dans la matière première,
 - interruption du système d'alimentation en combustibles,
 - perturbation dans le procédé de combustion.
- comparer et évaluer les situations actuelle et optimale, identification du potentiel d'optimisation et définition des priorités – analyse des écarts ;
- optimisation du procédé, du système d'analyse, en veillant à la disponibilité, à la fiabilité et à la vitesse, optimisation des mesures/techniques de réaction.

En outre, dans le but d'identifier toute cause et de gérer les contre-mesures/techniques, les informations suivantes sont requises :

- informations sur la fiabilité, la disponibilité et le comportement dynamique des équipements d'analyse ;
- informations statistiques sur l'évolution du CO ;
- informations sur les combustibles utilisés, le système d'alimentation et le procédé.

Les systèmes d'alimentation conçus pour éviter tout afflux brutal de combustible dans le four afin d'assurer une stabilité de fonctionnement du système de combustion peuvent limiter les pics de CO.

Afin de contrôler le niveau de CO dans un four à ciment, une mesure de CO automatique est utilisée pour surveiller en permanence le niveau de CO dans les gaz résiduels. Cette mesure/technique doit être optimisée pour le temps de réaction et la procédure d'arrêt et elle doit être correctement maintenue. Le système idéal de surveillance du CO a un court temps de réaction et doit se trouver à proximité de la source de CO, comme à la sortie de la tour du préchauffeur, ou à l'entrée du four si celui-ci fonctionne en voie humide. Il convient toutefois de réaliser une analyse du temps mort de l'ensemble du système, y compris du temps de rétention causé par le volume du conduit. Le temps mort pour laisser l'échantillon de CO aller du point de soutirage à l'analyseur sera idéalement de 20 à 30 secondes environ (temps de latence d'analyse). Prolonger le temps de latence de 10 à 30 secondes, comme le temps de réaction d'analyse, devrait donner le temps mort maximum total avant qu'environ 85 % de la valeur maximale ne soit atteinte. Le temps mort total détermine le moment où il convient d'agir, c'est-à-dire ni trop tôt, ni trop tard. Avec une analyse plus détaillée de la pente du signal de CO, il est possible de prévoir plus précisément quand le système à haute tension du filtre électrostatique doit être arrêté et quand il peut être remis en marche (d'où le signalement de la fin du pic de CO).

Le temps de latence de surveillance des niveaux de CO peut être réduit en augmentant le flux de l'échantillon, ce qui réduit la distance entre le point de prélèvement et l'analyseur, réduit le volume analysé et accélère le signal de signalement électronique. Des systèmes in situ rapides avec un temps de réponse de moins de 3 secondes sont disponibles, mais ils atteignent leurs limites avec les gaz fortement chargés en poussières. Il est généralement essentiel de suivre scrupuleusement un programme d'entretien et d'étalonnage. Cependant, les plages et les composants de l'analyseur doivent dûment prendre en charge les limites critiques pouvant atteindre 5 % pour le CO et 3 % pour le CH₄.

S'il est impossible d'éliminer les pics de CO, toute source d'ignition, notamment les équipements sous haute tension des filtres électrostatiques, doivent faire l'objet d'une attention particulière. L'arrêt d'urgence des équipements sous haute tension est l'ultime recours et n'est pas souhaitable. Des charges statiques peuvent constituer d'autres sources d'ignition potentielles, elles sont provoquées par une friction solide/solide ou aussi par les ventilateurs que l'on peut retrouver dans n'importe quel collecteur de poussières. En général, la limite critique est >8 % CO ou – CH₄ – en présence de >6 % O₂. Dans la réalité, le pic de CO traverse rapidement la rampe gaz et atteindra la zone critique pour former une source d'ignition avant que le système d'analyse ne soit en mesure de donner l'alarme.

Par conséquent, le niveau d'action doit être bien en dessous du niveau théorique et dépend en outre des concentrations en CH₄ et en H₂, tout particulièrement lorsque le combustible utilisé est du gaz naturel.

Les interruptions surviennent surtout pendant la phase de démarrage. Pour un fonctionnement en toute sécurité, les analyseurs de gaz pour la protection du filtre électrostatique doivent être en ligne pendant toutes les phases d'exploitation. Il est possible de limiter les arrêts de l'unité en utilisant un système de secours en service.

Avantages pour l'environnement

Réduction des risques d'explosion, des pics de CO et des émissions de poussières (particules).

Effets croisés

Des émissions de poussières (particules) provoquées par des pics de CO peuvent se produire.

Données d'exploitation

Il est possible de trouver du CO dans les gaz résiduels à des concentrations pouvant atteindre 0,1 % avec en plus du CO provenant du carbone contenu dans les matières premières.

Des émissions allant de 200 à 2 200 mg/Nm³ (moyenne annuelle) ont été rapportées à partir de mesures en continu (cf. Figure 1.34 dans la Section 1.3.4.4.2).

Des pics de CO peuvent se produire en quelques minutes, ou même secondes, et atteindre rapidement une limite d'interruption opérationnelle (cf. Sections 1.3.4.1.1 et 1.4.4.3.1). La fréquence des pics de CO peut être réduite et des exemples de leur durée totale allant de 1 à 29 minutes par an, soit entre <0,00 1 et 0,009 % respectivement du temps de marche total du four ont été rapportés (cf. Section 1.3.4.1.1) [158, Allemagne, 2007].

Le Tableau 1.38 décrit un exemple de mesures/techniques primaires pouvant être utilisées pour empêcher les pics de CO au niveau des filtres électrostatiques. L'une des premières actions standard à prendre pourrait être de réduire l'alimentation en combustible et le niveau de tension élevé avant l'interruption complète de l'alimentation et l'arrêt automatique des transformateurs de haute tension. Le système doit ensuite être purgé en maintenant les ventilateurs en marche. Le temps de purge nécessaire peut être déterminé de la même manière que le temps de latence.

Mesures/techniques primaires pour empêcher les pics de CO		
Points de mesure	Niveau de CO (%)	Mesure
Dans une tour du préchauffeur	0,5	Alarme, arrêt du système de combustion du précalcinateur/de l'entrée du four
	1,2	Arrêt du système de combustion principal
	2,5	Arrêt de la haute tension du filtre électrostatique
Après une tour du préchauffeur	0,5	Alarme, arrêt du système de combustion du précalcinateur/de l'entrée du four
	0,8	Arrêt du système de combustion principal
	1,5	Arrêt de la haute tension du filtre électrostatique
	0,5	Redémarrage de l'équipement haute tension du filtre électrostatique

Tableau 1.38 : Exemple de mesures/techniques primaires pour empêcher les pics de CO liés aux filtres électrostatiques
[60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [83, CEMBUREAU, 2006]

Applicabilité

Les mesures/techniques de réduction des pics de CO sont applicables à tous les types de fours.

L'installation d'un appareil de surveillance automatique du CO pour une surveillance en continu des gaz résiduels sur les fours à combustion secondaire peut garantir la fiabilité opérationnelle des filtres à travers l'arrêt séquentiel du système de combustion pendant un pic de CO.

L'utilisation de différents combustibles, notamment de combustibles solides, peut être à l'origine d'une instabilité de fonctionnement du système de combustion susceptible de causer des pics de CO. Le système d'alimentation doit être conçu de manière à éviter tout afflux brutal de combustible dans le four. De ce point de vue, les propriétés de circulation des combustibles solides sont très importantes ; elles doivent être soigneusement contrôlées pour empêcher l'encrassement et le colmatage des systèmes de préparation et d'alimentation en combustible.

Filtres à manches

Les filtres à manches utilisés dans des atmosphères très critiques peuvent également rencontrer des problèmes. Il convient donc également de maintenir le niveau de CO d'exploitation aussi bas que possible. Comme avec les filtres électrostatiques, d'autres composants gazeux combustibles comme le CH₄ et le H₂ abaisseront le niveau critique ; par exemple, si de l'hydrogène est présent à environ 2 %, le niveau critique est réduit à environ 5 %.

Les charges statiques causées par la friction de fibres synthétiques ou, avec des filtres hybrides (combinaison d'un filtre électrostatique et d'un filtre à manches), la charge statique accumulée sur les manches constituent des sources d'ignition potentielles propres aux filtres à manches. Afin d'éviter les interruptions, notamment des broyeurs à charbon, les manches sont dotées d'une maille de fibres en acier inoxydable ou d'une surface conductrice et elles sont mises à la terre sur le compartiment métallique des manches. De la même façon pour les collecteurs de poussières hybrides, la mise à la terre du support des manches avec le compartiment métallique est recommandée. Comme avec les filtres électrostatiques, le CO doit être purgé. Pour purger les broyeurs à charbon, il est préférable d'utiliser des gaz inertes, comme le gaz du four, du CO₂ ou du N₂.

Aspects économiques

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.
Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

Recommandations quant au contrôle des pics de CO (cf. Section 4.2.6) [83, CEMBUREAU, 2006] [60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [158, Allemagne, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.4 Réduction des émissions de carbone organique total (COT)

Description et avantages pour l'environnement

Dans des conditions normales, les émissions de composés organiques volatils (COV) sont faibles, mais elles peuvent être plus importantes si les matières premières utilisées dans la cimenterie en contiennent. Il serait préférable, quand cela est possible, que les matières premières naturelles ou les déchets à forte teneur en composés organiques volatils ne soient pas acheminés dans le four avec l'alimentation en matières premières et que les combustibles à forte teneur en substances halogénées ne soient pas utilisés pour la combustion secondaire.

Pour de fortes concentrations en composés organiques volatils, on peut considérer l'adsorption sur du charbon actif comme dans d'autres secteurs.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

Les émissions de COT déclarées par les cimenteries européennes vont de 1 à 40 mg/Nm³ (moyennes annuelles) et peuvent être plus élevées en fonction des caractéristiques de la matière première (cf. Section 1.3.4.5).

Lors de la co-incinération des déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

Applicabilité

Ces mesures/techniques sont en principe applicables aux fours à ciment.

Aspects économiques

Aucune donnée fournie.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [59, Commission européenne, 2000], [76, Allemagne, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.5.5 Réduction du chlorure d'hydrogène (HCl) et du fluorure d'hydrogène (HF)

Description et avantages pour l'environnement

L'utilisation de matières premières et de combustibles à faible teneur en chlore et en fluorure peut réduire les émissions (cf. également Sections 1.4.3.2 et 1.4.3.3). En outre, l'utilisation des techniques d'injection d'absorbants ou d'épuration peut également avoir une influence sur les émissions de HCl et de HF.

Les composés chlorés se condensent sur le cru ou les poussières du four à des températures comprises entre 700 et 900 °C. Ils présentent un comportement cyclique et peuvent s'enrichir dans la zone située entre le four rotatif et le préchauffeur. L'utilisation d'un bypass à l'entrée du four permet de réduire efficacement les cycles des chlorures alcalins. En outre, avec l'utilisation de matières premières et de combustibles à faible teneur en chlore, la circulation du chlore est faible et cela peut limiter le cycle d'enrichissement résultant de la circulation interne entre le four et le préchauffeur.

90 à 95 % du fluorure présent dans les fours rotatifs est capturé par le clinker et le reste est lié avec la poussière sous forme de fluorure de calcium (CaF_2) qui est stable dans les conditions de la cuisson.

Effets croisés

L'utilisation d'un bypass (élimination de matières premières chaudes et de gaz chaud) augmente la consommation d'énergie spécifique (cf. Section 1.4.2.1.4) ainsi que la quantité de déchets à mettre au rebut.

Données d'exploitation

Des données sur les meilleures performances en matière d'émissions de HCl dans une plage allant de 0 à 8 mg/Nm³ (moyenne annuelle) ont été communiquées, mais elles dépendent de la teneur de chlore des matières premières et des combustibles (cf. Section 1.3.4.8.1).

Les meilleures performances conduisent à des émissions de HF des fours à ciment inférieures à 0,6 mg/Nm³ (moyenne annuelle), exprimés en HF (cf. également Section 1.3.4.8.2).

Lors de la co-incinération des déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

Applicabilité

Ces mesures/techniques sont en principe applicables à l'industrie du ciment.

Aspects économiques

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[59, Commission européenne, 2000], [76, Allemagne, 2006], [97, CEMBUREAU, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.6 Réduction des émissions de polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et de polychlorodibenzofuranes (PCDF)

Description et avantages pour l'environnement

Les fours à ciment émettent généralement peu de PCDD/F ; cependant, il est possible de recourir à des mesures/techniques primaires afin de les minimiser, par exemple :

- une conduite régulière et stable du four au plus près des valeurs de consigne des paramètres du procédé est bénéfique pour toutes les émissions des fours ainsi que pour la consommation d'énergie. Pour ce faire il est possible de :
 - optimiser la conduite des fours, y compris avec un système de régulation automatique informatisé ;
 - utiliser des systèmes d'alimentation en combustibles modernes.
- minimisation de la consommation d'énergie thermique par le biais :
 - du préchauffage et de la précalcination en tenant compte de la configuration existante du four.
- sélection et contrôle soigneux des matières introduites dans un four.
 - sélection et utilisation de matières premières et de combustibles homogènes avec une faible teneur en soufre, en azote, en chlore, en métaux et en composés organiques volatils, si possible.

Pour minimiser la reformation des PCDD/PCDF, les mesures/techniques primaires ci-après sont considérées les plus importantes :

- refroidissement rapide des gaz résiduels du four à moins de 200°C dans les fours longs en voie humide et sèche sans préchauffeur. Dans les fours modernes avec préchauffeur et précalcinateur, cette caractéristique est déjà intégrée ;
- limitation ou non utilisation dans le cru des déchets utilisés comme matières premières s'ils contiennent des matières organiques chlorées ;
- non utilisation de déchets combustibles au démarrage et à l'arrêt du four ;
- surveillance et stabilisation des paramètres critiques du procédé, c'est-à-dire cru et combustibles homogènes, dosage régulier et excès d'oxygène [86, EURITS, 2006], [88, SINTEF, 2006]
- non utilisation de combustibles à forte teneur en substances halogénées pour la combustion secondaire.

Cependant, si de fortes concentrations en PCDD/PCDF sont observées, l'adsorption sur du charbon actif peut être considérée comme dans d'autres secteurs.

Effets croisés

L'utilisation de systèmes de trempe des gaz résiduels composés d'un système de pulvérisation d'eau dans la conduite de gaz peut avoir une influence sur l'efficacité énergétique.

Données d'exploitation

La plupart des fours à ciment peuvent atteindre un niveau d'émission de 0,1 ng I-TEQ/Nm³ si des mesures/techniques primaires sont appliquées [88, SINTEF, 2006]. En 2004, des mesures ponctuelles ont montré que nombreux étaient les fours dans l'UE des 27 et l'UE des 23+ à atteindre des niveaux d'émission compris entre <0,03 et 0,05 ng I-TEQ/Nm³ grâce à l'application de mesures/techniques primaires (cf. Figure 1.39 dans la Section 1.3.4.6). En outre, des niveaux d'émission de <0,03 ng I-TEQ/Nm³ (moyennes annuelles) étaient atteints dans de nombreuses cimenteries (cf. Figure 1.38 dans la Section 1.3.4.6).

Applicabilité

Ces mesures/techniques sont en principe applicables aux fours à ciment. Dans les fours en voie humide, les conditions de contrôle après le four peuvent limiter les émissions de PCDD/F.

Aspects économiques

Aucune donnée fournie.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Situation locale.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[86, EURITS, 2006], [88, SINTEF, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.7 Réduction des émissions de métaux**Description et avantages pour l'environnement**

Il faut éviter d'introduire des matériaux à forte teneur en métaux volatils dans le four. L'utilisation de matériaux à forte teneur en métaux volatils, comme le Hg et le Tl, doit tout particulièrement être contrôlée, car ceux-ci conduiront à des émissions plus élevées alors que d'autres métaux se retrouveront dans le clinker et les poussières. Une sélection attentive des substances introduites dans le four et la garantie de leurs caractéristiques contribuent à réduire les émissions, par exemple l'utilisation d'un système d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des déchets utilisés (cf. Sections 1.4.3.2 et 1.4.3.3).

L'accumulation de métaux, en particulier le thallium, dans les cycles internes et externes des fours à ciment provoque une augmentation des émissions avec l'allongement des temps de marche du four. L'interruption totale ou partielle de ces cycles permet de les réduire. Cependant, comme les cycles internes et externes sont en relation étroite, il suffit d'interrompre le cycle externe ce qui est possible en évacuant la poussière collectée dans l'installation d'épuration au lieu de la réintégrer dans le cru. Si leur composition chimique s'y prête, ces poussières de four à ciment rebutées peuvent être directement incorporées au ciment au stade du broyage [27, Université de Karlsruhe, 1996].

Comme les métaux émis (sauf une partie du mercure) sont dans une large mesure liés aux poussières, les stratégies de réduction des métaux découlent de celles de la réduction des émissions de poussières. Un traitement des poussières efficace réduit les émissions de métaux. Une des méthodes de réduction des émissions de mercure consiste à abaisser la température des gaz. Les éléments non volatils restent dans le four et sont intégrés dans la composition chimique du clinker. Si les concentrations en métaux volatils (en particulier le mercure) sont élevées, leur teneur (en particulier leur teneur en mercure) dans les matériaux doit être minimisée et il peut être nécessaire de limiter l'entrée de ces substances dans le four (cf. Sections 1.3.4.13, 1.4.3.2 et 1.4.3.3).

En outre, il est possible de les adsorber à l'aide de charbon actif. Les métaux semi-volatils se condensent sous forme de fumées fines et sont capturés, avec toutefois une efficacité d'abattement moindre que pour les métaux non volatils. Lorsque les métaux non volatils sont introduits dans le four, ils sont en grande partie capturés dans le clinker (cf. Section 1.3.4.7).

Effets croisés

Un traitement des poussières efficace réduit également les émissions de métaux.

Données d'exploitation et applicabilité

L'injection de charbon actif en poudre permet l'absorption du mercure. Une efficacité d'abattement du mercure (métallique et ionique) d'environ 85 et 95 % a été signalée pour cette mesure/technique. Cela donne alors des émissions de Hg de 0,01 à 0,03 mg/Nm³. Cependant, aucune méthode de référence industrielle n'existe pour cette mesure/technique.

Le filtre statique à charbon actif ou à coke absorbe le mercure avec les PCDD/F, il se présente sous forme de lit à garnissage cloisonné en modules. Le recours à cette mesure/technique donne des émissions de Hg inférieures à 0,03 mg/Nm³. Le filtre doit être régulièrement remplacé lorsqu'il est saturé. Les déchets, comme le charbon actif usé avec les PCDD/F et autres polluants comme le mercure, sont dangereux et doivent être traités comme tels [86, EURITS, 2006].

Cependant, une seule usine utilise un filtre à charbon dans les pays de l'UE des 23+, il s'agit de celle de Siggenthal en Suisse (cf. Section 1.4.5.2.3).

En outre, des émissions de mercure comprises entre <0,01 et 0,05 mg/Nm³ ont également été atteintes sans injection de charbon actif comme le montre la Figure 1.46 (mesures ponctuelles) et la Figure 1.47 (moyennes annuelles, cf. Section 1.3.4.7.1).

Lors de la co-incinération des déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

Aspects économiques

Le besoin d'un système d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des matériaux introduits dans le four peut induire des coûts supplémentaires.

Une suppression efficace des poussières évite des coûts élevés sur les filtres à charbon actif.

Pour l'usine de Siggenthal en Suisse, la ville de Zürich a financé près de 30 % de l'investissement total, soit environ 15 millions d'euros.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Installations de référence

Siggenthal, Suisse

Documents de référence

[27, Université de Karlsruhe, 1996], [59, Commission européenne, 2000], [86, EURITS, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.8 Exemples de données financières relatives à différentes mesures/techniques de traitement des gaz résiduels et à des mesures/techniques primaires pouvant être utilisées pour réduire les émissions

1.4.8.1 Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des poussières

Le Tableau 1.39 fournit des exemples de calculs du coût des mesures/techniques de traitement des poussières. Différentes mesures/techniques de traitement des poussières ont été étudiées, comme les filtres électrostatiques et les filtres à manches. Les coûts d'exploitation variables comprennent les coûts de l'électricité, de la main-d'œuvre et les coûts d'élimination des poussières ; ils sont indiqués à part dans le tableau. En outre, la Section 1.4.4.3.2 détaille les principales caractéristiques des différents filtres à manches ainsi que leurs coûts ; les applications techniques des fibres sont présentées dans le Tableau 1.32. Les informations du Tableau 1.32 sont compilées depuis 2003 et sont sous réserve des coûts fixes locaux de l'énergie et de la main-d'œuvre. Il convient de souligner que le Tableau 1.32 ne prend pas en compte les coûts de remplacement des éléments filtrants des filtres à manches.

Investissements et coûts des mesures/techniques de traitement des poussières					
Paramètre	Unité	Mesure/technique			
		Filtre électrostatique		Filtre à manches	
Description de l'installation de référence		I ⁽⁰⁾	II	I ⁽⁰⁾	II
Capacité	t de clinker/j	1 100	3 000	1 100	3 000
Durée de vie	année	35		35	
Facteur d'utilisation	h/an	7 680		7 680	
Investissement	k euros	1 500	2 100 – 4 600 ⁽⁸⁾ 4 500 – 6 000 ⁽⁹⁾	1 750	2 100 – 6 800 ⁽¹⁰⁾ 4 000 – 8 000 ⁽¹¹⁾
Coûts d'équipement annualisés	k euros				
Taux d'intérêt	%/100/an	4		4	
Durée de vie de l'équipement de contrôle	année	10		10	
Total	k euros	184,94		215,76	
Total	k euros/tonne de clinker	5,25E-04		6,13E-04	
Coûts d'exploitation fixes	%/an ²⁾	4		4	
Total	k euros	60		70	
Total	k euros/tonne de clinker	1,70E-04		1,99E-04	
Coûts d'exploitation variables	k euros/tonne de clinker	3,15E-04		3,77E-04	
Coûts par tonne de clinker	k euros/tonne de clinker	1,01E-03		1,19E-03	
Coûts par tonne de PM ³⁾ abatue	k euros/t de PM abatue				
Facteur d'émissions non traitées ¹⁾	t de PM/t de clinker	0,13 56,520 mg/Nm ³		0,13 56,520 mg/Nm ³	
Facteur d'émissions traitées ¹⁾	t de PM/t de clinker	0,000046 20 mg/Nm ³		0,000046 20 mg/Nm ³	
Total	k euros /t de PM abatue	0,008		0,009	
Total des coûts d'exploitation	euro(s)/t de clinker		0,1 – 0,3		0,1 – 0,35
Détermination du coût variable d'exploitation					

Investissements et coûts des mesures/techniques de traitement des poussières					
Paramètre	Unité	Mesure/technique			
		Filtre électrostatique		Filtre à manches	
Coûts d'électricité ⁴⁾					
Besoins en électricité supplémentaires (λ^e) ⁵⁾	kWh/t de clinker	4,15 190 kW		5,24 240 kW	
Prix de l'électricité (c^e)	EUR/kWh	0,0569		0,0569	
Total	k euros/tonne de clinker	2,36E-04		2,98E-04	
Coûts de main-d'œuvre ⁶⁾					
Besoin en main-d'œuvre (λ^l)	année-personne/t de clinker	2,13E-06		2,13E-06	
Salaires (c^l)	k euros/année-personne	37,234		37,234	
Total	k euros/tonne de clinker	7,93E-05		7,93E-05	
Coût d'élimination des poussières ⁷⁾					
Total	k euros/tonne de clinker	0		0	
Total des coûts variables d'exploitation	k euros/tonne de clinker	3,15E-04		3,66E-04	

k euros = mille euros

0) données de 2000, cimenterie de référence produisant 1 100 tonnes par jour, représentant la moyenne de l'UE des 15 en 1995

1) 10 % O₂ et gaz sec

2) d'investissement

3) Répartition : 50 % filtre électrostatique et 50 % filtre à manches ; utilisation de la moyenne entre les deux types de filtres

4) Coûts d'électricité = $\lambda^e \cdot c^e / 10^3$ (k euros/t)

5) Besoin d'électricité supplémentaire = nouvelle consommation totale – total ancienne consommation

6) Coûts de main-d'œuvre = $\lambda^l \cdot c^l$ (k euros/t)

7) Coûts d'élimination des poussières = $\lambda^d \cdot c^d \cdot \text{efnon traitées} \cdot \eta / 10^3$ (k euros/t)

Efnon traitées : facteur d'émissions non traitées de polluant (t de polluant/t)

λ^d : besoin d'élimination des poussières (t/t de polluant éliminé)

c^d : coût spécifique d'élimination des poussières (euro/t)

η : efficacité de suppression (=1 -ef traitées /efnon traitées)

8) Données de 2000, incluant l'investissement pour la tour de conditionnement et le ventilateur du filtre (0,6 million – 0,8 million d'euros)

9) Données de 2006,

10) incluant l'investissement pour la tour de conditionnement et le ventilateur du filtre (0,6 million – 0,8 million d'euros)

11) Pour une efficacité de séparation >99,9 %, en fonction du type et du nombre de manches utilisées

Tableau 1.39 : Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des poussières

[9, CEMBUREAU, novembre 1997], [76, Allemagne, 2006], [100, France, 2006], [102, France/DFIU/IFARE Karlsruhe, 2003], [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.8.2 Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des NO_x

Le Tableau 1.40 fournit des exemples de calculs des coûts de mesures/techniques de réduction des NO_x pour une cimenterie de référence d'une capacité de production représentative de la moyenne de l'UE des 15 en 1995 (1100 t/j) ainsi que des exemples d'installations de différentes capacités. Les mesures/techniques de réduction des NO_x étudiées sont la SNCR, la SCR et les mesures/techniques primaires de réduction des émissions de NO_x. Les coûts d'exploitation variables comprennent les coûts de l'électricité et de la main-d'œuvre ; les coûts de l'ammoniac utilisé pour la SNCR sont indiqués à part dans ce tableau.

En outre, la Section 4.2.4.2, Tableau 4.26, fournit une comparaison établie par l'UBA pour une usine allemande des coûts des mesures/techniques de réduction des NO_x de la SNCR par rapport à ceux de la SCR. L'investissement et les coûts d'exploitation ont tous deux été calculés pour différents niveaux de NO_x atteints, c'est-à-dire 200 et 500 mg/Nm³. Comme le montre le Tableau 4.26, les coûts d'exploitation de la SNCR et de la SCR (coûts de remplacement du catalyseur inclus) sont grosso modo identiques pour un niveau de NO_x cible de 500 mg/Nm³, alors que le total des coûts spécifiques de la SCR est plus élevé d'environ 50 % que pour la SNCR. A un niveau de NO_x cible de 200 mg/Nm³, la SCR semble plus efficace en matière de coûts d'exploitation, cependant le total des coûts spécifiques est du même ordre de grandeur que pour la SNCR [76, Allemagne, 2006].

Investissements et coûts des mesures/techniques de réduction des NO _x						
Paramètre	Unité	Mesure/technique de réduction ¹⁾				
		Mesures/techniques primaires de réduction des NO _x ⁰⁾	Refroidissement de la flamme ⁸⁾	Combustion étagée ⁷⁾	SNCR ⁰⁾	SCR
Description de l'installation de référence						
Capacité	t de clinker/j	1 100	3 000	3 000	1 100	1 500 ⁷⁾
Capacité	t de clinker/an	352 000				
Durée de vie	année	35			35	
Facteur d'utilisation	h/an	7 680			7 680	
Investissement	million(s) d'euros	0,25	jusqu'à 0,2	0,1 – 2 ⁸⁾ 1 – 4 ⁹⁾ 15 – 20 ¹⁰⁾	0,6	
Coûts d'investissement spécifiques	euro(s)/t de clinker				0,08 – 0,14 ⁷⁾	0,83 – 0,87 ⁷⁾
Coûts d'équipement annualisés	k euros					
Taux d'intérêt	%/an	4			4	
Durée de vie de l'équipement de contrôle	année	8			10	
Total	k euros	37,13			166,97	
Total	k euro(s)/t de clinker	1,05E-04	jusqu'à 2,5E-04		4,74E-04	
Coûts d'exploitation fixes	%/an 2)	4			4	
Total	k euros	10			24	
Total	k euro(s)/t de clinker	2,84E-05			6,82E-05	
Coûts d'exploitation variables	k euro(s)/t de clinker	2,64E-05			5,69E-04	
Coûts par tonne de clinker	k euro(s)/t de clinker	1,60E-04			1,11E-03	
Coûts par tonne de NO_x³⁾ abatue	k euros/t de NO _x réduits				330 – 450 ⁷⁾	470 – 540 ⁷⁾
Facteur d'émissions non traitées ¹⁾	t de NO _x /t de clinker	0,00322 1 400 mg/Nm ³			0,002415 1 050 mg/Nm ³	

Investissements et coûts des mesures/techniques de réduction des NO _x						
Paramètre	Unité	Mesure/technique de réduction ¹⁾				
		Mesures/techniques primaires de réduction des NO _x ⁰⁾	Refroidissement de la flamme ⁸⁾	Combustion étagée ⁷⁾	SNCR ⁰⁾	SCR
Efficacité de réduction ¹⁾	%	25			62	
Total	k euros/t de NO _x abatue	0,2			0,74	
Coûts de remplacement des catalyseurs	euro(s)/t de clinker					0,10 – 0,13 ⁷⁾
Détermination des coûts variables d'exploitation						
Coûts d'électricité³⁾						
Besoins en électricité supplémentaires (λ ^e) 4)	kWh/t de clinker	0,44 20 kW			0,15 5,96 kW	
Prix de l'électricité (ce)	euro(s)/kWh	0,0569			0,0569	
Total	k euro(s)/t de clinker	2,48E-05			7,40E-06 0,03 – 0,067)	0,10 – 0,11 ⁷⁾
Coûts de l'ammoniac⁶⁾						
Stockage de l'eau NH ₃	million(s) d'euros					
efnon traitées	t de polluant/t de clinker	-			0,002415	
Rapport NH ₃ /NO _x (mol/mol) pour les NO _x émis		-			1,5	
Besoins spécifiques de NH ₃ (λ ^d)	t/t de polluant éliminé	-			0,89	
Prix du NH ₃ (cs)	euros/t	-			0,26 – 0,64 ⁷⁾ 400	0,13 – 0,26 ⁷⁾
Efficacité d'élimination (η)	%	-			62	
Total	keuro(s)/t de clinker	-			5,36E-04	
Coûts de main-d'œuvre⁵⁾						
Besoin en main-d'œuvre (λ ⁱ)	année-personne/t de clinker	7,10E-07			7,10E-07	
Salaires (c ¹)	keuros/année-personne	37,234			37,234	
Total	keuro(s)/t de clinker	2,64E-05			2,64E-05	
Total des coûts variables d'exploitation	k euros/t	2,48E-05			5,69E-04 0,30 – 0,70 ⁷⁾	0,33 – 0,70 ⁷⁾
Total des coûts (investissement et exploitation)	euro(s)/t de clinker				0,38 – 0,62 ⁷⁾ 0,85 ¹¹⁾	0,83 – 0,87 ⁷⁾ 2,3 ¹¹⁾

k euros = mille euros

0) données de 2000, cimenterie de référence produisant 1 100 tonnes par jour représentant la moyenne de l'UE des 15 en 1995

1) 10 % O₂ et gaz sec

2) d'investissement

3) Coûts d'électricité = λ^e • ce/10³ (keuros/t)

4) Besoin en électricité supplémentaire = nouvelle consommation totale – total ancienne consommation

5) Coûts de main-d'œuvre = λⁱ • c¹ (k euros/t)

6) Coûts de l'ammoniac = λ^e • ce • efnon traitées • η/10³ (k euros/t)
Efnon traitées : facteur d'émissions non traitées de polluant (t de polluant/t)

λ^d : besoin de NH₃ spécifique (t/t de polluant éliminé)

c^d : coût spécifique d'élimination des poussières (euro/t)

η : efficacité de suppression (=1 -eftraitées/efnon traitées)

7) Allemagne, dépend du niveau de réduction du niveau de NO_x à 500 ou à 200 mg/Nm³

8) Four à précalcinateur

Investissements et coûts des mesures/techniques de réduction des NO _x						
Paramètre	Unité	Mesure/technique de réduction ¹⁾				
		Mesures/techniques primaires de réduction des NO _x ⁹⁾	Refroidissement de la flamme ⁸⁾	Combustion étagée ⁷⁾	SNCR ⁰⁾	SCR
9) Précalcinateur et conduite d'air tertiaire pour un four à préchauffeur produisant 3 000 t/j avec refroidisseur à grilles dans un four à précalcinateur						
10) Transformation d'un four à préchauffeur produisant 3 000 t/j avec refroidisseur planétaire en four à précalcinateur avec refroidisseur à grilles						
11) Autriche						

Tableau 1.40 : Exemples de coûts des mesures/techniques de réduction des NO_x
 [76, Allemagne, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [100, France, 2006], [102, France/DFIU/IFARE Karlsruhe, 2003], [105, YARA, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

1.4.8.3 Exemples de données financières relatives aux mesures/techniques de réduction des SO_x

Le Tableau 1.41 fournit des exemples de calculs des coûts de mesures/techniques de réduction des SO_x pour une cimenterie de référence produisant 1 100 t/j. Les mesures/techniques de réduction des SO_x étudiées sont l'injection d'absorbants et/ou les épurateurs en voie humide. Les coûts d'exploitation variables comprennent les coûts de l'électricité et de la main-d'œuvre ; les coûts d'élimination des déchets et de la chaux sont détaillés à part dans ce tableau.

Investissements et coûts des mesures/techniques de réduction des SO _x			
		Mesure/technique de réduction	
	Unité	Injection d'absorbants ⁰⁾	Épurateur en voie humide 75 % ⁰⁾
Description de l'installation de référence			
Capacité	t de clinker/j	1 100	1 100
Capacité	t de clinker/an	352 000	352 000
Flux de gaz résiduaire ¹⁾	Nm ³ /h		105 417
Durée de vie	année	35	35
Facteur d'utilisation	h/an	7 680	7 680
Investissement	k euros	200	5 500
Coûts d'équipement annualisés	k euros		
Taux d'intérêt	%/an	4	4
Durée de vie de l'équipement de contrôle	année	10	10
Total	k euros	24,66	678,10
Total	k euro(s)/t de clinker	7,01E-05	1,93E-03
Coûts d'exploitation fixes	%/an ²⁾	4	4
Total	k euros	8	220
Total	k euro(s)/t de clinker	2,27E-05	6,25E-04
Coûts d'exploitation variables	k euro(s)/t de clinker	6,98E-04	6,06E-04
Coûts par tonne de clinker	k euro(s)/t de clinker	7,91E-04	3,16E-03
Coûts par tonne de SO_x abatue	k euros/t de SO _x traités		
Facteur d'émissions non traitées	t de SO _x /t de clinker	0,0023 1 000 mg/Nm ³	0,00368 1 600 mg/Nm ³
Efficacité de la réduction	%	60	75
Total	k euros/t de SO _x traités	0,573	1,144
Détermination des coûts variables d'exploitation			
Coûts d'électricité³⁾			
Besoins en électricité supplémentaires (λe) ⁴⁾	kWh/t de clinker	1,13 70 kW	8,18 375 kW
Prix de l'électricité (c ^e)	euro(s)/kWh	0,0569	0,0569
Total	k euro(s)/t de clinker	8,69E-05	4,66E-04
Coûts d'élimination des déchets			
Facteur d'émissions non traitées de polluant (efnon traitées ⁶⁾)	t de polluant/t de clinker	0,0023	-
Besoin d'élimination des déchets (λ ⁸⁾)	t/t de polluant éliminé	0	-
Coûts spécifiques d'élimination des déchets (c ⁸⁾)	euros/t		-
Efficacité d'élimination (η)	%	60	-
Total	k euro(s)/t de clinker	0	0
Coûts de la chaux/du calcaire			
Facteur d'émissions non traitées de polluant (efnon traitées ⁶⁾)	t de polluant/t de clinker	0,0023	0,00368
	Rapport Ca/S (mol/mol) pour les SO _x émis	2,2	
	Rapport Ca/S (mol/mol) pour les SO _x éliminés		1,02

Investissements et coûts des mesures/techniques de réduction des SO _x			
		Mesure/technique de réduction	
	Unité	Injection d'absorbants ⁰⁾	Épurateur en voie humide 75 % ⁰⁾
Besoin spécifique d'absorbants (λ ^s)	t de chaux /t de polluant éliminé	4,24	-
Besoin spécifique de calcaire (λ ^s)	t de chaux /t de polluant éliminé		1,59
Prix de l'absorbant (c ^s)	euros/t	100	20
Efficacité d'élimination (η)	%	60	75
Total	k euro(s)/t de clinker	5,85E-05	8,80E-05
Coûts de main-d'œuvre⁵⁾			
Besoin en main-d'œuvre (λ ¹)	année-personne/t de clinker	7,10E-07	1,42E-06
Salaires (c ¹)	k euros/année-personne	37,234	37,234
Total	k euro(s)/t de clinker	2,64E-05	5,29E-05
Total des coûts variables d'exploitation	k euro(s)/t de clinker	6,98E-04	6,06E-04
k euros = mille euros 0) données de 2000, cimenterie de référence produisant 1 100 tonnes par jour, représentant la moyenne de l'UE des 15 en 1995 1) 10 % O ₂ et gaz sec 2) d'investissement 3) Coûts d'électricité = λ _e • ce/10 ³ (k euros/t) 4) Besoin en électricité supplémentaire = nouvelle consommation totale – total ancienne consommation 5) Coûts de main-d'œuvre = λ ₁ • c ₁ (k euros/t) 6) Coûts de la chaux = λ ^s • c ^s • ef _{non traitées} • η/10 ³ (k euros/t) ef _{non traitées} : facteur d'émissions non traitées de polluant (t de polluant/t) λ ^s : besoin de chaux spécifique (t/t de polluant éliminé) c ^s : prix de la chaux (euros/t) η : efficacité de suppression (=1 -ef _{traitées} /ef _{non traitées})			

Tableau 1.41 : Exemples de coûts des mesures/techniques de réduction des SO_x
 [100, France, 2006], [102, France/DFIU/IFARE Karlsruhe, 2003], [168, TWG CLM, 2007]

1.4.9 Pertes/déchets de procédé

Description

Les poussières collectées peuvent être recyclées dans le procédé de production chaque fois que possible, soit par introduction directe dans le four ou dans le cru entrant dans le four (la limite étant la teneur en métaux alcalins) ou par mélange avec les ciments. D'autres utilisations peuvent être trouvées pour les matériaux non recyclables.

Avantages pour l'environnement

Réduction du volume des déchets produits par le procédé, accompagnée d'économies sur les matières premières.

Effets croisés

La teneur en métaux des poussières collectées pose une limite à l'utilisation des celles-ci comme matières premières et elle peut avoir des incidences négatives sur les émissions de métaux.

En outre, la teneur en chlore des poussières collectées pose aussi une limite à l'utilisation de celles-ci et leur valorisation doit être adaptée de manière à satisfaire aux exigences de qualité du produit (cru introduit dans le four ou mélange avec les ciments).

Données d'exploitation

Aucune donnée fournie.

Applicabilité

La valorisation des pertes/déchets de procédé est en principe applicable à l'industrie du ciment (cf. Section 1.3.5).

Aspects économiques

Aucune donnée fournie.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

[86, EURITS, 2006], [88, SINTEF, 2006], [75, Estonie, 2006], [103, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

1.4.10 Bruit

Description

Cette section aborde les possibilités de réduction du bruit produit lors des différentes étapes du procédé de fabrication du ciment.

Il est souvent possible d'obtenir une réduction des émissions sonores en appliquant directement des mesures/techniques à la source bruyante. Les sources de bruit sont par exemple l'extraction et le traitement des matières premières ainsi que la production du ciment/clinker, les unités de concassage, les unités de broyage et de préparation, les fours à ciment eux-mêmes (par exemple les broyeurs de finition du ciment, les convoyeurs, les unités de filtration, les systèmes de refroidissement des fours, comme les refroidisseurs planétaires, etc.). Des émissions sonores peuvent être produites tout au long de la filière, des explosions dans la carrière à l'expédition du produit final.

Exemple des diverses mesures/techniques antibruit qui peuvent être mises en œuvre dans les cimenteries de manière à réduire les niveaux sonores pour la protection du voisinage :

- capotage de l'unité bruyante,
- isolation des vibrations des unités,
- revêtement intérieur et extérieur des goulottes avec un matériau résistant,
- bâtiments insonorisés pour abriter les opérations dans lesquelles interviennent des équipements de transformation des matériaux,
- construction de murs de protection antibruit,
- silencieux d'échappement pour les cheminées des gaz résiduels,
- revêtement des conduits et finalement des souffleurs qui se trouvent dans des bâtiments insonorisés.

Si les mesures/techniques antibruit susmentionnées sont inapplicables et si le transfert des unités bruyantes à l'intérieur d'un bâtiment est impossible, par exemple en raison de la taille des fours et de leurs équipements, des mesures/techniques antibruit secondaires (par exemple la construction de bâtiments ou la mise en place de barrières naturelles comme des arbres et des buissons entre la zone protégée et l'activité bruyante, par exemple le four ou la zone de stockage) peuvent être mises en œuvre. Les portes et fenêtres des surfaces bâties doivent être maintenues fermées pendant les opérations bruyantes.

Avantages pour l'environnement

Réduction des émissions sonores.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

Aucune donnée disponible.

Applicabilité

Les mesures/techniques antibruit sont en principe applicables à l'industrie du ciment (cf. Section 1.3.7).

Aspects économiques

Ces mesures/techniques peuvent être à l'origine d'investissements et de coûts de maintenance supplémentaires.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Cimenteries dans l'UE des 27.

Le chapitre sur la chaux, Section 2.4.10, fournit davantage d'informations sur la réduction du bruit et le programme antibruit.

[45, Schorcht, 2006] [81, Castle Cement UK, 2006] [168, TWG CLM, 2007]

1.4.11 Considérations générales à propos des odeurs

Les odeurs accompagnant les émissions d'hydrocarbures peuvent être évitées par postcombustion thermique, utilisation d'un filtre à charbon actif ou introduction des matières premières incriminées dans la zone la plus chaude du four.

Si les odeurs sont provoquées par les composés soufrés, une des solutions consiste à changer de combustible, de matières premières, ou les deux, cf. également Section 1.4.5.2.

Le stockage des déchets utilisés en tant que matières premières ou combustible peut également être à l'origine d'odeurs. Il est alors possible de couvrir les lieux de stockage des déchets ou bien d'utiliser des systèmes de stockage des déchets.

1.4.12 Outils de management environnemental**Description**

L'installation qui utilise et applique la meilleure technique de la façon la plus réelle et efficace obtient généralement la meilleure performance environnementale. Cela est confirmé par la définition de Directive IPPC des « techniques » comme *« aussi bien la technologie employée que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt »*.

Pour les installations concernées par la directive IPPC, le système de management environnemental (SME) est un outil que les exploitants peuvent utiliser pour résoudre de manière systématique et démontrable leurs problèmes de conception, de construction, de maintenance, d'exploitation et de mise à l'arrêt. Le SME inclut la structure organisationnelle, les responsabilités, les pratiques, les procédures, les procédés et les ressources pour développer, mettre en œuvre, entretenir, réviser et contrôler la politique environnementale. Les systèmes de management environnemental sont d'autant plus réels et efficaces lorsqu'ils font partie intégrante de la gestion et de l'exploitation de l'ensemble d'une installation.

Tous les SME efficaces intègrent la notion d'amélioration continue, c'est-à-dire que le management environnemental est un procédé et non pas un projet qu'il convient de mener à terme. Le procédé peut se concevoir de nombreuses façons différentes, mais la plupart des systèmes de management environnemental sont basés sur le cycle planifier-faire-contrôler-agir (qui est largement utilisé dans d'autres contextes de gestion d'entreprise). Le cycle est un modèle dynamique réitératif, dans lequel la fin d'un cycle amène au début du suivant, cf. Figure 1.70.

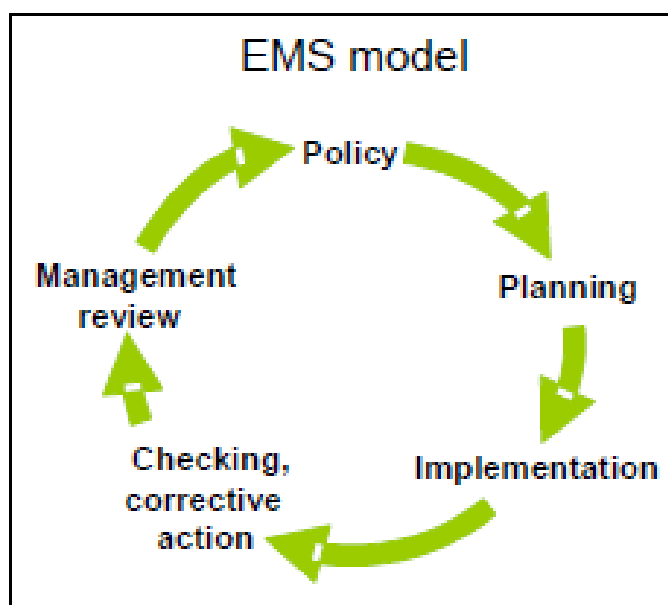


Figure 1.70 : Amélioration continue dans un modèle de SME

Beaucoup d'organisations au sein de l'Union européenne ont décidé de manière volontaire de mettre en œuvre leur système de management environnemental sur la base de la norme EN ISO 14001 : 2004 ou du système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS). L'EMAS inclut les exigences relatives au système de management de la norme EN ISO 14001, mais il insiste en plus sur le respect de la législation, sur les résultats obtenus en matière d'environnement et sur la participation du personnel. Il impose également un audit externe du système de management et la validation d'une déclaration environnementale publique (dans la norme EN ISO 14001 l'auto-déclaration est une alternative à l'audit externe). De nombreuses organisations ont également décidé de mettre en place des SME non standardisés.

Alors que tant les systèmes standardisés (EN ISO 14001 : 2004 et EMAS) que les systèmes non standardisés (« personnalisés ») considèrent en général l'*organisation* comme entité, le présent document se veut plus restrictif, n'incluant pas toutes les activités de l'organisation, par exemple concernant ses produits et services, du fait que l'entité réglementée par la Directive IPPC est l'*installation* (au sens de l'Article 2 de la Directive).

Un système de management environnemental (SME) pour une installation IPPC peut se décliner comme suit :

- a. engagement de la direction générale,
- b. définition d'une politique environnementale,
- c. planification et préparation d'objectifs et de cibles,
- d. mise en œuvre et fonctionnement des procédures,
- e. contrôle et action corrective,
- f. revue de direction,
- g. préparation d'une déclaration environnementale régulière,
- h. validation par un organisme de certification accrédité ou par un vérificateur externe SME,
- i. éléments à prendre en considération lors de la conception pour la mise à l'arrêt définitif de l'usine en fin de vie,
- j. développement de technologies plus propres,
- k. analyse comparative.

Ces caractéristiques sont expliquées plus en détail ci-dessous. Pour obtenir des informations plus détaillées sur les points (b) à (h), tous inclus dans l'EMAS, se reporter aux documents de référence indiqués ci-dessous.

a. Engagement de la direction générale :

L'engagement de la direction générale est une condition préalable à la réussite de l'EMS. Il est important que la direction générale :

- fasse du management environnemental une priorité pour l'entreprise en lui donnant une visibilité et une crédibilité ;
- identifie un haut dirigeant responsable du management environnemental ;
- favorise la création d'une culture du management environnemental et mobilise les motivations pour sa mise en œuvre ;
- définisse une stratégie (visions à long terme) pour atteindre ses objectifs environnementaux ;
- fixe à l'entreprise des cibles pour atteindre ces objectifs environnementaux ;
- définisse des actions concrètes à court et moyen terme pour la réalisation de la vision à long terme ;
- fournisse une plateforme pour intégrer le procédé décisionnel de manière à parvenir à une prévention et à un contrôle de la pollution intégrés, notamment lors de la planification de nouvelles installations ou de modifications substantielles ;
- guide l'entreprise dans ses investissements et décisions d'achat pour parvenir à une prévention et à un contrôle intégrés de la pollution continus ; la prévention et la réduction intégrées de la pollution s'obtiennent à travers un processus décisionnel et des actions intégrés, incluant l'achat de services et de matériels d'équipement, la planification, la production, la maintenance et le management environnemental ;
- définisse une politique environnementale, cf. (b) ci-dessous.

b. Définition d'une politique environnementale

La direction générale est responsable de la définition d'une politique environnementale pour l'installation et doit s'assurer que cette même politique :

- soit adaptée à la nature, à l'ampleur et aux impacts environnementaux des activités ;

- intègre un engagement en matière de prévention et de contrôle de la pollution incluant l'utilisation efficace des matières premières, de l'énergie et de l'eau ;
- inclue un engagement envers la conformité à la législation et aux réglementations applicables et pertinentes en matière d'environnement ainsi qu'aux autres exigences auxquelles l'organisation a souscrit ;
- donne un cadre pour l'établissement et la révision des objectifs et cibles environnementaux ;
- soit documentée et communiquée à tout le personnel ;
- soit disponible pour le public et toutes les parties intéressées.

c. Planification et préparation des objectifs et des cibles :

Il est important de disposer de :

- procédures d'identification des aspects environnementaux de l'installation afin de déterminer les activités qui ont ou peuvent avoir des impacts significatifs sur l'environnement et de maintenir ces informations à jour ;
- procédures pour évaluer les propositions de nouveaux procédés, unités et équipements, de changement de matières premières et auxiliaires ou combustibles, d'évolution, de modifications et de remplacements afin d'identifier les aspects environnementaux et d'influencer la planification et les achats pour optimiser les performances environnementales de l'installation concernant les objectifs de la Directive IPPC ;
- procédures pour autoriser les modifications susmentionnées et réaliser des vérifications après qu'elles ont été mises en œuvre et avant le démarrage du procédé ;
- procédures avec l'objectif d'identifier et avoir accès aux contraintes légales et de toute autre nature, auxquelles l'organisation souscrit et qui sont applicables aux aspects environnementaux de son activité ;
- établir et réviser les objectifs et cibles environnementaux documentés en tenant compte des contraintes légales et autres auxquelles l'organisation souscrit et des avis des parties intéressées ;
- établir et mettre à jour régulièrement un programme de management environnemental incluant la désignation de la responsabilité pour atteindre les objectifs et les cibles propres à chaque fonction et à chaque niveau pertinents ainsi que les moyens et le calendrier de réalisation ;
- réaliser les audits pour examiner, par exemple, l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau et des matières premières et auxiliaires.

d. Mise en œuvre et fonctionnement des procédures

Il est important d'avoir des systèmes en place pour s'assurer que les procédures sont connues, comprises et conformes et, ainsi, un management environnemental efficace inclut :

(i) Structure et responsabilité

- définition, documentation, compte-rendu et communication des rôles, des responsabilités et des autorités, y compris la nomination d'un représentant spécifique (en plus d'un haut dirigeant (cf. (a) ci-dessus)) ;
- fourniture des ressources essentielles à la mise en œuvre et à la maîtrise du système de management environnemental, y compris les ressources humaines, les compétences spécifiques et les ressources techniques et financières.

(ii) Formation, sensibilisation et compétence

- définition, documentation et communication des niveaux et des compétences requises pour chaque poste ;
- l'identification des besoins en formation garantit que toutes les personnes, dont le travail peut avoir une incidence significative sur les impacts environnementaux de l'activité, aient reçu une formation appropriée pour tous les modes de fonctionnement qu'elles peuvent rencontrer, c'est-à-dire la préparation, le démarrage, le fonctionnement ordinaire, les arrêts et les conditions d'exploitation anormales.

(iii) Communication

- établissement et maintien de procédures de communication interne entre les différents niveaux et les différentes fonctions de l'installation, tout comme de procédures favorisant le dialogue avec les parties intéressées externes et de procédures pour recevoir et documenter les demandes pertinentes des parties intéressées externes et y apporter les réponses correspondantes s'il y a lieu.

(iv) Participation du personnel

- association du personnel au procédé visant à obtenir des résultats de haut niveau en matière d'environnement en faisant appel à des formes appropriées de participation telles que le système de la « boîte à idées », le travail de groupe, fondé sur des projets, ou les comités pour l'environnement.

(v) Documentation

- établissement et maintien à jour des informations, sur support papier ou électronique, pour décrire les éléments essentiels du système de management et leurs interactions et qui indiquent où trouver la documentation correspondante.

(vi) Contrôle efficace du procédé

- contrôle approprié des procédés et équipement (y compris la prévention de la pollution et les appareils de contrôle) durant tous les modes de fonctionnement, c'est-à-dire la préparation, le démarrage, le fonctionnement ordinaire, les arrêts et les conditions d'exploitation anormales ;
- identification des indicateurs clés de performance (par exemple le débit, la pression, la température, la composition, la quantité) et des méthodes (par exemple les systèmes de pesage, les systèmes de mesure, les calculs, l'échantillonnage et l'analyse) pour la mesure et le contrôle de ces paramètres ;
- documentation et analyse des régimes de fonctionnement anormaux pour identifier les causes profondes et ensuite chercher à les résoudre pour s'assurer qu'aucun événement anormal ne se reproduise (ceci peut être facilité par une culture de « no-blame » (pas de reproches) qui attribue plus d'importance à l'identification des causes qu'à la recherche des personnes à incriminer).

(vii) Programme de maintenance

- élaboration d'un programme de maintenance structuré (incluant la maintenance préventive et corrective) fondé sur les descriptions techniques des équipements, les normes etc. ainsi que sur les défaillances des équipements et leurs conséquences
- identification à partir de l'entretien courant, des pannes et/ou des anomalies de toute éventuelle dégradation des performances environnementales ou des marges d'amélioration ;

- soutien du programme de maintenance à travers l'élaboration de systèmes d'enregistrement appropriés et des essais de diagnostic ;
 - répartition précise des responsabilités pour la planification et la réalisation des travaux de maintenance.
- (viii) Prévention des situations d'urgence et capacité à réagir
- élaboration et maintien de procédures pour identifier les accidents potentiels et les situations d'urgence et être capable de réagir de façon à prévenir et à réduire les impacts environnementaux qui peuvent y être associés.
- e. Contrôle et action corrective (cf. également analyse comparative (k)) :
- (i) Surveillance et mesurage
- élaboration et maintien de procédures documentées pour surveiller et mesurer régulièrement les principales caractéristiques des opérations et des activités qui peuvent avoir un impact environnemental significatif. Ceci inclut l'enregistrement des informations permettant le suivi de la performance, des contrôles opérationnels appropriés et de la conformité aux objectifs et cibles environnementaux de l'installation (cf. également le document de référence sur les Principes généraux de surveillance [151, Commission européenne, 2003]) ;
 - élaboration et maintien d'une procédure documentée permettant d'évaluer périodiquement la conformité à la réglementation et à la législation environnementales applicables.
- (ii) Action corrective et action préventive
- élaboration et maintien de procédures définissant les responsabilités et l'autorité pour la prise en compte et l'analyse des non-conformités aux conditions associées au permis, à d'autres contraintes légales et engagements ainsi qu'aux objectifs et cibles ;
 - prise de mesures de réduction de tout impact éventuel causé par des anomalies ainsi que pour engager et mener à bien les actions correctives et préventives adaptées à l'ampleur du problème et proportionnées à l'impact environnemental considéré.
- (iii) Enregistrements
- élaboration et maintien de procédures d'identification, d'entretien et de mise à disposition des enregistrements relatifs à l'environnement lisibles, identifiables et traçable, y compris les enregistrements relatifs à la formation et les résultats des audits et des revues.
- (iv) Audit
- élaboration et maintien d'un ou plusieurs programmes et de procédures pour les audits du système de management environnement. Ce ou ces programmes incluent des entretiens avec le personnel, une inspection des conditions d'exploitation et des équipements ainsi que l'examen des registres et de la documentation. Chaque audit donne lieu à la rédaction d'un rapport d'audit impartial et objectif par le personnel (dans le cas d'audits internes) ou par des personnes extérieures (dans le cas d'audits externes). Ce rapport couvrira le domaine d'application, la fréquence et les méthodologies de l'audit, ainsi que les responsabilités et les exigences relatives à la conduite des audits et aux comptes rendus des résultats afin de déterminer si le système de management environnemental est conforme ou pas aux dispositions planifiées et s'il a été correctement appliqué et maintenu.

- fin de l'audit ou du cycle d'audit, selon les cas, à l'issue d'une période d'une durée maximum de trois ans, en fonction de la nature, de l'ampleur et de la complexité des activités, de l'importance des impacts environnementaux associés, de l'importance et de l'urgence des problèmes rencontrés lors des audits précédents ainsi que de l'historique des problèmes environnementaux (Les activités plus complexes qui ont un impact environnemental plus important sont contrôlées plus fréquemment) ;
 - mise en place de mécanismes appropriés afin d'assurer le suivi des résultats de l'audit.
- (v) Évaluation périodique du respect de la législation
- examen de la conformité à la législation environnementale applicable et aux conditions du ou des permis environnementaux détenus par l'installation ;
 - documentation de l'évaluation.
- f. Revue de direction :
- revue par la direction générale, à intervalles qu'elle détermine, du système de management environnemental afin de s'assurer qu'il est toujours approprié, suffisant et efficace ;
 - garantie que l'information nécessaire est recueillie de façon à permettre à la direction de mener à bien cette évaluation ;
 - documentation de la revue.
- g. Préparation d'une déclaration environnementale régulière :
- préparation d'une déclaration environnementale qui accorde une attention particulière aux résultats obtenus par l'installation par rapport à ses objectifs généraux et spécifiques en matière d'environnement. Cette déclaration est publiée annuellement ou moins fréquemment, selon l'importance des émissions, de la génération de déchets, etc. Elle tient compte des besoins en informations des parties intéressées concernées et est mise à la disposition du public (par exemple dans des publications électroniques, bibliothèques, etc.). Lors de la rédaction de la déclaration, l'exploitant peut utiliser des indicateurs de performance environnementale pertinents existants en veillant à ce que les indicateurs choisis :
 - i. donnent une appréciation précise des résultats de l'installation en matière d'environnement ;
 - ii. soient compréhensibles et sans ambiguïté ;
 - iii. permettent de comparer les résultats de l'installation d'une année sur l'autre, afin d'évaluer l'évolution de ses résultats en matière d'environnement ;
 - iv. permettent, selon les cas, des comparaisons par rapport à des résultats de référence sectoriels, nationaux ou régionaux ;
 - v. permettent des comparaisons avec les exigences réglementaires tel qu'approprié.
- h. Validation par un organisme de certification accrédité ou par un vérificateur externe de SME :
- le fait de faire examiner et valider le système de management, la procédure d'audit et la déclaration environnementale par un organisme de certification accrédité ou par un vérificateur externe de SME peut, si cette vérification est réalisée correctement,

augmenter la crédibilité du système.

- i. Éléments à prendre en considération lors de la conception pour la mise à l'arrêt définitif de l'unité en fin de vie :
 - le fait de prévoir, dès la conception d'une nouvelle unité, l'impact environnemental de sa future mise à l'arrêt définitif facilitera sa mise à l'arrêt en plus d'en limiter les coûts et de la rendre plus propre.
 - la mise à l'arrêt présente des risques environnementaux, tels que le risque de contamination du sol (et des eaux souterraines), et elle génère des quantités de déchets solides considérables. Bien que les techniques de prévention soient spécifiques à chaque procédé, il existe des critères de conception généraux, par exemple :
 - i. éviter les structures souterraines ;
 - ii. incorporer les caractéristiques qui facilitent le démantèlement ;
 - iii. choisir les finitions de surface faciles à décontaminer ;
 - iv. configurer les équipements de manière à limiter l'emprisonnement des produits chimiques et à faciliter la vidange et le nettoyage ;
 - v. concevoir des unités flexibles et indépendantes, qui permettent une fermeture par phases ;
 - vi. utiliser des matériaux biodégradables et recyclables lorsque cela est possible.
- j. Développement de technologies plus propres :
 - la protection de l'environnement devrait être inhérente à toute activité de conception de procédé menée par l'exploitant ou ses sous-traitants, car les techniques incorporées le plus tôt possible dans la phase de conception sont à la fois plus efficaces et moins onéreuses. Le développement de technologies plus propres pourrait, par exemple, être étudié au cours de travaux ou d'études de recherche et développement. Au lieu d'activités internes, il est possible de prendre des dispositions afin de se tenir au courant du travail d'autres exploitants ou instituts de recherche impliqués dans le domaine concerné.
- k. Analyse comparative, par exemple :
 - effectuer régulièrement et systématiquement des comparaisons par rapport à des résultats de référence sectoriels, nationaux ou régionaux incluant les activités relatives à l'efficacité énergétique et aux économies d'énergie, le choix des matériaux entrants, les émissions dans l'air et les émissions dans l'eau (en utilisant par exemple le Registre européen des émissions de polluants – EPER), la consommation d'eau et la génération de déchets.

SME standardisés et non standardisés :

Il existe deux types de SME, un système standardisé et un système non standardisé (« personnalisé »). La mise en œuvre et l'adhésion à un système standardisé reconnu au niveau international de type norme ISO 14001 : 2004 peut conférer plus de crédibilité au SME, plus particulièrement s'il est soumis à un audit externe conduit correctement. Le système EMAS confère une crédibilité supplémentaire en raison de son interaction avec le public qui s'appuie sur la déclaration environnementale et le mécanisme de garantie de la conformité à la législation environnementale applicable. Cependant, les systèmes non standardisés sont en principe tout autant efficaces à la condition qu'ils soient conçus et mis en œuvre correctement.

Avantages pour l'environnement

La mise en œuvre et l'adhésion à un SME concentrent l'attention de l'exploitant sur la

performance environnementale de l'installation. En particulier, le maintien et le respect de procédures de fonctionnement claires dans des conditions d'exploitation normales et anormales, d'une part et, les structures hiérarchiques associées, d'autre part, devraient toujours assurer la conformité aux conditions associées au permis de l'installation et aux autres cibles et objectifs environnementaux.

Les systèmes de management environnemental garantissent typiquement l'amélioration continue des performances environnementales de l'installation. Plus la situation de départ est mauvaise, plus l'entreprise pourra obtenir d'améliorations significatives à court terme. Si l'installation obtient déjà de bons résultats en matière d'environnement, le SME aidera alors l'exploitant à maintenir ce niveau de performance élevé.

Effets croisés

Des techniques de management environnemental sont conçues afin de prendre en considération l'impact environnemental global, ce qui est cohérent avec l'approche intégrée de la Directive IPPC.

Données d'exploitation

Toutes les consommations (énergie comprise) et les émissions importantes sont gérées de façon coordonnée par l'exploitant à court, moyen et long terme, en conjonction avec des cycles de planification financière et d'investissement. Cela signifie par exemple que l'adoption de solutions curatives à court terme pour réduire les émissions peut représenter pour l'exploitant une hausse à long terme de la consommation d'énergie et retarder l'investissement dans des solutions globales potentiellement plus bénéfiques pour l'environnement. Il convient donc de tenir compte des effets croisés. Des conseils sur ces derniers et les aspects financiers sont abordés dans le document de référence sur les aspects économiques et les effets croisés [179, Commission européenne, 2006] et dans le document de référence sur les meilleures techniques disponibles en ce qui concerne l'efficacité énergétique [181, Commission européenne, 2008]

Applicabilité

Les composants décrits ci-dessus peuvent en règle générale s'appliquer à toutes les installations IPPC. Le champ d'application (par exemple le niveau de détail) et la nature du SME (par exemple système standardisé ou système non standardisé) dépendront de la nature, de l'ampleur et de la complexité de l'installation ainsi que de la gamme des impacts environnementaux qui peuvent en résulter.

Aspects économiques

Il est difficile d'évaluer avec précision les coûts et les avantages économiques de la mise en place et de l'utilisation d'un bon SME. Un certain nombre d'études¹ ont été réalisées, mais elles ne reflètent pas la taille et la complexité du secteur du ciment (chaux, magnésie). L'utilisation d'un SME présente également des avantages économiques qui varient considérablement d'un secteur à l'autre.

Dans certains États membres, les organismes agréés de surveillance facturent les audits à un tarif inférieur si l'entreprise possède déjà une certification.

Les coûts d'audit externe du système peuvent être évalués avec les conseils de l'International Accreditation Forum (<http://www.iaf.nu>).

Motivations pour la mise en œuvre

Les systèmes de management environnemental peuvent fournir des avantages très divers pour les entreprises, parmi lesquels :

- une meilleure compréhension des aspects environnementaux de l'entreprise ;
- plus d'éléments pour le processus décisionnel ;
- une motivation accrue du personnel ;

¹ Par exemple Dyllick et Hamschmidt (2000, 73) cités dans Klemisch H. et R. Holger, Umweltmanagementsysteme in kleinen und mittleren Unternehmen – Befunde bisheriger Umsetzung, KNI Papers 01/ 02, janvier 2002, p 15; Clausen J., M. Keil et M. Jungwirth, The State of EMAS in the EU. Eco-Management as a Tool for Sustainable Development – Literature Study, Institute for Ecological Economy Research (Berlin) and Ecologic – Institute for International and European Environmental Policy (Berlin), 2002, p 15.

- des opportunités supplémentaires de réduction des charges d'exploitation et d'amélioration de la qualité des produits ;

- une amélioration des résultats obtenus en matière d'environnement ;
- une meilleure image de l'entreprise ;
- une réduction des frais de responsabilité en matière de préjudice écologique, des coûts d'assurance et de non-conformité ;
- une attractivité renforcée pour le personnel, les clients et les investisseurs ;
- une augmentation de la confiance des organismes de réglementation, qui pourrait conduire à une diminution de la surveillance réglementaire ;
- une amélioration des relations avec les associations environnementales.

Installations de référence

Les caractéristiques décrites ci-dessus de (b) à (f) font partie de la norme ISO 14001 : 2004 et du Système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS), alors que les caractéristiques décrites aux points (g) et (h) sont spécifiques à l'EMAS. Ces deux systèmes standardisés sont utilisés dans un certain nombre d'installations IPPC.

Documents de référence

(Règlement (CE) No 761/2001 du Parlement européen et du Conseil permettant la participation volontaire des organisations à un système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS), JO L 114, 24/4/2001, http://europa.eu.int/comm/environment/emas/index_en.htm), (EN ISO 14001 :2004, <http://www.iso.ch/iso/en/iso9000-14000/iso14000/iso14000index.html>; <http://www.tc207.org>)

1.5 Meilleures techniques disponibles dans l'industrie du ciment

Pour bien comprendre cette section et son contenu, le lecteur est invité à se reporter à la préface du présent document et notamment à son cinquième paragraphe intitulé « Compréhension et utilisation du présent document ». Les mesures ou techniques ainsi que les niveaux (ou séries de niveaux) d'émissions ou de consommation afférents, exposés dans la présente section, ont été évalués au moyen d'un processus itératif comportant les étapes suivantes :

- identification des principaux problèmes environnementaux du secteur ; pour la fabrication du ciment, il s'agit de l'utilisation de l'énergie, y compris l'utilisation des déchets en tant que combustible et les émissions dans l'air ;
- examen des mesures ou techniques les mieux adaptées à la résolution de ces problèmes clefs;
- identification des meilleurs niveaux de performance dans le domaine de l'environnement, sur la base des données disponibles dans l'Union européenne et dans le monde ;
- examen des conditions dans lesquelles ces niveaux de performance ont été atteints (comme les coûts, les effets croisés, les motivations pour la mise en œuvre de ces mesures ou techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émission et/ou de consommation qui leur sont associés pour ce secteur, au sens général, conformément à l'article 2, paragraphe 12 et à l'annexe IV de la Directive.

L'avis des experts du Bureau européen IPPC et celui du groupe de travail technique concerné ont joué un rôle déterminant dans chacune de ces phases et dans la présentation de l'information dans le présent document.

Sur la base de cette évaluation, la présente section expose les meilleures techniques disponibles considérées comme adaptées à ce secteur dans son ensemble, et dans la mesure du possible, les niveaux de consommation et d'émission associés à leur utilisation. Dans bien des cas, ceux-ci reflètent les performances actuelles de certaines installations de ce secteur. Lorsque des niveaux d'émission ou de consommation « associés à l'utilisation des MTD » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales prévisibles en cas d'application des mesures ou techniques décrites dans le secteur considéré, compte tenu des coûts et des avantages inhérents à la définition des MTD. Toutefois, ce ne sont pas des valeurs limites de consommation ou d'émission et elles ne doivent en aucun cas être considérées comme telles. Certaines techniques peuvent, dans certains cas, permettre d'atteindre de meilleurs résultats en matière de niveaux de consommation ou d'émission mais, en raison des coûts induits ou des considérations d'effets croisés qu'elles impliquent, elles ne peuvent pas être considérées comme des MTD pour le secteur dans son ensemble. Cependant, on peut considérer, dans certains cas spécifiques où il existe des motivations particulières, qu'il est justifié d'atteindre ces niveaux.

Les niveaux d'émission et de consommation associés à l'utilisation des MTD doivent toujours être envisagés en association avec des conditions de référence bien précises (périodes de calcul des moyennes, par exemple).

Il faut distinguer la notion de « niveaux associés à l'utilisation des MTD » expliquée ci-dessus de la notion de « niveau pouvant être atteint » qui apparaît ailleurs dans le présent document. Lorsqu'il est question d'un niveau « pouvant être atteint » au moyen d'une mesure ou technique ou d'une combinaison de mesures ou de techniques données, cela signifie que l'on peut prévoir, en utilisant ce type de mesures ou de techniques, d'atteindre ce niveau sur une période de temps substantielle dans un procédé ou une installation bénéficiant de bonnes conditions d'entretien et

d'exploitation.

Lorsqu'elles étaient disponibles, les données relatives aux coûts ont été indiquées dans la Section 1.4, en même temps que la description des mesures ou techniques. Elles permettent d'avoir une idée approximative des coûts. Cependant, le coût réel de l'utilisation d'une mesure ou technique dépendra étroitement de la situation en matière de taxes, de redevances ou de subventions, par exemple, et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Ces facteurs spécifiques à chaque site ne peuvent pas être évalués de manière exhaustive dans le présent document. En l'absence de données relatives aux coûts, les conclusions sur la viabilité économique des mesures ou techniques sont établies à partir des observations faites sur les installations existantes.

Les MTD (ce qui comprend les niveaux d'émission et de consommation associés) décrites dans cette section sont des « MTD au sens général », autrement dit considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble. Elles doivent être considérées comme un point de référence pour juger des performances actuelles d'une installation existante ou de la pertinence d'une proposition pour une nouvelle installation. Elles faciliteront ainsi la détermination de conditions appropriées pour l'installation reposant sur les meilleures techniques disponibles ou l'établissement des prescriptions générales prévues à l'Article 9(8) de la Directive IPPC. Il est prévu que les nouvelles installations peuvent être conçues de manière à obtenir des performances d'un niveau équivalent, voire meilleur, que les niveaux associés aux MTD présentés dans cette section. Il est également considéré que les installations existantes pourront aller vers les niveaux liés à l'utilisation des MTD présentés dans cette section, voire les dépasser, sous réserve, dans chaque cas, de l'applicabilité technique et économique des mesures ou des techniques.

Bien que les documents de référence sur les MTD ne fixent pas de standards à caractère réglementaire, ils sont destinés à fournir des orientations à l'usage de l'industrie, des Etats membres et du public en ce qui concerne les niveaux d'émission et de consommation pouvant être atteints au moyen des mesures ou techniques spécifiées. Les conditions d'autorisation appropriées à chaque cas particulier devront être déterminées compte tenu des objectifs de la directive IPPC et des considérations locales.

Pour une installation particulière, les « meilleures techniques disponibles » consisteront le plus souvent en l'utilisation d'une ou d'une combinaison de MTD figurant dans cette section.

Lorsque des mesures ou des techniques individuellement définies comme des MTD peuvent être utilisées de manière combinée, les effets de ces combinaisons doivent être pris en considération pour tirer une conclusion quant aux conditions d'autorisation s'appuyant sur les MTD dans les cas particuliers.

Recommandations pour aider des utilisateurs et des lecteurs du présent document :

Il est fortement recommandé de lire cette Section 1.5 en lien avec la Section 1.4 : les considérations relatives à l'applicabilité des mesures ou des techniques telles que mentionnées dans la Section 1.4 doivent en effet être prises en compte. Afin d'aider le lecteur, la Section 1.5 contient des références à la Section 1.4.

Sauf mention contraire, les niveaux d'émission associés aux MTD et fournis dans cette section sont exprimés sur la base d'une valeur moyenne journalière et dans les conditions standard. Les définitions suivantes concernant les conditions standard s'appliquent aux débits et aux concentrations des gaz d'exhaure du four, et sont également décrites dans le Glossaire :

Nm ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, le débit volumétrique se réfère à 10 % en volume d'oxygène et à l'état standard
mg/Nm ³	Concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux se réfèrent à des gaz de carneau secs à 10 % en volume d'oxygène et à l'état standard.
état standard ou normal	correspond à une température de 273,15 K et une pression de 1 013 hPa

Comme indiqué dans la Préface, ce document ne propose pas de valeurs limites d'émission. Les meilleures techniques disponibles et les plages de niveaux d'émission ou de consommation associées aux MTD (plages NEA MTD) sont relatives à des installations comprenant des fours de différentes tailles et à différents modes opératoires des fours – continu ou discontinu, par exemple – avec des temps annuels de fonctionnement différents. Les considérations locales particulières ne peuvent pas être pleinement prises en compte dans le présent document. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de facteurs locaux inhérents au site, tels que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions locales de l'environnement. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent de faire des compromis entre différents types d'impacts sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales.

Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes évoqués, il ne pourra pas les traiter tous de manière exhaustive. Les techniques et niveaux présentés dans cette Section 1.5 ne seront donc pas forcément appropriés pour toutes les installations. Par ailleurs, l'obligation de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement, y compris la réduction de la pollution à longue distance ou transfrontière, suppose que les conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base de considérations purement locales. C'est pourquoi il est de la plus haute importance que toutes les informations présentées dans ce document soient pleinement prises en compte.

1.5.1 Systèmes de management environnemental (SME)

Plusieurs techniques de management environnemental sont définies en tant que MTD. La portée (le niveau de détail, par exemple) et la nature des systèmes de management environnemental (normalisés ou non-normalisés, par exemple) seront généralement en relation avec la nature, la taille et la complexité de l'installation, ainsi que l'éventail des impacts environnementaux qu'elle peut avoir.

1. **La MTD consiste à mettre en œuvre et à adhérer à un système de management environnemental (SME) intégrant, en fonction des circonstances locales, les caractéristiques suivantes (cf. Section 1.4.12) :**
 - (a) engagement de la direction générale (l'engagement de la direction générale est considéré comme une condition préalable à la bonne application des autres caractéristiques du SME) ;
 - (b) définition d'une politique environnementale prévoyant l'amélioration en continu de l'installation par la direction générale ;
 - (c) planification et mise en place des procédures, des cibles et des objectifs nécessaires, en conjugaison avec la planification budgétaire et les investissements ;
 - (d) mise en œuvre des procédures en portant une attention particulière aux éléments suivants :
 - structure et responsabilité,
 - formation, sensibilisation et compétences,
 - communication
 - implication du personnel,
 - documentation,
 - efficacité du contrôle de procédé,

- programme de maintenance,
- préparation et réponse aux situations d'urgence,
- garantie de la mise en conformité avec la législation environnementale,
- (e) vérification des performances et prise de mesures correctives en portant une attention particulière aux éléments suivants :
 - surveillance et mesures (voir également le Document de référence sur les principes généraux de surveillance [151, Commission européenne, 2003]),
 - mesures correctives et préventives,
 - maintenance d'enregistrements,
 - audit interne indépendant (si possible) afin de déterminer si le système de management environnemental est conforme aux dispositions prévues et a été correctement mis en œuvre et maintenu,
- (f) revue, par la direction générale, du SME et du maintien de ses qualités de pertinence, d'adéquation et d'efficacité.

Trois autres caractéristiques sont données ci-après et, bien qu'elles aient leurs avantages, un SME qui ne les possède pas peut toutefois être une MTD :

- faire examiner et valider le système de management ainsi que la procédure d'audit par un organisme de certification accrédité ou un vérificateur extérieur de SME ;
- préparation et publication (et si possible validation externe) d'une déclaration environnementale régulière décrivant tous les aspects environnementaux significatifs de l'installation, afin de permettre une comparaison année par année avec les objectifs et cibles environnementaux ainsi qu'avec les références sectorielles si approprié ;
- mise en œuvre et adhésion à un système volontaire internationalement reconnu comme l'EMAS et la norme EN ISO 14001 : 2004. Cette démarche volontaire peut renforcer la crédibilité du SME. L'EMAS en particulier, qui incarne la totalité des caractéristiques susmentionnées, offre davantage de crédibilité. Toutefois, les systèmes non normalisés peuvent s'avérer aussi efficaces en principe, sous réserve d'une conception et d'une mise en œuvre adaptées.

Spécifiquement en ce qui concerne l'industrie de la fabrication du ciment, il est important d'envisager l'intégration des caractéristiques suivantes dans un SME :

- l'impact environnemental d'un éventuel démantèlement de l'unité lors de la phase de conception d'une nouvelle installation ;
- le développement de technologies plus propres et le suivi de leur évolution ;
- lorsque cela est praticable, l'application régulière de références sectorielles comme les activités d'efficacité énergétique et d'économie d'énergie, le choix des matériaux entrants, les émissions dans l'air, les rejets dans l'eau, la consommation d'eau et la production de déchets.

1.5.2 Mesures/techniques primaires générales

2. **La MTD consiste à assurer un fonctionnement stable et régulier du four, proche des valeurs de consigne pour les paramètres du procédé, qui est bénéfique pour toutes les émissions des fours tout comme pour l'utilisation de l'énergie grâce à l'application des mesures ou des techniques suivantes :**
 - (a) optimisation du contrôle de procédé, incluant un système de contrôle automatique par ordinateur (systèmes experts) (cf. Section 1.4.3.1) ;
 - (b) utilisation de systèmes modernes et gravimétriques d'alimentation en combustible solide (cf. Sections 1.4.2.1.1 et 1.4.3.1).
3. **La MTD consiste à procéder à une sélection et un contrôle rigoureux des substances qui alimentent le four afin d'éviter ou de réduire les émissions (cf. Sections 1.4.3.2 et 1.4.3.3).**
4. **La MTD consiste à procéder à la surveillance et à la mesure des paramètres de procédé et des émissions sur une base régulière (cf. Section 1.3.9.1), par exemple :**
 - (a) des mesures en continu des paramètres du procédé afin d'en démontrer la stabilité – comme température, teneur en O₂, pression, débit et émission de NH₃ avec la technologie SNCR ;
 - (b) la surveillance et la stabilisation des paramètres critiques du procédé, comme l'homogénéité du cru et de l'alimentation en combustible, le dosage régulier et l'excès d'oxygène ;
 - (c) des mesures en continu des émissions de poussières, de NO_x, de SO_x et de CO ;
 - (d) des mesures périodiques des émissions de PCDD, de PCDF et de métaux ;
 - (e) des mesures en continu ou périodiques des émissions de HCl, de HF et de COT.

A cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

1.5.3 Consommation d'énergie et choix du procédé

1.5.3.1 Choix du procédé

Pour des considérations générales sur le choix du procédé, se reporter à la Section 1.4.2.3 et les considérations sur les besoins de chaleur à la Section 1.4.2.1.1.

Le procédé sélectionné a une influence majeure sur l'utilisation de l'énergie et sur les émissions atmosphériques des usines de fabrication du clinker.

5. **En cas de construction d'unités nouvelles ou d'améliorations majeures, la MTD consiste à utiliser un four en voie sèche à plusieurs étages de préchauffage et précalcination. Dans les conditions de fonctionnement régulières et optimisées, le bilan thermique associé à la MTD est compris entre 2900 et 3300 MJ par tonne de clinker (cf. Sections 1.4.2.3 et 1.4.2.1.1).**

1.5.3.2 Consommation d'énergie

Pour des considérations générales sur la consommation d'énergie, se reporter aux sections 1.3.3 et 1.4.2.

6. La MTD consiste à réduire / minimiser la consommation d'énergie thermique grâce à une combinaison des mesures ou techniques suivantes (cf. Section 1.4.2) :

- (a) utilisation de systèmes de fours améliorés et optimisés et fonctionnement stable et régulier du four proche des valeurs de consigne pour les paramètres du procédé avec :
 - I. optimisation du contrôle de procédé avec utilisation de systèmes de conduite automatique par ordinateur (systèmes experts),
 - II. utilisation de systèmes modernes d'alimentation en combustible solide par gravité (cf. sections 1.4.2.1.1 et 1.4.3.1).
 - III. préchauffage et précalcination dans toute la mesure du possible, considérant la configuration du système de four existante ;

A ce titre, se reporter à la Section 1.4.2.1.1 qui présente plusieurs mesures et techniques différentes applicables aux systèmes de four, individuellement ou en combinaison. A ce sujet, se reporter également au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles en matière d'efficacité énergétique [181, Commission européenne, 2008].

- (b) récupération de la chaleur excédentaire des fours, notamment celle de la zone de refroidissement (cf. Sections 1.4.2.1.1 et 1.4.2.4). En particulier, la chaleur récupérée dans la zone de refroidissement (air chaud) ou à la sortie du préchauffeur peut servir à sécher les matières premières ; A ce sujet, voir également le Document de référence sur les meilleures techniques disponibles en matière d'efficacité énergétique [181, Commission européenne, 2008].
- (c) utilisation du nombre approprié d'étages de cyclones en fonction des caractéristiques et des propriétés des matières premières et des combustibles utilisés (cf. Sections 1.4.2.1.2 et 1.4.2.1.3) ;
- (d) utilisation de combustibles dont les caractéristiques ont une influence positive sur la consommation d'énergie thermique ;
- (e) dans le cas du remplacement des combustibles conventionnels par des combustibles dérivés de déchets, utilisation de systèmes de four à ciment optimisés et adaptés au brûlage des déchets (cf. Section 1.4.2.1.3) ;
- (f) minimisation du débit de bypass (cf. Section 1.4.2.1.4).

7. La MTD consiste à réduire la consommation d'énergie primaire en considérant la réduction de la teneur en clinker du ciment et des produits du ciment qui en contiennent (cf. Section 1.4.2.1.5).

8. La MTD consiste à réduire la consommation d'énergie primaire en considérant le recours à la cogénération et aux installations de production combinée de chaleur et d'électricité (cf. Section 1.4.2.4) lorsque cela est possible, en fonction de la demande en chaleur utile, dans le cadre des schémas réglementaires énergétiques et lorsque ceci est économiquement viable.

A ce sujet, voir également le Document de référence sur les meilleures techniques disponibles en matière d'efficacité énergétique [181, Commission européenne, 2008].

9. La MTD consiste à minimiser la consommation d'énergie électrique en appliquant les mesures ou techniques suivantes, individuellement ou en combinaison :

- (a) utilisation de systèmes de management de la puissance,
- (b) utilisation d'installations de broyage et autres équipements électriques à forte efficacité énergétique. A ce sujet, cf. Section 1.4.2.2 qui présente plusieurs mesures ou techniques différentes.

1.5.4 Utilisation des déchets

Pour des considérations générales sur l'utilisation des déchets, se reporter aux sections 1.2.4, 1.3.4.13, 1.3.4.14 et 1.4.3.3 et les considérations sur les émissions de métaux à la Section 1.4.7.

Les MTD et les NEA MTD pour la réduction des émissions sont donnés ci-après dans les sections 1.5.5 à 1.5.10 correspondants. A cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

1.5.4.1 Contrôle de la qualité des déchets

10. La MTD consiste à :

- (a) **mettre en place des systèmes d'assurance qualité afin de garantir les caractéristiques des déchets et d'analyser tout déchet qui doit être utilisé dans un four à ciment en tant que matières premières et/ou combustible pour (cf. Section 1.4.3.3) :**
 - I. la constance de la qualité,
 - II. des critères physiques comme la formation d'émissions, la granulométrie, la réactivité, la combustibilité, la valeur calorifique, etc.,
 - III. des critères chimiques comme la teneur en chlore, en soufre, en alcali et en phosphates et la teneur en métaux pertinents ;
- (b) **contrôler le nombre de paramètres pertinents pour tout déchet utilisé en tant que matière première et/ou combustible dans un four à ciment, comme le chlore, les métaux pertinents (cadmium, mercure, thallium), le soufre, la teneur totale en halogènes ;**
- (c) **mettre en oeuvre des systèmes d'assurance qualité pour chaque charge de déchet.**

1.5.4.2 Alimentation du four en déchets

11. La MTD consiste à :

- (a) **utiliser dans les fours les points d'alimentation appropriés en termes de température et de temps de séjour en fonction de la conception du four et des conditions opératoires (cf. Section 1.2.4.1) ;**
- (b) **introduire les déchets contenant des composés organiques susceptibles d'être volatilisés avant la zone de calcination dans les zones du système de four où la température est suffisamment élevée ;**

- (c) opérer de telle manière que les gaz qui résultent de la co-incinération des déchets soient portés de manière contrôlée et homogène, même dans les conditions les plus défavorables, à une température de 850 °C pendant 2 secondes ;
- (d) élever la température à 1 100 °C en cas de co-incinération de déchets dangereux avec une teneur de plus de 1 % en substances organiques halogénées, exprimées en chlore ;
- (e) prévoir une alimentation continue et constante des déchets ;
- (f) interrompre la co-incinération de déchets dans des opérations telles que les démarrages ou les arrêts lorsqu'il est impossible d'atteindre les températures adéquates ou de tenir les temps de séjours comme prévus aux points a) à d) ci-dessus ;

1.5.4.3 Management de la sécurité pour l'utilisation de déchets dangereux

12. La MTD consiste à mettre en œuvre un management de la sécurité pour la manutention (stockage, par exemple) et/ou l'alimentation matière par des déchets dangereux (cf. Section 1.4.3.3), utilisant par exemple une approche en fonction du risque selon la source et le type de déchet, pour l'étiquetage, la vérification, l'échantillonnage et les tests des déchets à manipuler.

1.5.5 Emissions de poussières

1.5.5.1 Emissions de poussières diffuses

Pour des considérations générales sur les émissions de poussières diffuses, se reporter aux Sections 1.3.4.1.3, 1.3.4.1.2, 1.4.4.1 et 1.4.4.2.

13. La MTD consiste à minimiser / prévenir les émissions de poussières diffuses en appliquant les mesures ou techniques suivantes, individuellement ou en combinaison :
- (a) mesures ou techniques pour les opérations génératrices de poussières. A ce titre, cf. Section 1.4.4.1 qui présente plusieurs mesures et techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison ;
 - (b) mesures ou techniques pour la zone de stockage en vrac. A ce titre, cf. Section 1.4.4.2 qui présente plusieurs mesures et techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison.

1.5.5.2 Emissions de poussières canalisées provenant d'opérations génératrices de poussières

Cette section présente la MTD pour les émissions de poussières associées à des opérations génératrices de poussières autres que la chauffe du four, le refroidissement et le broyage. Elle couvre ainsi les procédés comme le concassage des matières premières, le transport des matières premières sur des convoyeurs ou des élévateurs, le stockage des matières premières, du clinker et du ciment, le stockage des combustibles (coke de pétrole, anthracite, lignite) et l'expédition du ciment (chargement). Pour des considérations générales sur ces émissions de poussières

canalisées, se reporter aux Sections 1.3.4.1.1, 1.3.4.1.2 et 1.4.4.3.

14. La MTD consiste à appliquer un système de management de la maintenance qui couvre tout particulièrement le problème des performances des filtres de ces sources. Sur la base de ce système de management, la MTD consiste à réduire, pour les opérations génératrices de poussières (cf. Section 1.4.4.3), les émissions de poussières canalisées à moins de 10 mg/Nm^3 (NEA MTD) en tant que moyenne sur la période d'échantillonnage (mesure ponctuelle pendant au moins une demi-heure) en appliquant un nettoyage à sec des effluents gazeux à l'aide d'un filtre.

Il convient de noter qu'une approche prioritaire doit être prise en compte pour les petites sources ($<10000 \text{ Nm}^3/\text{h}$).

A ce titre, cf. Section 1.4.4.3 qui présente plusieurs mesures et techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison.

1.5.5.3 Emissions de poussières provenant des procédés de chauffe du four

Cette section présente la MTD pour les émissions de poussières provenant des procédés de chauffe du four. Pour des considérations générales sur les émissions de poussières canalisées, se reporter aux Sections 1.3.4.1.1, 1.3.4.1.2 et 1.4.4.3.

15. La MTD consiste à réduire les émissions de poussières (matières particulaires) des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four grâce au nettoyage à sec des gaz d'exhaure à l'aide d'un filtre. Le NEA MTD est $< 10 - 20 \text{ mg/Nm}^3$ en tant que valeur moyenne journalière. Le niveau le plus bas est atteint avec des filtres à manches ou des filtres électrostatiques neufs ou renouvelés.

A ce titre, cf. Section 1.4.4.3 qui présente plusieurs mesures et techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison. De plus, à cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

1.5.5.4 Emissions de poussières provenant des procédés de refroidissement et de broyage

Cette section présente la MTD pour les émissions de poussières provenant des procédés de refroidissement et de broyage. Pour des considérations générales sur les émissions de poussières canalisées, se reporter aux Sections 1.3.4.1.1, 1.3.4.1.2 et 1.4.4.3.

16. La MTD consiste à réduire les émissions de poussières (matières particulaires) des gaz résiduels produits par les procédés de refroidissement et de broyage grâce au nettoyage à sec des effluents gazeux à l'aide d'un filtre. Le NEA MTD est $<10 - 20 \text{ mg/Nm}^3$ en tant que moyenne journalière ou moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles pendant au moins une demi-heure). Le niveau le plus bas est atteint avec des filtres à manches ou des électrofiltres neufs ou renouvelés.

A ce titre, cf. Section 1.4.4.3 qui présente plusieurs mesures et techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison.

1.5.6 Composés gazeux

1.5.6.1 Emissions de NO_x

Pour des considérations générales sur les émissions de NO_x, se reporter à la Section 1.3.4.2.

17. La MTD consiste à réduire les émissions de NO_x des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four en appliquant les mesures ou techniques suivantes individuellement ou en combinaison (cf. Section 1.4.5.1) :

- (a) mesures ou techniques primaires telles que :
 - I. refroidissement de la flamme,
 - II. brûleurs bas NO_x,
 - III. cuisson en milieu de four,
 - IV. apport de minéralisateurs pour améliorer la combustibilité du cru (clinker minéralisé),
 - V. optimisation du procédé (cf. Sections 1.4.5.1.1 à 1.4.5.1.6).
- (b) combustion étagée (combustibles conventionnels ou dérivés de déchets), également en combinaison avec un précalcinateur et l'emploi d'un mélange combustible optimisé (cf. Section 1.4.5.1.3)
- (c) SNCR (cf. Sections 1.4.5.1.7)
- (d) SCR, sous réserve de la mise au point de catalyseurs appropriés et du développement du procédé dans l'industrie du ciment (cf. Section 1.4.5.1.8).

Les niveaux d'émission de NO_x suivant sont des NEA MTD :

Type de four	Unité	NEA MTD (valeur moyenne journalière)
Fours avec préchauffeur	mg/Nm ³	<200 – 4502) ³⁾
Fours Lepol et fours longs rotatifs	mg/Nm ³	400 – 800 ¹⁾
1) En fonction des niveaux initiaux et des fuites d'ammoniac 2) Le NEA MTD est de 500 mg/Nm ³ , lorsqu'après les mesures ou techniques primaires le niveau initial de NO _x est >1000 mg/Nm ³ 3) La conception du système de four existant, les propriétés du mélange de combustible incluant les déchets et la capacité à cuire les matières premières peuvent avoir un effet sur la capacité à demeurer dans cette plage. Dans des conditions favorables, il est possible d'obtenir 350 mg/Nm ³ avec certains fours. La valeur la plus basse de 200 mg/Nm ³ n'a été signalée en tant que moyenne mensuelle que dans trois cimenteries (mélange facile à brûler utilisé).		

Tableau 1.42 : Niveaux d'émission associés à la MTD pour les émissions de NO_x des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four et/ou de préchauffage / précalcination dans l'industrie du ciment

A cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

18. En appliquant la technologie SNCR, la MTD consiste à :

- (a) permettre une réduction des NO_x adaptée et suffisamment efficace associée à des conditions opératoires de procédé stables ;
- (b) permettre une bonne répartition stoechiométrique de l'ammoniac pour atteindre le niveau de réduction des NO_x le plus efficace possible et réduire les fuites d'ammoniac ;
- (c) maintenir les émissions de la fuite de NH_3 dans les gaz résiduels à un niveau aussi faible que possible, et en dessous de 30 mg/Nm^3 , en tant que valeur moyenne journalière. La corrélation entre l'efficacité de la réduction des NO_x et les fuites en NH_3 doit être prise en considération (cf. Section 1.4.5.1.7). En fonction du niveau initial de NO_x et de l'efficacité de la réduction des émissions de NO_x , la fuite en NH_3 peut être supérieure à 50 mg/Nm^3 . Pour les fours Lepol et les fours longs rotatifs, ce niveau peut même atteindre des valeurs supérieures.

1.5.6.2 Emissions de SO_x

Pour des considérations générales sur les émissions de SO_x , se reporter aux Sections 1.3.4.3 et 1.4.5.2.

19. La MTD consiste à maintenir les émissions de SO_x à un niveau bas ou réduire les émissions de SO_x issues des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four et/ou de préchauffage / précalcination en appliquant une ou plusieurs des mesures ou techniques suivantes (cf. Section 1.4.5.2) :

- (a) addition d'absorbants,
- (b) lavage humide.

Les niveaux d'émission de SO_x suivant sont des NEA MTD :

Paramètre	Unité	NEA MTD ¹ (valeur moyenne journalière)
SO_x en SO_2	mg/Nm^3	<50 – <400
1) La plage tient compte de la teneur en soufre des matières premières		

Tableau 1.43 : Niveaux d'émissions associés à la MTD pour les émissions de SO_x des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four et/ou de préchauffage / précalcination dans l'industrie du ciment

A cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

20. La MTD consiste à optimiser les procédés de broyage de cru (pour la voie sèche) qui favorisent la réduction du SO_2 pour le four, comme le décrit la Section 1.3.4.3.**1.5.6.3 Emissions de CO et pics de CO**

1.5.6.3.1 Réduction des pics de CO

Pour des considérations générales sur les pics de CO, se reporter aux Sections 1.4.3.1, 1.4.4.3.1 et 1.4.5.3.

21. En appliquant des électrofiltres (EF) ou des filtres hybrides, la MTD consiste à minimiser la fréquence des pics de CO et maintenir leur durée totale en dessous de 30 minutes par an en appliquant une combinaison des mesures / techniques suivantes (cf. Section 1.4.5.3) :

- (a) réduire les temps d'arrêt des EF. A ce titre, cf. Section 1.4.5.3 qui présente plusieurs mesures et techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison ;
- (b) effectuer des mesures automatiques en continu du CO ;
- (c) utiliser des équipements de mesure et de contrôle rapides et notamment un système de surveillance du niveau de CO à faible temps de réponse placé à proximité de la source de CO.

A cet égard, cf. Section 4.2.6 qui présente des lignes directrices sur le contrôle des pics de CO.

1.5.6.4 Emissions de carbone organique total (COT)

Pour des considérations générales sur le COT, se reporter aux Sections 1.3.4.5 et 1.4.5.4.

22. La MTD consiste à maintenir à un niveau bas les émissions de COT des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four (cf. Section 1.4.5.4) en appliquant les mesures / techniques suivantes :

- (a) éviter l'alimentation en matières premières à forte teneur en composés organiques volatils dans le four par l'intermédiaire du circuit d'alimentation en matières premières.

A cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

1.5.6.5 Emissions de chlorure d'hydrogène (HCl) et de fluorure d'hydrogène (HF)

Pour des considérations générales sur les émissions de HCl et de HF, se reporter aux Sections 1.3.4.8 et 1.4.5.5.

23. La MTD consiste à conserver les émissions de HCl en dessous de 10 mg/Nm³ (NEA MTD) en valeur moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles pendant au moins une demi-heure), en appliquant les mesures / techniques primaires suivantes, individuellement ou en combinaison :

- (a) utilisation de matières premières et de combustibles à faible teneur en chlore (voir également les Sections 1.4.3.2 et 1.4.3.3) ;
- (b) limitation de la teneur en chlore de tout déchet devant être utilisé en tant que matière première et/ou combustible dans le four à ciment (cf. Sections 1.2.4, 1.4.3.2 et 1.4.3.3).

24. La MTD consiste à conserver les émissions de HF en dessous de 1 mg/Nm³ (NEA MTD) en valeur moyenne journalière ou en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles pendant au moins une demi-heure), en appliquant les mesures / techniques primaires suivantes, individuellement ou en combinaison :

- (a) utilisation de matières premières et de combustibles à faible teneur en fluor (voir également les Sections 1.4.3.2 et 1.4.3.3) ;
- (b) limitation de la teneur en fluor de tout déchet devant être utilisé en tant que matière première et/ou combustible dans le four à ciment (cf. Sections 1.2.4, 1.4.3.2 et 1.4.3.3).

A cet égard, cf. Section 4.2.2.1.1 qui présente des exemples de plages de concentrations pour des substances dans les déchets ou comme critères à l'entrée des déchets. De plus, à cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

1.5.7 Emissions de PCDD/F

Pour des considérations générales sur les émissions de PCDD et de PCDF, se reporter aux Sections 1.3.4.6 et 1.4.6.

25. La MTD consiste à éviter les émissions de PCDD/F ou maintenir ces émissions à un niveau bas dans les gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four en appliquant les mesures / techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) sélectionner et contrôler soigneusement l'alimentation du four (matières premières), autrement dit en chlore, en cuivre et en composés organiques volatils ;
- (b) sélectionner et contrôler soigneusement l'alimentation du four (combustibles), par exemple chlore, cuivre et composés organiques volatils ;
- (c) limiter / éviter l'emploi de déchets contenant des matières organiques chlorées ;
- (d) éviter l'utilisation de combustible à forte teneur en halogènes (comme le chlore) dans la combustion secondaire ;
- (e) refroidir rapidement les gaz d'exhaure du four à moins de 200 °C et minimiser le temps de séjour des gaz résiduels et la teneur en oxygène dans les zones où les températures sont comprises entre 300 et 450 °C ;
- (f) arrêter la co-incinération des déchets lors des opérations comme les démarrages ou les arrêts du four.

Les NEA MTD sont <0,05 – 0,1 ng de PCDD/F I-TEQ/Nm³ en moyenne sur la période d'échantillonnage (de 6 à 8 heures).

A ce titre, cf. Section 1.4.6 qui présente différentes mesures / techniques applicables individuellement ou en combinaison. De plus, à cet égard, en cas de co-incinération des déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

1.5.8 Emissions de métaux

Pour des considérations générales sur les émissions de métaux, se reporter aux Sections 1.3.4.7, 1.3.4.7.1 et 1.4.7.

26. La MTD consiste à minimiser les émissions de métaux des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four en appliquant les mesures ou techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) sélectionner des matériaux à faible teneur en métaux pertinents et limiter la teneur en métaux pertinents dans les matériaux, et notamment du mercure ;
- (b) appliquer un système d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des déchets utilisés (cf. Sections 1.4.3.2 et 1.4.3.3) ;
- (c) utiliser des mesures / techniques efficaces de dépoussiérage. A ce titre, cf. Section 1.4.4.3 qui présente différentes mesures / techniques de dépoussiérage applicables individuellement ou en combinaison.

Les niveaux d'émission de métaux suivant sont des NEA MTD :

Métaux	Unité	NEA MTD (moyenne sur la période d'échantillonnage [mesures ponctuelles pendant au moins une demi-heure])
Hg	mg/Nm ³	<0,05 ²⁾
Σ (Cd, Tl)	mg/Nm ³	<0,05 ¹⁾
Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	mg/Nm ³	<0,5 ¹⁾
1) Des niveaux faibles ont été reportés, cf. Sections 1.3.4.7, 1.3.4.7.1 et 1.4.7 2) Des niveaux faibles ont été reportés (cf. Sections 1.3.4.7, 1.3.4.7.1 et 1.4.7). Des valeurs supérieures à 0,03 mg/Nm ³ doivent faire l'objet d'investigations supplémentaires. Des valeurs proches de 0,05 mg/Nm ³ requièrent la considération de mesures ou techniques supplémentaires comme celles décrites aux Sections 1.3.4.13, 1.3.9.1 et 1.4.7		

Tableau 1.44 : Niveaux d'émission associés à la MTD pour les métaux des gaz résiduels produits par les procédés de chauffe du four

A cet égard, en cas d'utilisation de déchets, les exigences de la directive sur l'incinération des déchets doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

1.5.9 Pertes/déchets de procédé

Pour des considérations générales sur les pertes/déchets de procédé, se reporter aux Sections 1.3.5 et 1.4.9.

27. La MTD consiste, chaque fois que cela est possible, à recycler les matières particulières collectées dans le procédé ou utiliser ces poussières dans d'autres produits commerciaux.

1.5.10 Bruit

Pour des considérations générales sur le bruit, se reporter aux Sections 1.3.7 et 1.4.10.

28. La MTD consiste à réduire ou minimiser les émissions de bruit pendant le procédé de fabrication du ciment grâce à une combinaison des mesures / techniques suivantes (cf. Section 1.4.10) :

- (a) capoter les opérations ou les unités bruyantes ;
- (b) isoler les vibrations des opérations ou unités bruyantes ;
- (c) utiliser des revêtements internes et externes en matériaux amortissants ;
- (d) insonoriser les bâtiments afin d'isoler les opérations bruyantes dans lesquelles interviennent des équipements de transformation des matériaux ;
- (e) construire des murs de protection antibruit comme des bâtiments ou des barrières naturelles telles que des arbres et des buissons, entre la zone à protéger et l'activité bruyante ;
- (f) installer des silencieux sur les cheminées de gaz résiduelles ;
- (g) installer des revêtements sur les conduites et les souffleries finales situées dans les bâtiments insonorisés ;
- (h) fermer les portes et fenêtres des zones couvertes.

1.6 Techniques émergentes dans l'industrie du ciment

1.6.1 Fabrication du ciment par la technique du lit fluidisé

La technique de clinkérisation du ciment dans un four à lit fluidisé est un projet subventionné par le ministère japonais de l'industrie et du commerce international depuis 1986. Sumitomo Osaka Cement Co. Ltd a exploité pendant six ans (1989-1995) une unité pilote d'une capacité de production de 20 tonnes de clinker/jour à l'usine Toshigi au Japon. Une unité pilote à grande échelle pouvant produire 200 tonnes de clinker/jour a été construite fin 1995.

La configuration de ce four à lit fluidisé d'une capacité de production de 20 tonnes de clinker/jour est représentée schématiquement ci-dessous (Figure 1.71). L'installation se compose d'un préchauffeur à suspension (SP), d'un four de granulation à lit fluidisé bouillonnant (SBK), d'un four de clinkérisation en lit fluidisé (FBQ), d'un refroidisseur par trempe en lit fluidisé (FBK) et d'un refroidisseur comportant un lit à garnissage.

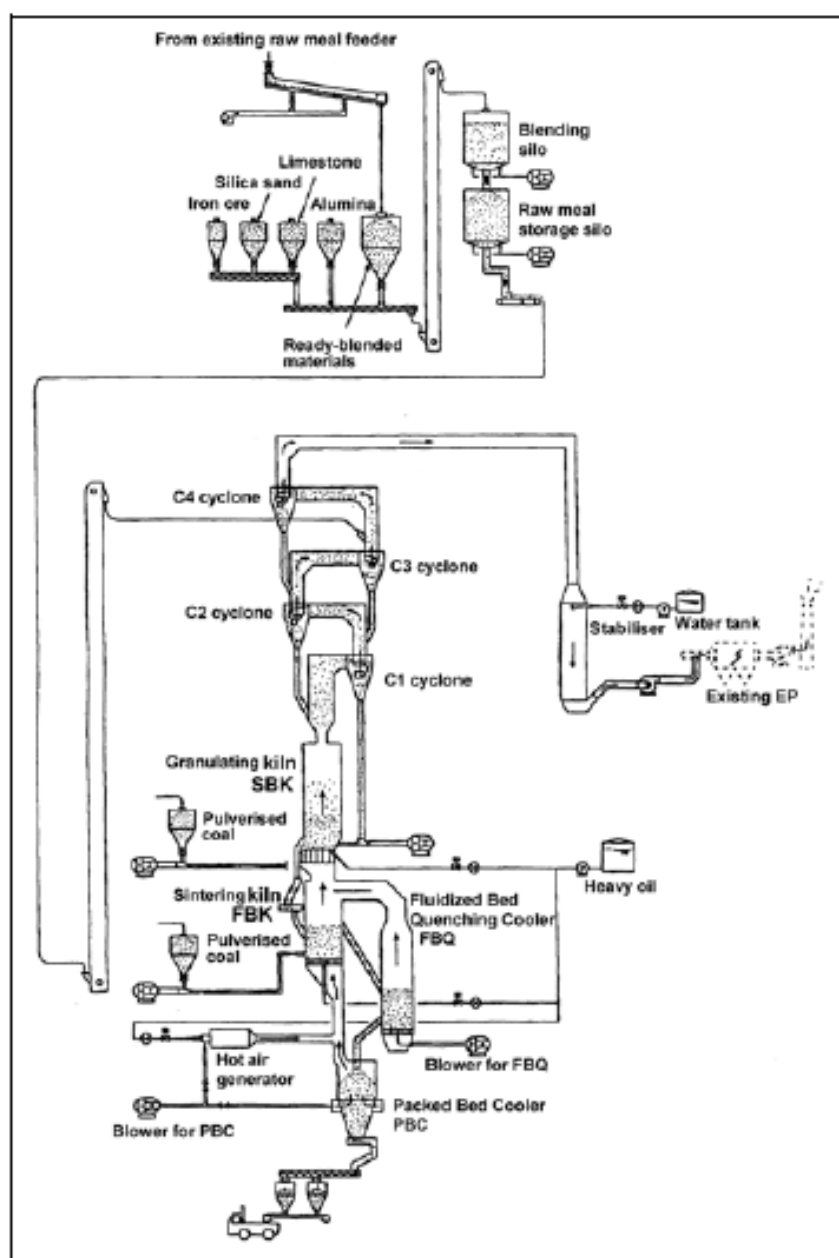


Figure 1.71 : Four à ciment à lit fluidisé

[22, Japon, 1996]

Le préchauffeur à suspension est un préchauffeur classique à quatre étages de cyclones chargé d'élever la température du cru et de le calciner. Le four de granulation transforme le cru en granules de 1,5 à 2,5 mm de diamètre à la température de 1 300 °C. Dans le four, la clinkérisation de la matière s'achève à 1 400 °C. Le refroidisseur par trempe en lit fluidisé refroidit rapidement le clinker entre 1 400 et 1 000 °C. Enfin, la température du clinker est abaissée à environ 100 °C dans le refroidisseur comportant un lit à garnissage.

Le clinker produit dans le four à lit fluidisé est de qualité égale ou supérieure à celui fabriqué dans une installation commerciale. Les émissions de NO_x varient de 115 à 190 mg/Nm³ quand le four brûle du fuel lourd et de 440 à 515 mg/Nm³ lorsqu'il brûle du charbon pulvérisé (converti à 10 % d'O₂). D'après une étude de faisabilité réalisée dans une usine d'une capacité de production de 3000 tonnes de clinker/jour, la quantité de chaleur utilisée peut être réduite de 10 à 12 % par rapport à celle utilisée dans un four rotatif à préchauffeur à suspension avec refroidisseur à grilles ; il est donc prévu de pouvoir réduire les émissions de CO₂ de 10 à 12 %.

Les objectifs finaux de la mise au point technique du four à lit fluidisé (conformément à l'étude de faisabilité réalisée dans une usine d'une capacité de production de 3 000 tonnes de clinker/jour et sur la base des résultats obtenus dans l'unité pilote produisant 20 tonnes/jour) :

1. réduction de 10 à 12 % de la quantité de chaleur utilisée ;
2. réduction de 10 à 12 % des émissions de CO₂ ;
3. niveau d'émission des NO_x inférieur ou égal à 380 mg/Nm³ (converti à 10 % d'O₂) ;
4. maintien du niveau d'émission de SO_x ;
5. réduction de 30 % des coûts de construction ;
6. réduction de 30 % de la surface de l'installation.

1.6.2 Combinaison de la combustion étagée et de la SNCR

Théoriquement, les résultats obtenus en combinant la combustion étagée et la SNCR devraient être comparables à ceux de la SCR. Cette combinaison est considérée comme très prometteuse par les fournisseurs. La Section 1.4.5.1.8 décrit plusieurs résultats concernant l'utilisation de la SCR.

1.6.3 Traitement des gaz résiduels d'un four à ciment au bicarbonate de sodium sec et réutilisation des produits chimiques

Description

Cette mesure ou technique est envisagée pour la désulfurisation des gaz résiduels produits par les fours à ciment, le plus souvent dans les cas où des déchets sont utilisés en tant que combustible. Pour réduire de manière importante et économique les taux de SO₂, on injecte à sec du bicarbonate de sodium dans les fumées et les déchets à base de sodium peuvent souvent être réutilisés dans le processus de production du ciment, suivant leurs caractéristiques et leur composition. Toutefois, dans certains cas, cette réutilisation est impossible car elle peut induire une teneur trop importante en sodium dans le ciment produit.

Pour permettre une réduction importante du SO₂ avec une quantité faible de réactif et, dans le même temps, permettre la réutilisation des déchets issus du traitement des gaz résiduels, il est possible de recourir à des techniques émergentes de filtration en deux étapes des gaz résiduels.

Filtration en deux étapes

Un premier filtre à poussières collecte les poussières émises par le procédé. Celles-ci peuvent être réintégrées dans le procédé car elles ne sont pas chargées en sodium. L'injection à sec de bicarbonate de sodium sec intervient en aval de ce premier filtre. On injecte du bicarbonate de sodium sec broyé qui réagit avec les SO_x pour produire des sels de sodium, principalement du sulfate de sodium (Na_2SO_4). Ces déchets obtenus par le traitement des gaz résiduels sont collectés par un second filtre, le plus souvent un filtre à manches.

Avantages pour l'environnement

Cette mesure ou technique permet de réduire de manière importante et économique le taux de SO_x dans les gaz résiduels sans compromettre la réutilisation intégrale des déchets issus du traitement de ces gaz pour les raisons suivantes :

- le ciment ne contient pas de quantité excessive de sodium ;
- elle n'ajoute pas de SO_x dans les gaz résiduels.

De plus, le procédé ne produit pas de déchet supplémentaire et ne consomme aucune ressource naturelle additionnelle.

Effets croisés

Les déchets à base de sodium ne pourraient être réutilisés que de manière limitée. Jusqu'en 2008, ce recyclage était impossible en raison de l'effet négatif des déchets à base de sodium sur la qualité du ciment et du clinker.

Dans une certaine mesure, des émissions supplémentaires de SO_x peuvent survenir en raison du recyclage des sulfates de calcium ou de sodium.

La consommation en ressources naturelles est inchangée car le réactif CaCl_2 est disponible dans la soude.

Des frais de transport supplémentaires sont envisageables car les déchets du processus de traitement des gaz résiduels doivent être acheminés de la cimenterie jusqu'à l'installation de traitement. Toutefois, la quantité de déchets concernée est relativement faible comparativement au volume total de poussières et de celles qui ne contiennent pas de sulfate et sont directement réutilisées dans la cimenterie.

Données d'exploitation

Cette mesure ou technique est à l'essai au niveau pré-industriel. Aucune donnée d'exploitation n'est disponible pour 2008.

Applicabilité

Quelques essais seulement ont été menés sur le procédé par voie humide qui emploie cette technique. La technique de filtration en deux étapes convient particulièrement aux installations qui utilisent des électrofiltres afin de réduire les émissions de poussières. Dans ce cas, l'ajout d'un second filtre à manches peut s'avérer moins coûteux que le remplacement du filtre existant. Il n'existe toutefois aucune application industrielle en grandeur réelle qui combine cette technique avec l'injection de bicarbonate de sodium.

En ce qui concerne la double filtration, il n'y a aucune cimenterie actuellement en activité (2008) qui combine cette technique avec l'injection de bicarbonate de sodium mais des essais sont en cours.

En ce qui concerne le traitement des déchets produits par le traitement des gaz résiduels, la technique est en cours d'essai sur les déchets sulfatés à l'échelle préindustrielle en France, et d'autres installations de traitement spécifique sont prévues ou à l'étude. Cette technique est industriellement opérationnelle et mise en application en France et en Italie dans les installations d'incinération des déchets municipaux qui traitent les déchets des gaz résiduels. Pour d'autres informations sur l'incinération des déchets, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles en matière d'incinération des déchets [87, Commission européenne, 2001].

Aspects économiques

Le traitement des déchets de sodium en tant que tels en vue d'une utilisation par l'industrie chimique – ce qui se fait déjà dans les installations d'incinération des déchets municipaux – est difficile à justifier d'un point de vue économique en raison de la forte teneur en poussières des déchets.

Motivation pour la mise en œuvre

Taux d'abattement élevé ou haute efficacité d'abattement requise pour les SO_x dans les gaz résiduels des fours.

Exemples d'installations et documentation de référence

Installations d'essais en France. [168, GTT CLM, 2007], [176, France, 2008], [182, GTT CLM, 2008]

1.7 Conclusions et recommandations

Chronologie du processus de travail

La réunion de coup d'envoi pour la revue du BREF sur le ciment et la chaux s'est tenue en septembre 2005. Le GTT a convenu d'élargir la portée de ce document et d'ajouter au BREF ciment et chaux, un secteur industriel supplémentaire sur la production d'oxyde de magnésium (MgO/magnésie) production par voie sèche. Après une période consacrée à la collecte d'informations et de chiffres, le GTT a tenu une deuxième réunion en février 2007 afin de vérifier et de valider les informations et les données à utiliser pour la révision de ce BREF. Le GTT a de plus demandé une exception procédurale dans le déroulement de la revue de ce document afin de subdiviser les discussions sur les sections 1 à 4 et les sections MTD des trois chapitres sur le ciment, la chaux et l'oxyde de magnésium.

A la demande du GTT et en tenant compte du calendrier générique pour la revue des BREF (décembre 2005), l'IEF a accepté de subdiviser les discussions sur les sections 1 à 4 et les sections MTD des trois chapitres sur le ciment, la chaux et l'oxyde de magnésium.

Le premier projet sur les sections révisés de 1 à 4 et 6 des trois chapitres ciment, chaux et oxyde de magnésium a été publié pour consultation en septembre 2007. La seconde partie du premier projet couvrant les sections sur les techniques à prendre en considération dans la détermination des MTD (sections 1.4, 2.4 et 3.4) et les sections MTD (1.5, 2.5 et 3.5) des trois chapitres ont été publiés pour consultation en mai 2008. La réunion finale du GTT s'est tenue en septembre 2008.

Le projet sur la première révision de ce BREF, qui a été le fer de lance pour la revue de la première série de BREF, a généré un immense intérêt de bout en bout. Lors de la réunion plénière finale, le GTT comprenait plus de 110 membres.

Conformément au calendrier générique pour la revue des BREF (décembre 2005), la révision pour le BREF sur le ciment et la chaux ne comprenait pas la réécriture intégrale du premier document adopté en décembre 2001 mais la mise à jour de l'existant en y incluant des informations complémentaires qui ont été revues (par exemple en ce qui concerne les techniques) en raison de leur impact potentiel sur les conclusions en relation avec les MTD. L'échange d'informations et la collecte des données se sont appuyés sur les souhaits du GTT et sur les conclusions adoptées lors de la deuxième réunion du GTT (janvier 2007). Le document guide sur la collecte des données adopté par l'IEF en avril 2008 n'a pas été utilisé dans ce processus.

Sources d'information, élaboration du présent chapitre sur le ciment et carences en matière d'informations

Le chapitre révisé sur le ciment s'appuie sur un grand nombre de documents et sur plus de 50 sources d'informations de l'industrie et des Etats membres. Les rapports ont été soumis par CEMBUREAU, l'association industrielle qui représente la majorité des fabricants européens de ciment et les Etats membres Allemagne, Autriche, Suède, France, Royaume Uni, Irlande, Pays-Bas, Italie, Hongrie, Estonie, Espagne, Portugal, Finlande et République tchèque. Par ailleurs, des informations ont été communiquées par EURITS, l'association industrielle qui représente la majorité du secteur de l'incinération des déchets dangereux de l'UE et par un fournisseur en Norvège. Ces documents peuvent être considérés comme les blocs fonctionnels des parties révisées du chapitre sur le ciment.

D'autres informations utiles ont été obtenues lors de visites de cimenteries au Royaume Uni, en Autriche, en Allemagne, en Belgique, en Espagne, en Finlande et en Hongrie.

Sur la base des informations et des données fournies ainsi que des commentaires reçus après les périodes de consultation, ce chapitre sur le ciment a été révisé sous la forme d'une remise à jour des informations et des données. De plus, des sections supplémentaires ont été rédigées, par exemple sur l'utilisation des déchets en tant que combustible ou matières premières ainsi que sur leur consommation au cours du processus de fabrication du ciment, la cogénération, les différents types d'émissions dans l'air, des exemples de coûts pour les mesures ou techniques de réduction des gaz résiduels et les mesures/techniques primaires employés pour la réduction des émissions, les incidences sur les émissions et l'efficacité énergétique de l'utilisation des déchets et des outils de management environnemental.

Malgré la quantité importante d'informations utiles et les nombreux commentaires sur plusieurs questions différentes, plusieurs problèmes relatifs aux données et leurs conséquences pour ce chapitre sur le ciment doivent être signalés :

- on constate un manque d'informations sur la fréquence des mesures, et notamment dans le cas des mesures périodiques ;
- il manque des informations sur la question des émissions de mercure et sur la relation entre ces émissions et les options techniques disponibles pour réduire les teneurs en mercure ;
- dans une certaine mesure, on constate un manque d'informations cohérentes sur les techniques de surveillance et les systèmes de mesure des émissions, par exemple dans le cas du mercure ;
- en ce qui concerne le charbon actif, les informations et les données obtenues ne concernent que la réduction des émissions de SOx et le charbon actif n'est pas envisagé comme une technique de réduction multi-polluant pour diverses autres émissions dans l'air ;
- les données d'entrée obtenues sur l'utilisation des déchets sont différentes dans l'UE des 27 en termes de caractéristiques et de paramètres, par exemple, en raison des données spécifiques aux cimenteries. Les données fournies à cet égard font apparaître un grand nombre de détails spécifiques mais laissent entendre qu'il est difficile de s'entendre sur des déclarations générales d'ordre quantitatif sur ce problème et les conclusions correspondantes pour les MTD s'appuient ainsi sur une approche qualitative ;
- la technique des fours à lit fluidisé, solution émergente pour la fabrication du ciment, est décrite dans la Section 1.6.1 mais le GTT n'a fourni aucune information sur la manière dont cette technique devrait et pourrait être développée plus avant.

Au cours de la réunion finale du GTT sur le ciment, la chaux et l'oxyde de magnésium, une discussion approfondie s'est tenue sur la source et les techniques possibles de réduction des émissions de mercure. La discussion a dégagé les éléments suivants :

- le niveau des émissions de mercure dépend essentiellement de la composition des matières premières. En ce qui concerne les données fournies sur les émissions, la possibilité d'atteindre des niveaux inférieurs à 0,05 mg/Nm³ a été démontrée, mais rien n'a permis de savoir d'où provenaient ces niveaux. CEMBUREAU s'est engagé à faire des recherches sur le sujet pour permettre de mieux comprendre les émissions de mercure et déterminer dans quelle mesure la question concerne l'ensemble des cimenteries. CEMBUREAU s'efforcera de réunir un ensemble complet de données dans ce domaine avant la prochaine revue de ce BREF ;
- l'Allemagne et l'Autriche assurent la surveillance en continu des émissions de mercure en conformité avec leur propre législation sur le sujet (en Allemagne depuis 2000). Dans les cimenteries allemandes, 34 CEM (Appareils de mesure en continu) de mercure étaient en service en 2008. Les appareils de surveillance faisaient l'objet de recherches et, de manière

générale, jusqu'en 2008, les performances des CEM ont été améliorées pour garantir leur fonctionnement correct et leurs capacités à fournir des résultats fiables. La nécessité d'une maintenance supplémentaire a généralement été constatée dans certains cas. Dans d'autres, et en accord avec les autorités compétentes, les appareils disponibles dans le commerce ont dû être modifiés pour les rendre compatibles avec les applications individuelles. Les cas où l'utilisation correcte des CEM n'est pas envisageable sont rares (10 %). Les conclusions finales sur la stabilité à long terme de ces appareils ne sont pas encore disponibles.

La fréquence de la maintenance périodique des CEM doit être ajustée sur la base des expériences à venir. En octobre 2007, l'agence allemande pour l'environnement UBA a demandé aux constructeurs et aux fournisseurs de ces appareils de mesure du mercure de lui faire part de leurs expériences. Ceci a permis la publication de lignes directrices pour l'assurance qualité qui définissent également des critères pour la procédure de maintenance de la plupart des CEM. Par ailleurs, la calibration correcte des CEM conformément à la norme européenne EN 14181 demeure un problème puisque la procédure exige davantage d'efforts pour la calibration des CEM mercure que pour ceux destinés à la surveillance des autres émissions comme les poussières ou les NO_x. Les procédures périodiques d'assurance qualité ne doivent être réalisées que par des personnels expérimentés. Le processus de développement en continu doit être suivi. Les résultats devront être pris en considération pour la prochaine revue du BREF sur le ciment, la chaux et l'oxyde de magnésium et il conviendra de réunir des données sur cette question afin de poser des déclarations générales quantitatives sur la mesure en continu des émissions de mercure.

Le processus de recherche en continu doit être poursuivi et des études doivent être menées pour améliorer et développer encore les techniques existantes. Les résultats devront être pris en considération pour la prochaine revue du BREF sur le ciment, la chaux et l'oxyde de magnésium et il conviendra de réunir des données sur cette question afin de poser des déclarations générales quantitatives sur la mesure en continu des émissions de mercure.

Niveau de consensus au cours de la réunion finale du GTT

Les conclusions des travaux sur le chapitre ciment ont été adoptées au cours de la réunion finale du GTT en septembre 2008. Les principaux sujets de discussion au cours de cette réunion finale du GTT portaient sur les conclusions relatives aux MTD. Les propositions de MTD pour l'industrie du ciment ont été examinées au cas par cas.

Au cours de cette réunion finale, un niveau de consensus élevé a été atteint sur les MTD (meilleures techniques disponibles) pour l'industrie du ciment et aucun désaccord n'a été enregistré. Le processus d'échange d'informations peut ainsi être considéré comme fructueux – une constatation qui s'applique aussi rétrospectivement à toute la période d'échange d'informations.

Recommandations pour les travaux à venir

L'échange d'informations et ses résultats pour l'industrie du ciment, autrement dit le chapitre ciment de ce document, représente un grand pas en avant dans la prévention et le contrôle intégrés de la pollution dans le secteur des cimenteries. Des travaux supplémentaires sur les questions suivantes pourraient prolonger le processus :

- collecter des données en tenant compte des directions définies dans le document guide de l'IEF publié en avril 2008 afin de permettre l'évaluation des performances de certaines mesures ou techniques au niveau des installations, et particulièrement des MTD envisagées ;
- collecter des informations sur les relations entre le type de procédé, les déchets (type, quantités) utilisés et les émissions ;
- collecter des données sur les coûts (investissement, frais d'exploitation, etc.) à propos de toutes les mesures ou techniques à envisager dans la définition d'une MTD ;
- collecter des données sur les coûts ainsi que sur l'efficacité des mesures ou techniques de réduction ;
- collecter des informations et des données sur les possibilités de minimiser la consommation d'énergie ou d'accroître l'efficacité énergétique ;
- collecter des données sur la consommation d'énergie ainsi que sur les meilleures performances en fonction des types de four utilisés ;

- collecter des informations et des données sur la réduction des émissions de NO_x et notamment sur les techniques SCR et SNCR ;
- collecter des informations sur les émissions de NH₃ ;

- collecter davantage d'informations sur le charbon actif en tant que mesure ou technique de réduction multi-polluant, par exemple dans le cadre de la réduction des émissions de SO_x ;
- collecter des informations sur la surveillance des émissions et la fréquence de cette surveillance, par exemple pour des mesures périodiques, afin de permettre aux autorités de vérifier les obligations ou conditions d'autorisation ;
- étudier la révision du Document de référence sur les principes généraux de surveillance ;
- collecter des informations et des données sur les émissions de COT ;
- collecter des données et étudier les mesures ou techniques qui pourraient être utilisées pour la réduction des métaux (mercure) ;
- collecter des informations et des données sur tous les entrants dans les procédés, et plus particulièrement sur le mercure ;
- collecter des informations et des données concernant les critères d'entrée pour les déchets ;
- collecter des informations sur les mesures ou techniques de surveillance en continu des émissions de mercure utilisées dans l'industrie du ciment ;
- collecter des informations sur la fabrication du ciment par la technique du lit fluidisé.

Proposition de sujets pour de futurs travaux de recherche et développement

En ce qui concerne l'utilisation de la SCR pour la réduction des NO_x dans l'industrie du ciment, des travaux supplémentaires sont encore nécessaires sur la mise au point de catalyseurs adaptés et le développement plus avant du procédé (voir MTD 17 d, Section 1.5.6.1).

Notamment à propos des techniques décrites dans la Section Techniques émergentes (Section 1.6), il sera nécessaire et utile de poursuivre les travaux de recherche et développement afin que ces techniques puissent à l'avenir être prises en considération dans la définition des MTD pour l'industrie du ciment.

Par ailleurs, la Commission européenne lance et soutient au travers de ses programmes R & D, une série de projets portant sur les technologies propres, sur les technologies émergentes de traitement des effluents et de recyclage, et sur les stratégies de management. Ces projets sont susceptibles d'apporter une contribution utile aux futures revues du BREF. Les lecteurs sont par conséquent invités à informer l'EIPPCB des résultats de recherche qui pourraient trouver leur place dans la rédaction de ce document (voir également la préface du présent document).

2 INDUSTRIE DE LA CHAUX

2.1 Informations générales sur l'industrie de la chaux

2.1.1 La chaux et ses applications

La chaux est utilisée depuis pratiquement la « nuit des temps », notamment il y a 8000 ans au Proche Orient. Il a également été prouvé que, dans la construction, l'usage de la chaux vive (CaO) et de la chaux hydratée (Ca(OH)_2) était courant dès l'an mille avant J.-C. On en trouve des traces dans de nombreuses civilisations, en particulier chez les Grecs, les Egyptiens, les Romains, les Incas, les Mayas, les Chinois et les Indiens Moghols. Les Romains eux-mêmes en connaissaient les propriétés chimiques et l'utilisaient, par exemple, pour blanchir le linge et à des fins médicales sous la forme de lait de chaux.

En 2008, la chaux est employée dans un large éventail de produits et d'applications, chacun correspondant à des exigences particulières du marché. Par exemple, la chaux et ses dérivés servent de fondant pour l'affinage de l'acier, de liant dans le bâtiment et la construction et, dans le traitement de l'eau, pour précipiter les impuretés. Elle est également largement utilisée pour la neutralisation des constituants acides des effluents industriels et des gaz de carneau.

La chaux trouve des applications dans des secteurs nombreux et variés de l'industrie et de l'agriculture : ce produit est présent dans notre vie quotidienne au travers d'un grand nombre d'applications comme le montre le Tableau 2.1.

Secteurs d'application	Utilisation
Environnement – gaz	<ul style="list-style-type: none"> neutralisation des polluants présents dans les gaz résiduels comme le soufre et le chlore mélangée à des additifs, elle capture les métaux lourds
Environnement – eau	<ul style="list-style-type: none"> traitement des effluents – traitement des eaux usées industrielles et minières (ajustement du pH, élimination du phosphore et de l'azote, et clarification de l'eau) adoucissement et élimination des impuretés de l'eau potable traitement des eaux usées
Environnement – déchets	<ul style="list-style-type: none"> traitement des déchets médicaux et dangereux traitement des boues organiques et inorganiques
Environnement – sols contaminés	<ul style="list-style-type: none"> ajustement du pH et immobilisation des sulfates, des phosphates et des métaux lourds
Construction et génie civil	<ul style="list-style-type: none"> production de briques et de blocs de béton cellulaire maçonnerie et enduits de façades stabilisation des sols et liants routiers à la chaux
Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> traitement des sols – ajustement du pH des sols pour atteindre des conditions optimales de croissance et améliorer ainsi le rendement des cultures
Aciers et métaux non-ferreux	<ul style="list-style-type: none"> utilisation dans les procédés de fabrication de l'acier pour réduire les teneurs en soufre et en phosphore, modifier la viscosité du laitier, protéger les éléments réfractaires et former le laitier utilisation en tant que fondant dans la fusion des minerais de cuivre, de plomb, de zinc et d'autres métaux neutralisation et enrobage des câbles électriques après leur nettoyage à l'acide
Industrie chimique et papetière	<ul style="list-style-type: none"> papier – processus de fabrication ; pulpe et matière première pour le carbonate de calcium précipité (CCP) huile d'addition pour les lubrifiants (sulfonates, phénates, salicylates, etc.) matières plastiques – utilisée en tant que desséchant dans la fabrication de produits pétrochimiques utilisation dans le tannage des cuirs utilisation dans les industries du verre et de la soude neutralisation des acides
Produits pharmaceutiques, soins à la personne et	<ul style="list-style-type: none"> utilisation dans la composition de la matrice de médicaments utilisation dans la fabrication du phosphate de calcium, un additif pour pâte dentifrice

produits alimentaires	<ul style="list-style-type: none"> • utilisation dans la fabrication d'additifs pour les aliments et les boissons • utilisation dans l'industrie du sucre afin de précipiter les impuretés des extraits de betterave et de canne à sucre et neutraliser également les odeurs générées par le lavage et le transport des betteraves
------------------------------	--

Tableau 2.1 : La chaux, un matériau polyvalent – quelques applications industrielles
[44, EuLA, 2006]

2.1.2 La production mondiale de chaux

En 2006, la production mondiale totale de chaux était estimée à 172 millions de tonnes par an, y compris la production intégrée, comme le montre le Tableau 2.2.

Pays	Production annuelle	
	Mt/an	%
Brésil	6	3,5
Chine	75	43,6
UE-25	28	16,3
Autres pays européens	2	1,2
Inde	4	2,3
Japon	10	5,8
Mexique	4	2,3
Russie	8	4,7
Etats-Unis	20	11,6
Autres pays	15	8,7
Total	172	100

Tableau 2.2 : Meilleure estimation de la production mondiale de chaux vive et de dolomie en 2006 dans l'UE des 27, y compris la production de chaux intégrée
[44, EuLA, 2006], [168, GTT CLM, 2007]

2.1.3 Répartition géographique et considérations économiques générales en Europe – principaux indicateurs

2.1.3.1 Production annuelle

L'Allemagne, la France, la Pologne, la Belgique, l'Espagne et l'Italie sont les plus gros producteurs de chaux de l'Europe des 27, qui représente près de 20 % de la production mondiale. Quatre Etats membres – Chypre, Malte, le Luxembourg et les Pays-Bas – ne produisent pas de chaux. La structure de l'industrie de la chaux varie d'un Etat membre à l'autre. Toutefois, dans la plupart d'entre eux, elle est essentiellement constituée de petites et moyennes entreprises et l'on compte ainsi plus de 100 sociétés opérant dans l'Union européenne. La plupart d'entre elles sont de petits producteurs ne possédant le plus souvent qu'une seule usine mais la tendance de ces dernières années est à la concentration et un nombre réduit de grandes compagnies internationales a conquis une part considérable du marché. La Figure 2.1 présente le marché de la production européenne de l'Europe des 27 tel qu'il était en 2004. Il représentait alors près de 25 millions tonnes de chaux pour une production européenne totale de 28 millions de tonnes, y compris la production de chaux commerciale et intégrée.

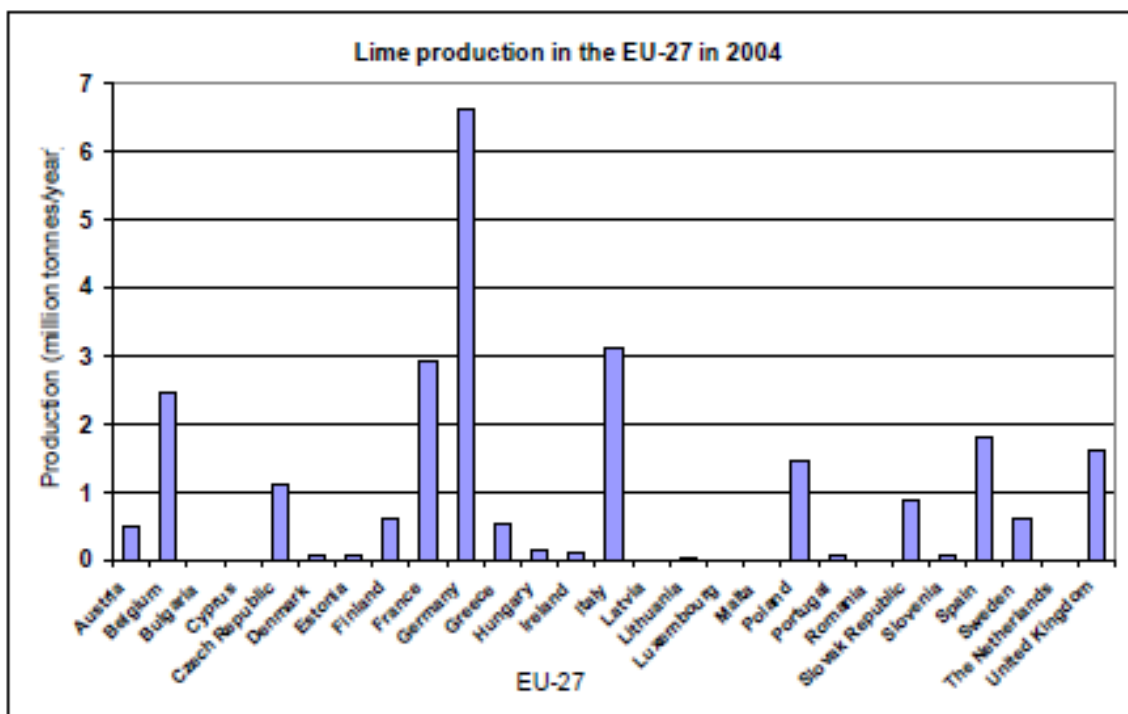


Figure 2.1 : Production de chaux et de dolomie dans l'Europe des 27 en 2004
[44, EuLA, 2006]

La production de chaux dans les pays de l'Union européenne a chuté à la fin des années 1980, pour ne reprendre que dans les premiers mois de 1994. Cette évolution est due à des modifications dans les modes de consommation. L'un des principaux utilisateurs de la chaux, la sidérurgie, a en effet réduit ses besoins en chaux de 100 à 40 kg par tonne d'acier. Toutefois, vers le milieu des années 1990, l'utilisation croissante de la chaux pour la protection de l'environnement a permis un redressement des chiffres des ventes.

Par le passé, la consommation totale de chaux dans l'Union européenne a stagné, car la demande croissante dans certains domaines, comme le traitement de l'eau ou la désulfuration des fumées n'a que partiellement compensé la réduction de la demande dans les secteurs traditionnels de la sidérurgie et de la métallurgie.

La chaux est un matériau peu onéreux, mais pondéreux. En conséquence, on a tendance à le transporter sur des distances relativement courtes. Les exportations de chaux hors de l'Union européenne ne représentent qu'une très faible proportion de la production. Le Tableau 2.3 présente les parts de marché estimées en 2004 pour la chaux commercialisée dans les 27 pays de l'Union.

Secteurs	Contribution (%)
Sidérurgie et traitement des métaux non-ferreux	30– 40
Protection de l'environnement, agriculture et forêt	30
Construction et stabilisation des sols argileux	15 – 20
Autres : produits chimiques, raffinage des métaux non ferreux, CCP pour l'industrie papetière, l'industrie alimentaire, les aliments pour animaux et les soins de santé	10 – 15

Tableau 2.3 : Répartition de la chaux commerciale par secteur dans l'UE des 27 en 2004
[44, EuLA, 2006]

2.1.3.2 Problèmes clés liés à l'environnement et au développement durable

Les principaux problèmes environnementaux liés à la production de la chaux sont la consommation d'énergie, les émissions de CO₂ générées par le procédé et la combustion, le contrôle de la pollution de l'air (essentiellement des poussières), le transport et la remise en état des sites d'extraction [44, EuLA, 2006].

Les problèmes clés liés au développement durable de l'extraction des principales matières premières nécessaires à la production de la chaux résident dans l'accès à des gisements de haute qualité de calcaire et de dolomie afin de garantir les réserves géologiques sur le très long terme. D'un point de vue géologique, le calcaire est une roche très commune mais il est rare de trouver des gisements qui présentent toutes les caractéristiques essentielles suivantes :

- réserve de 50 ans ou plus,
- grande pureté chimique,
- propriétés physiques et mécaniques spécifiques,
- proximité des infrastructures de transport,
- contraintes environnementales.

Le Tableau 2.4 présente l'utilisation prévisible de la chaux en 2030 par comparaison avec 2003.

Comparatif 2003 – 2030 de l'utilisation du calcaire et de la dolomie en tant que matières premières		
Applications de la chaux : matériau de construction et utilisations industrielles (acier, papier, verre, sucre, protection des sols, protection de l'environnement)	2003 En millions de tonnes par an	2030 En millions de tonnes par an
Production de chaux et de dolomie après calcination de calcaire et de dolomie	25	32
Matières premières pour la production de chaux et de dolomie	50	64

Tableau 2.4 : Comparatif 2003 – 2030 de l'utilisation du calcaire et de la dolomie en tant que matières premières
[44, EuLA, 2006]

2.1.3.3 Types de chaux et de chaux dolomitique

Le terme de « chaux » est souvent utilisé de manière abusive pour décrire les produits du calcaire, ce qui conduit fréquemment à des ambiguïtés. Le terme chaux comprend la chaux vive et la chaux éteinte et est synonyme de « produits de chaux ». La chaux vive est de l'oxyde de calcium (CaO) produit par décarbonatation du calcaire ou pierre à chaux (CaCO₃). La chaux éteinte est produite par réaction, ou « extinction », de la chaux vive avec de l'eau, et se compose principalement d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂). La chaux éteinte comprend la chaux hydratée (poudre sèche d'hydroxyde de calcium), le lait de chaux et la chaux en pâte (dispersions de particules d'hydroxyde de calcium dans l'eau). Toutefois, la chaux représente 90 % de la quantité totale produite, les autres 10 % étant de la dolomie.

Ces différents types de chaux sont utilisés dans des applications très diverses. On distingue les chaux calciques, dolomitiques et hydrauliques. Les chaux calciques, qui constituent de loin la catégorie la plus importante, sont fournies en roches, broyées et hydratées. Les chaux dolomitiques sont des produits plus spécialisés et disponibles par plus petites quantités, en morceaux, broyées, hydratées et surcuites.

Les chaux hydrauliques sont partiellement hydratées et contiennent des composants qu'on retrouve dans les ciments (silicates et aluminates de calcium) ; elles sont utilisées exclusivement dans le bâtiment et la construction.

Ce document n'aborde que la question de la production de chaux non intégrée.

Le Tableau 2.5 présente les différents synonymes utilisés dans le secteur avec leur numéro d'enregistrement CAS (une division de l'American Chemical Society) et leur numéro CE dans l'Inventaire Européen des Substances chimiques Commerciales Existantes ou EINECS (European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances).

Substance chimique	Formule chimique	Synonymes	N° CE	N° CAS
Oxyde de calcium	CaO	Chaux, chaux surcuite et chaux vive	215-138-9	1305-78-8
Oxyde de calcium et de magnésium	CaO•MgO	Chaux dolomitique, dolomie	253-425-0	37247-91-9
Hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂	Hydrate de calcium, hydroxyde de calcium, chaux caustique, chaux hydratée et chaux éteinte	215-137-3	1305-62-0
Tetrahydroxyde de calcium et de magnésium	CaMg(OH) ₄	Chaux dolomitique hydratée, hydroxyde de calcium et de magnésium	254-454-1	39445-23-3

Tableau 2.5 : Nomenclatures de la chaux, numéros CE et CAS
[44, EuLA, 2006]

2.1.3.4 Installations de fabrication de chaux

Il existait en 2003 environ 211 installations de production de chaux dans l'Union européenne (hormis les unités intégrées). La répartition de ces sites dans les Etats membres de l'UE figure au Tableau 2.6.

Pays		Production de chaux et de dolomie	Production de dolomie surcuite
Belgique	BE	6	1
Bulgarie	BG	6	1
République tchèque	CZ	5	0
Danemark	DK	1	0
Allemagne	DE	39	1
Estonie	EE	1	0
Grèce	EL	19	0
Espagne	ES	22	2
France	FR	16	0
Irlande	IE	1	0
Italie	IT	36	1
Chypre	CY	0	0
Lettonie	LV	1	0
Lituanie	LT	1	0
Luxembourg	LU	0	0
Hongrie	HU	3	0
Malte	MT	0	0
Pays-Bas	NL	0	0
Autriche	AT	6	0
Pologne	PL	8	0
Portugal	PT	4	0
Roumanie	RO	8	0
Slovénie	SI	3	0

Slovaquie	SK	6	0
Finlande	FI	6	0
Suède	SE	7	0
Royaume - Uni	UK	6	2
TOTAL		211	8

Tableau 2.6 : Nombre d'usines à chaux non intégrées dans les Etats membres de l'UE des 27 dont la production dépasse 50 tonnes par jour – total 2003
[44, EuLA, 2006], [139, Italie, 2007]

En 2006, près de 597 fours au total produisaient de la chaux commerciale (à l'exclusion des fours à chaux intégrés) dans l'UE-27. Ces fours peuvent être répartis en six différents types. Le Tableau 2.7 et les Figures 2.2, 2.3 et 2.4 montrent le nombre de fours exploités par type de four et leur importance relative dans la production de chaux, de dolomie et de dolomie surcuite dans les 27 Etats membres.

Types de four	Nombre de fours
Four long rotatif (LRK)	26
Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	20
Fours verticaux à cycles alternés (PFRK) (chaux standard et chaux fine)	158
Four annulaire (ASK)	74
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	116
Autres fours (OK)	203
TOTAL	597

Tableau 2.7 : Nombre de fours à chaux en exploitation par type de four en 2004 dans l'UE des 27
[44, EuLA, 2006] [46, Allemagne, 2006]

Les autres fours (OK) peuvent être :

- des fours verticaux à double chambre inclinée,
- des fours verticaux à plusieurs chambres,
- des fours verticaux à brûleur central
- des fours verticaux à chambre externe,
- des fours verticaux à brûleur en faisceau,
- des fours verticaux à voûte interne,
- des fours à grilles mobiles
- des fours avec mise en forme au sommet,
- des fours à calcination rapide
- des fours à sole rotative.

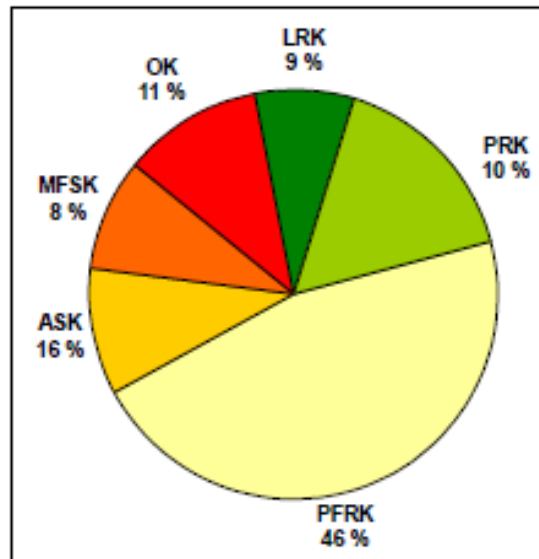


Figure 2.2 : Production de chaux commerciale par type de four dans l'UE des 27 en 2004
[44, EuLA, 2006]

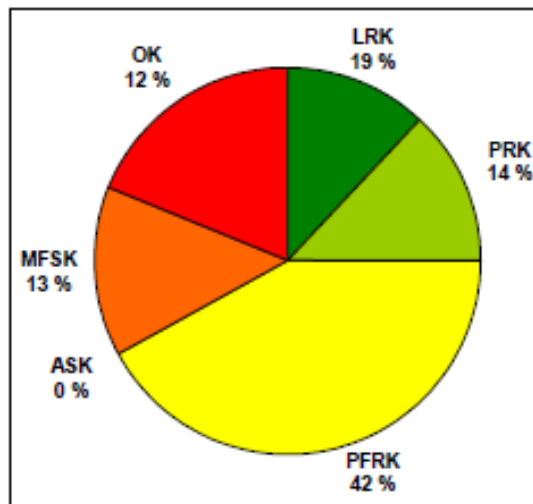


Figure 2.3 : Production de dolomie commerciale par type de four dans l'UE des 27 en 2004
[44, EuLA, 2006]

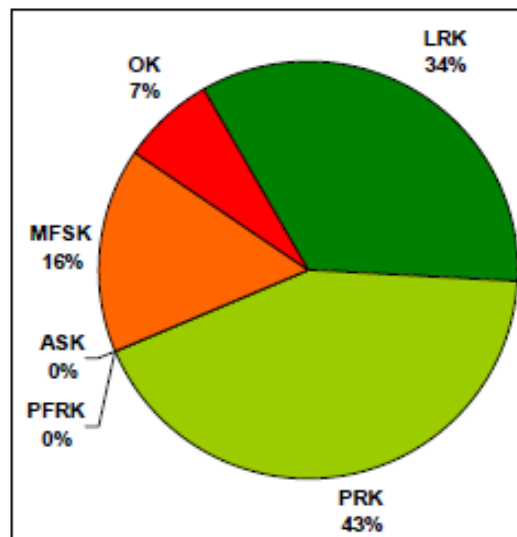


Figure 2.4 : Production de dolomie commerciale clinkérisée par type de four dans l'UE des 27 en 2004
[44, EuLA, 2006]

Pour la fabrication de chaux, de dolomie ou de dolomie clinkérisée, les capacités de production des fours à chaux sont le plus souvent comprises entre 50 et 500 tonnes par jour. Seuls 10 % environ de ces fours ont une capacité inférieure à 10 tonnes ou supérieure à 500 tonnes par jour. Le Tableau 2.8 récapitule le nombre des différents types de fours par pays de l'UE à 27 en 2003 pour la production de chaux et de dolomie.

Pays		Four long rotatif (LRK)	Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	Four vertical à cycles alternés	Four annulaire (ASK)	Four vertical à alimentation mixte	Autres fours (OK)	Total
Belgique	BE	5	3	14	5	9	1	37
Bulgarie	BG	1	-	2	-	-	29	32
République tchèque	CZ	-	2	8	-	4	2	16
Danemark	DK	1	-	-	-	-	-	1
Allemagne	DE	1	6	15	32	64	17	135
Estonie	EE	-	-	-	-	-	2	2
Grèce	EL	2	-	2	2	-	40	46
Espagne	ES	3	1	34	1	1	9	49
France	FR	-	2	18	23	-	5	48
Irlande	IE	-	-	1	-	-	-	1
Italie	IT	-	-	31	4	-	35	70
Chypre	CY	-	-	-	-	-	-	0
Lettonie	LV	-	-	-	-	-	1	1
Lituanie	LT	1	-	-	-	-	-	1
Luxembourg	LU	-	-	-	-	-	-	0
Hongrie	HU	-	-	3	-	-	-	3
Malte	MT	-	-	-	-	-	-	0
Pays-Bas	NL	-	-	-	-	-	-	0
Autriche	AT	-	-	3	3	1	3	10
Pologne	PL	-	-	4	-	36	1	41
Portugal	PT	-	-	3	-	-	6	9
Roumanie	RO	-	-	7	-	-	14	21
Slovénie	SI	-	-	-	2	-	10	12
Slovaquie	SK	-	4	3	-	1	13	21
Finlande	FI	5	-	3	1	-	-	9
Suède	SE	5	-	4	-	-	-	9
Royaume - Uni	UK	5	2	8	-	-	6	21
Total		29	20	163	73	116	194	595

Tableau 2.8 : Nombre de fours à chaux par pays dans l'UE des 27 en 2003 pour la production de chaux et de dolomie, à l'exclusion des fours intégrés
[44, EuLA, 2006], [139, Italie, 2007]

L'industrie de la chaux est un secteur à très forte intensité énergétique, avec un poste énergie représentant entre 30 et 60 % du total des coûts de production. Les fours brûlent des combustibles fossiles de type solide, liquide ou gazeux ainsi que des déchets ou de la biomasse. L'utilisation des déchets en tant que combustible est fonction de la qualité voulue de la chaux. L'utilisation de déchets peut avoir une incidence sur la qualité de la chaux et leurs caractéristiques doivent être analysées avant emploi. Au cours des quelques dernières années, l'utilisation des combustibles fossiles a diminué au profit des déchets. Le Tableau 2.9 présente la répartition des différents types de combustible utilisés dans l'UE des 27 en 2003.

Types de combustible	Unité	UE-27 2003
Gazeux (fossile)	%	43
Solide (fossile)	%	41
Liquide (fossile)	%	7
Autres	%	-
Déchets	%	8
Biomasse	%	1

Tableau 2.9 : Répartition des combustibles utilisés pour la cuisson de la chaux dans l'UE des 27 en 2003

[16, EuLA, 2001], [44, EuLA, 2006]

Les principales émissions liées à la production de chaux sont les émissions atmosphériques du four. Celles-ci résultent de la composition chimique particulière des matières premières et des combustibles utilisés. Toutefois, d'importantes émissions de poussières peuvent se produire à toutes les étapes du procédé, notamment lors de l'hydratation et de la cuisson. De plus, les opérations de convoyage, de transport, de stockage en vrac, etc. sont susceptibles de générer des émissions de poussières diffuses. Les émissions potentiellement polluantes des usines à chaux peuvent inclure des oxydes de carbone (CO, CO₂), des oxydes d'azote (NO_x), du dioxyde de soufre (SO₂) et des poussières.

2.2 Techniques et procédés utilisés pour la fabrication de la chaux

Le procédé de fabrication de la chaux consiste à brûler des carbonates de calcium ou de magnésium à des températures comprises entre 900 et 1 200 °C qui sont suffisamment élevées pour libérer le dioxyde de carbone et obtenir l'oxyde dérivé ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Certains procédés, comme la production de dolomie surcuite, impliquent des températures de calcination nettement plus élevées pouvant atteindre 1 800 °C.

L'oxyde de calcium produit par le four est habituellement concassé, broyé et/ou tamisé avant d'être transporté vers le stockage en silo. De là, la chaux calcinée est soit livrée à l'utilisateur final pour servir sous la forme de chaux vive, soit transférée vers une station d'hydratation où elle entre en réaction avec de l'eau afin de produire de la chaux hydratée ou éteinte.

Les Figures 2.5, 2.6 et 2.7 montrent les étapes élémentaires du procédé général de fabrication de la chaux dans l'ordre suivant [44, EuLA, 2006] :

- extraction des matières premières à partir des gisements de calcaire,
- stockage et préparation du calcaire,
- stockage et préparation des différents types de combustibles,
- calcination du calcaire,
- hydratation et extinction de la chaux vive,
- broyage de la chaux vive,
- autres traitements de la chaux,
- stockage, manutention et transport.

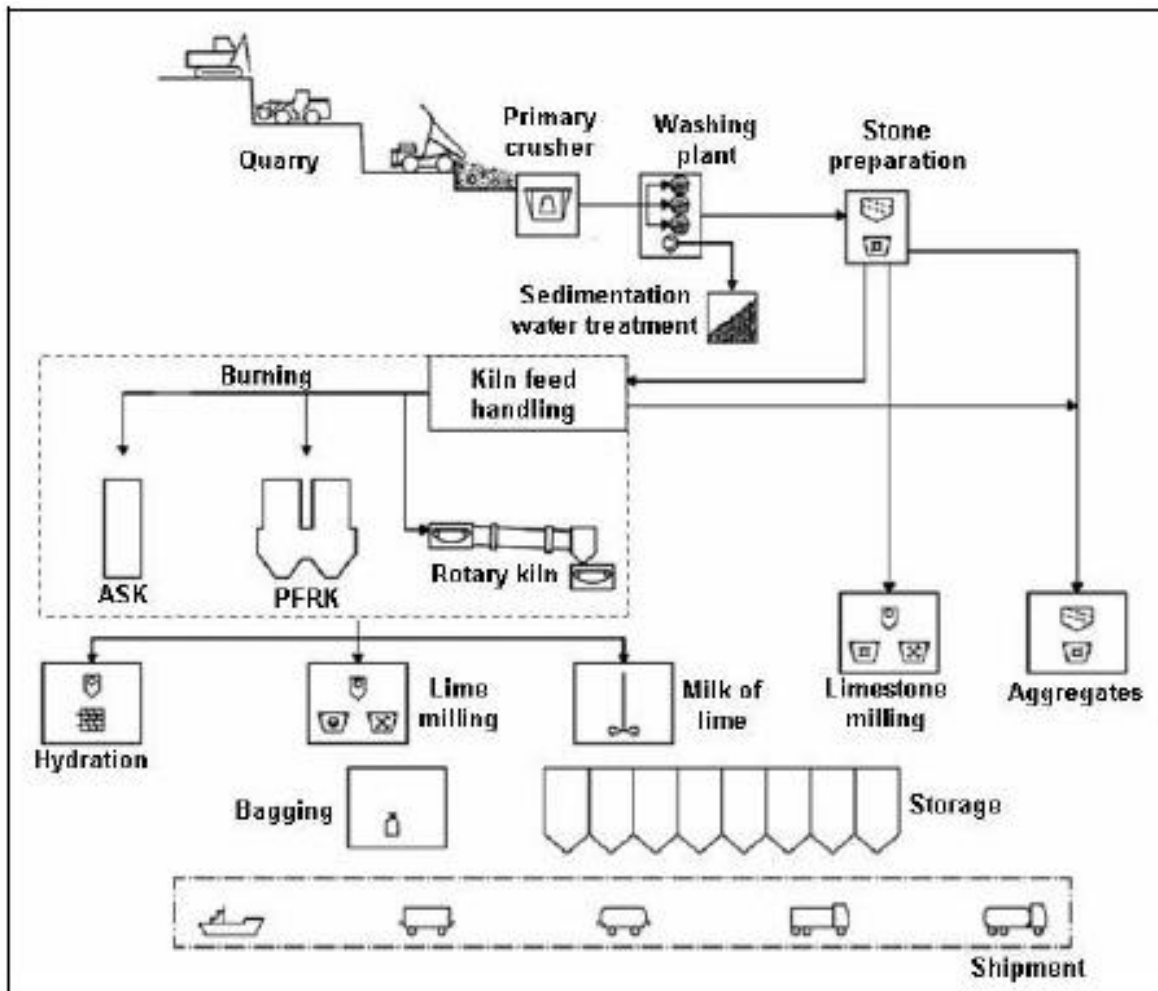


Figure 2.5 : Vue générale du procédé de fabrication de chaux
[44, EuLA, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [177, EULA, 2008]

2.2.1 Description générale du procédé de production

La fabrication de la chaux dépend en premier lieu de la qualité du calcaire qui est inhérente à la situation géologique du gisement. Le calcaire est broyé et chargé dans un four où il subit une réaction de décomposition thermique qui dégage de l'oxyde de calcium et du dioxyde de carbone. Ce « produit », généralement appelé chaux vive, est broyé à la finesse voulue avant stockage, transport ou traitement supplémentaire. La Figure 2.6 présente un schéma de principe des principales étapes de la production de chaux.

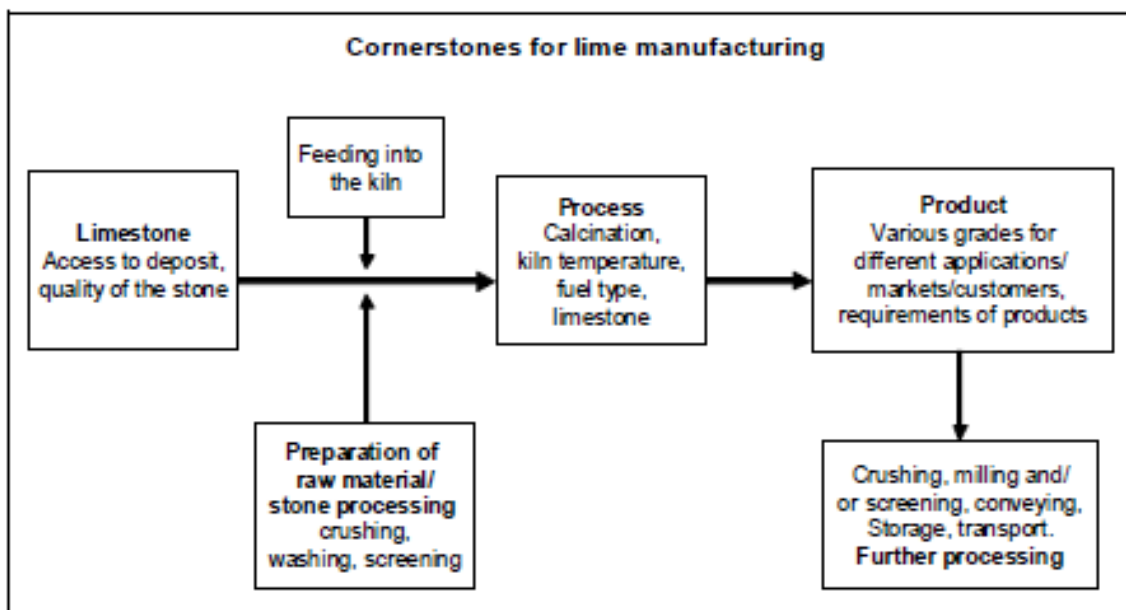


Figure 2.6 : Schéma de principe des principales étapes de la fabrication de la chaux [44, EuLA, 2006]

Les trois grandes étapes « calcaire », « procédé » et « produit » sont fortement dépendantes les unes des autres pour parvenir à fabriquer le produit qui répond aux différents besoins du marché. La chaux est utilisée dans la fabrication de produits variés utilisés par un large éventail de secteurs industriels : c'est un produit intermédiaire indispensable à de nombreux procédés. Toutefois, les différentes sortes d'application exigent à leur tour des propriétés physico-chimiques des produits de chaux. Les critères de qualité de la chaux sont définis notamment par des normes nationales et européennes mais également dans des accords directs entre fabricants et acheteurs. L'industrie de la chaux a toujours été disposée à s'adapter à une large gamme de critères de qualité grâce à une technique à maturité, autrement dit des types de fours spéciaux avec des combustibles adaptés.

La qualité du calcaire (CaCO_3) et de la dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) joue un rôle particulier dans le processus de production sur la qualité finale de la chaux et sa composition chimique. La technique de four, autrement dit le type de four et le combustible employé, influence de manière considérable les propriétés de la chaux produite et c'est pour cela que différents types de fours ont été élaborés dans le monde entier pour atteindre les différentes qualités de chaux. Les meilleures techniques disponibles pour la fabrication de la chaux consistent à choisir la combinaison optimale de four et de combustible en fonction des gisements de calcaire accessibles et des besoins du client.

Les Figures 2.5 et 2.7 montrent le procédé de fabrication de la chaux.

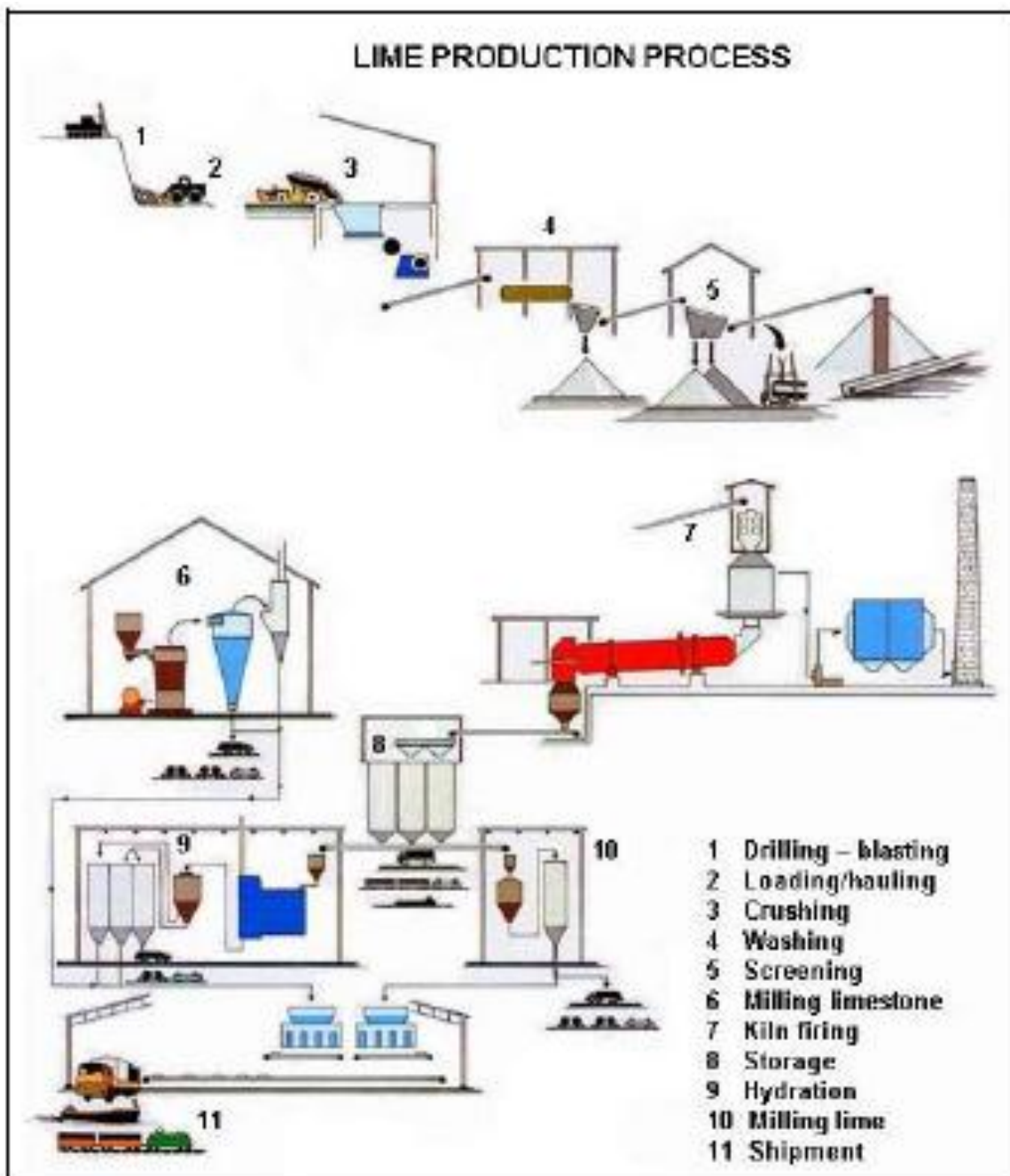


Figure 2.7 : Vue d'ensemble d'un procédé de fabrication de la chaux
[44, EuLA, 2006]

2.2.2 Matières premières et extraction du calcaire

La matière première pour la fabrication de la chaux est le calcaire (pierre à chaux) ou, dans une moindre mesure, la dolomie ou le calcaire dolomitique. Le calcaire représente 10 % du volume total des roches sédimentaires de notre planète.

De manière générale, le calcaire contient plus de 90 % de CaCO_3 et un faible pourcentage de MgCO_3 . La dolomie est un carbonate double qui contient entre 54 et 58 % de CaCO_3 et de 40 à 44 % de MgCO_3 . Le terme de « calcaire dolomitique » désigne habituellement un calcaire dont la teneur en MgCO_3 est supérieure à celle du calcaire, mais moindre que celle de la dolomie. La matière première, comme le calcaire, peut être âgée de plus de 360 millions d'années. Si les dépôts de calcaires sont relativement abondants dans bien des pays, seule une faible proportion d'entre eux sont commercialement exploitables.

La roche calcaire provient d'abord du processus de dissolution combinée d'ions calcium et de dioxyde de carbone qui suit soit un trajet organique sous l'action d'organismes variés, soit un trajet non organique où intervient la cristallisation du carbonate. Ce processus est suivi d'un autre appelé diagenèse ou consolidation de sédiments en roches dures. Il s'agit d'un processus très complexe qui peut passer par plusieurs étapes organiques et physico-chimiques. Il est par conséquent concevable que le calcaire puisse exister sous de nombreuses formes selon le processus initial de formation, ce qui se traduit alors par sa granulométrie, sa microstructure, sa texture et sa teneur en impuretés et en carbonate.

La quantité d'impuretés ou d'éléments traces ainsi que la teneur en carbonate sont particulièrement importantes car elles déterminent si le calcaire convient à de multiples applications. Le Tableau 2.10 donne la liste des impuretés ou d'éléments traces généralement présents dans le calcaire avec leurs teneurs habituelles. Pour obtenir un exemple de composition de matière première issue du calcaire utilisé dans une usine à chaux hongroise, se reporter au Tableau 4.29 de la Section 4.3.2.1.

Impuretés ou métaux	Unité	Teneur habituelle
Silice (sous forme de SiO_2)	%	0,1 – 2,0
Alumine (sous forme de Al_2O_3)	%	0,04 – 1,5
Fer (sous forme de Fe_2O_3)	%	0,02 – 0,6
Soufre (S)	%	0,0024 – 0,118
Substances carbonées	%	0,01 – 0,5
Manganèse (sous forme de MnO_2)	mg/kg	20 – 1000
Antimoine	mg/kg	0,1 – 3
Arsenic	mg/kg	0,1 – 15
Bore	mg/kg	1 – 20
Cadmium	mg/kg	0,1 – 1,5
Chrome	mg/kg	3 – 15
Cuivre	mg/kg	1 – 30
Plomb	mg/kg	0,5 – 30
Mercur	mg/kg	0,02 – 0,1
Molybdène	mg/kg	0,1 – 4
Nickel	mg/kg	0,5 – 15
Sélénium	mg/kg	0,02 – 3
Argent	mg/kg	0,2 – 4
Etain	mg/kg	0,1 – 15
Vanadium	mg/kg	1 – 20
Zinc	mg/kg	3 – 500

Tableau 2.10 : Teneur usuelle des impuretés et d'éléments traces présents dans le calcaire
[44, EuLA, 2006], [70, Hongrie, 2006], [126, Oates, 1998]

Toutefois, en ce qui concerne la production de chaux hydraulique naturelle, les matières premières utilisées contiennent entre 65 et 90 % de CaCO_3 et de MgCO_3 . La pureté de ces matières premières est différente de celle des éléments employés dans la production d'autres types de chaux. De plus, la teneur en matières organiques, exprimée en COT, est bien supérieure et comprise entre 0,8 et 5 % [127, Portugal, 2007].

Les matières premières, comme le calcaire très pur ou la dolomie, sont extraites, pré-concassées et parfois lavées puis tamisées avant leur transport vers le lieu de fabrication de la chaux. L'extraction du calcaire s'effectue normalement dans des carrières à ciel ouvert, généralement contiguës à l'usine à chaux ce qui permet de transporter directement les matières premières par convoyeur à bande. Cependant, dans certains cas, l'extraction est réalisée par dragage marin, voire exploitation souterraine. L'acheminement de matières premières provenant de carrières éloignées de l'usine est également possible, par exemple par navire. En général, le procédé d'extraction comprend les étapes suivantes :

- retrait des terrains de couverture (terre, argile et roche meuble recouvrant le gisement),
- abattage de la roche par tirs de mines,
- chargement et transport de la roche extraite vers la station de concassage et de criblage.

Pour d'autres informations sur l'extraction et l'exploitation minière, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles en matière de gestion des résidus et des stériles des activités minières [47, Commission européenne, 2004].

2.2.3 Préparation, nettoyage et stockage du calcaire

2.2.3.1 Préparation du calcaire

La fabrication de la chaux dépend en premier lieu de la qualité du calcaire qui est inhérente à la situation géologique du gisement. Une extraction sélective peut améliorer la qualité du calcaire pour le procédé de calcination. Si les impuretés ou les éléments traces sont présents de manière hétérogène, il est généralement possible d'en éliminer certains par des techniques sélectives d'extraction, de lavage ou de tamisage. Lorsque les impuretés sont en revanche uniformément réparties dans la roche, ces procédés sont inefficaces. Les propriétés du calcaire, comme sa porosité, son comportement hygroscopique ou sa capacité d'absorption de l'eau, son poids volumique apparent, sa dureté, sa résistance et ses propriétés de décrépitation, sont interdépendantes. Elles jouent un rôle crucial dans la calcination ou procédé de cuisson et dans les propriétés chimiques et physiques du produit fini résultant.

Pour extraire le calcaire, on procède généralement par forage et tir de mine sur des bancs exploitables. Le calcaire ainsi dégagé est ensuite dirigé vers les procédés de concassage et de tamisage.

Les blocs de calcaire d'un mètre de diamètre sont généralement concassés dans des concasseurs primaires pour obtenir des pierres de 100 à 250 mm de diamètre. En fonction de la nature de la roche (dureté, schistosité, taille, etc.), on utilise différents types de concasseurs primaires, tels que des concasseurs rotatifs, à mâchoires ou à percussion. Les stations de concassage sont parfois implantées sur le site de la carrière et sont mobiles.

Le calcaire qui sort du concasseur primaire est transporté par convoyeur vers des tamis vibrants pour séparer les gros morceaux aux fins de recyclage tandis que ceux qui passent le crible servent à alimenter le four ou peuvent être convoyés vers des concasseurs secondaires situés en aval de la chaîne.

Les concasseurs secondaires broient le calcaire en pierres de 5 à 80 mm de diamètre. Comme la charge du four n'a pas besoin d'être très fine, les concasseurs à mâchoires et à percussion servent souvent de concasseurs secondaires, de même que les broyeurs à marteaux.

Après le concassage, le calcaire passe dans une unité de tamisage avant d'être entreposé en silo ou amassé en tas. Il est ensuite transporté dans le four à chaux par convoyeur à bande ou

élevateur à godets.

La répartition par taille du calcaire broyé et tamisé doit être compatible avec les caractéristiques du four. Cela implique généralement que les pierres soient correctement triées afin que la répartition granulométrique atteigne, en théorie, 2 pour 1, ou au moins 3 pour 1.

2.2.3.2 Stockage du calcaire

Les calcaires de différentes granulométries sont triés et stockés en silos ou entassés à l'extérieur. En général, les qualités fines sont entreposées dans des silos ou en tas.

2.2.3.3 Lavage du calcaire

Avant d'être envoyé dans le four, le calcaire est parfois lavé dans des tambours de lavage ou sur des tamis, par exemple. Moins de 10 % des usines à chaux lavent le calcaire afin de réduire sa teneur naturelle en sable et en argile qui pourrait avoir un effet négatif sur le procédé de cuisson ou nuire à la qualité du produit final.

Ce lavage favorise le processus de cuisson, car il libère de l'espace entre les pierres pour la circulation de l'air comburant, ce qui réduit le volume d'excès d'air et économise l'énergie électrique. Par ailleurs, des techniques d'empilage du calcaire, pour un lavage plus efficace, ont été mises au point.

L'élimination des solides en suspension dans l'eau de lavage s'effectue :

- dans des puits de sédimentation qui peuvent ensuite être remis en culture ;
- par déshydratation dans des presses à filtres.

Dans les deux systèmes, l'eau purifiée est réutilisée dans le procédé de lavage comme le montre la Figure 2.8.

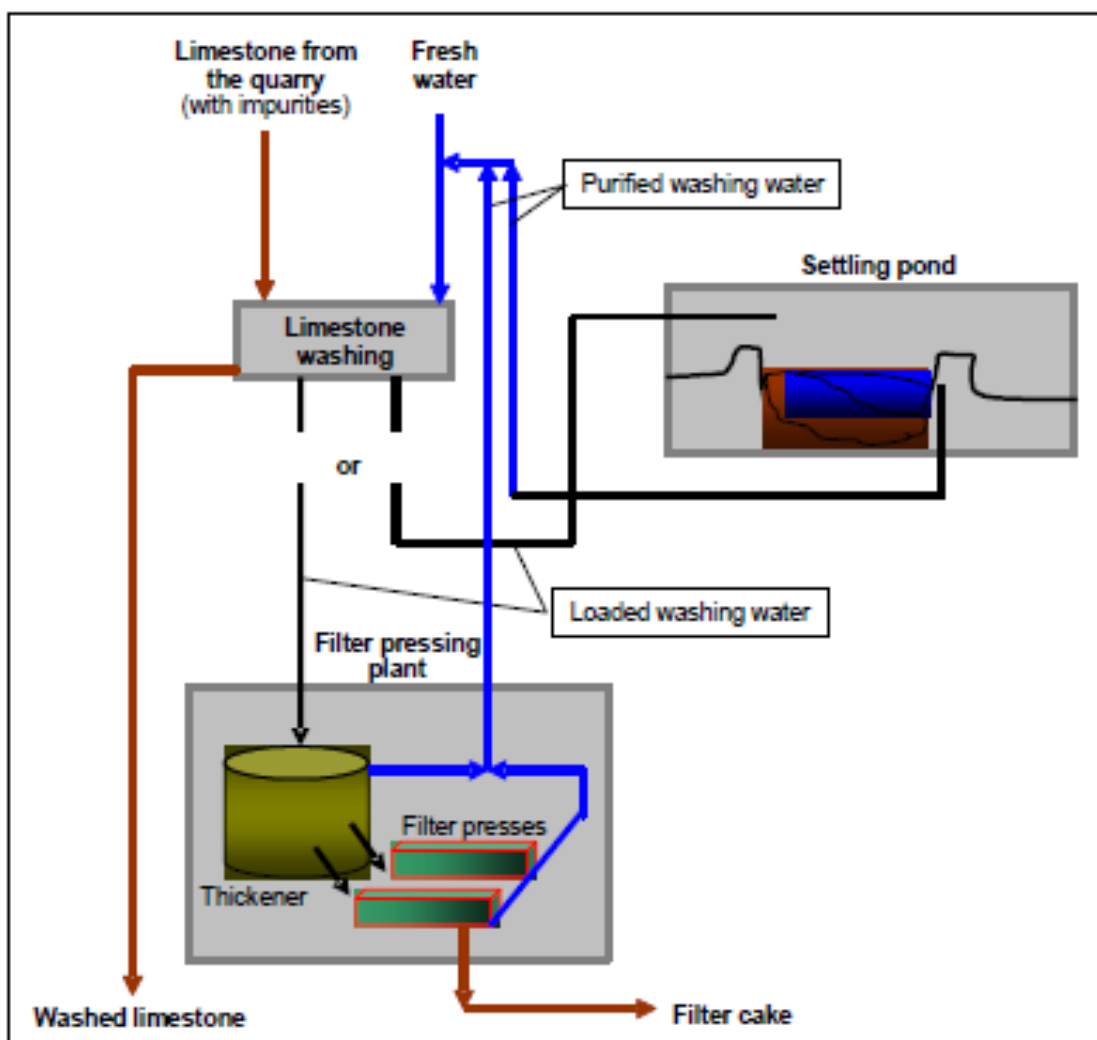


Figure 2.8 : Schéma de principe du lavage du calcaire et de la purification de l'eau de lavage [46, Allemagne, 2006]

2.2.4 Combustibles – préparation et stockage

L'industrie de la chaux est une industrie à très forte intensité énergétique, avec un poste énergie représentant 60 % du total des coûts de production. Dans le processus de fabrication, le combustible fournit l'énergie de calcination nécessaire. Il est également en interaction avec le procédé, et les produits de la combustion réagissent avec la chaux vive. On emploie de très nombreux combustibles dans les fours à chaux. Les plus couramment utilisés dans l'UE sont les combustibles gazeux naturels, comme le gaz naturel, le gaz de cokerie, les combustibles solides comme le charbon (houille, lignite pulvérisé et coke de pétrole), le coke ou l'anthracite ainsi que des combustibles liquides comme le fioul lourd ou le fioul léger. Les déchets – huiles usagées, matières plastiques, papier, farines animales (farine de viande et d'os) ou sciure de bois – sont également utilisés en tant que combustibles [44, EuLA, 2006], [45, Schorcht, 2006], [46, Allemagne, 2006].

La plupart des fours peuvent fonctionner avec plusieurs combustibles, mais certains combustibles sont incompatibles avec certains fours. Certains combustibles exigent un garnissage réfractaire spécial du four. Le Tableau 2.11 donne le pourcentage des types de combustibles utilisés dans les différents types de fours à chaux en 2003 et la Figure 2.9 présente les types de combustibles et l'énergie utilisés en 2005 dans l'UE des 27.

Type de combustible	Description du combustible	Pourcentage des combustibles utilisés dans différents types de fours à chaux (%)					
		LRK	PRK	ASK	PFRK	MFSK	OK
Gazeux (fossile)	Gaz naturel, de cokerie ou de haut fourneau, butane, propane	3	26	69	64	0	51
Solide (fossile)	Charbon, coke de pétrole, coke métallurgique, lignite, anthracite	81	60	6	20	100	32
Liquide (fossile)	Fioul lourd, moyen ou léger	1	3	14	10	0	10
Déchets (fossiles et biomasse)	Déchets de bois, pneumatiques, matières plastiques, déchets combustibles liquides, graisses animales, farine de viande et d'os	14	11	11	3	0	7
Biomasse	Bois, copeaux de bois, sciure de bois, déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière	0	0	0	3	0	0

Tableau 2.11 : Types de combustibles utilisés dans différents types de fours à chaux dans l'UE des 27 en 2003

[44, EuLA, 2006], [46, Allemagne, 2006], [64, République tchèque, 2006]

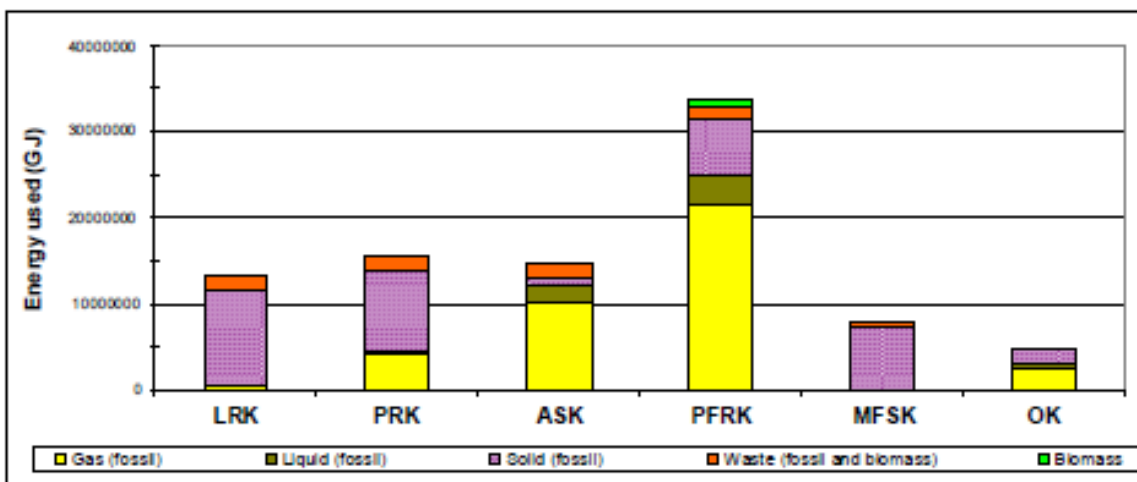


Figure 2.9 : Types de combustibles utilisés pour le procédé de cuisson des fours à chaux dans l'UE des 27 en 2005

[44, EuLA, 2006]

Le choix du ou des combustibles pour l'opération de calcination est très important pour les raisons suivantes :

- coûts des combustibles – le coût du combustible par tonne de chaux peut représenter 30 à 60 % du coût de production ;
- disponibilité du combustible sur le marché ;
- qualité de la chaux – le combustible influence la qualité de la chaux notamment la teneur résiduelle en CO₂ et en impuretés, la blancheur, la réactivité et la teneur en soufre, etc. ;
- les émissions – le combustible affecte les niveaux d'émissions de dioxyde et monoxyde de carbone, de fumée, de poussière, de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote, tous ayant un impact sur l'environnement ;
- économies d'énergie primaire – fioul et gaz naturel.

Pour trouver une comparaison des différents combustibles en fonction de leurs coûts spécifiques et de leur teneur en soufre, se reporter à la Figure 3.13 du chapitre DBM de ce document (Cf. Section 3.4.5).

Le combustible est préparé en fonction du système d'injection (chauffé, pulvérisé), qui peut être à cuisson directe ou indirecte. L'utilisation de combustibles solides implique une livraison à la taille de particule appropriée au système de manutention installé. En cas de combustibles liquides et gazeux, la pression requise et la température (appropriée) doivent être maintenues.

Le charbon est souvent broyé dans des équipements spécialisés et stocké en silo. Il est nécessaire de prévoir les problèmes de sécurité, comme les risques d'explosion de poussières de charbon, notamment en utilisant des silos capables de résister à des chocs de pression jusqu'à 10 bar et des gaz inertes. Le lignite, le charbon et la sciure de bois doivent être entreposés de façon à éviter tout risque d'auto-inflammation.

A titre d'exemple, les Figures 2.10 et 2.11 présentent le principe du système de dosage pour un four vertical.

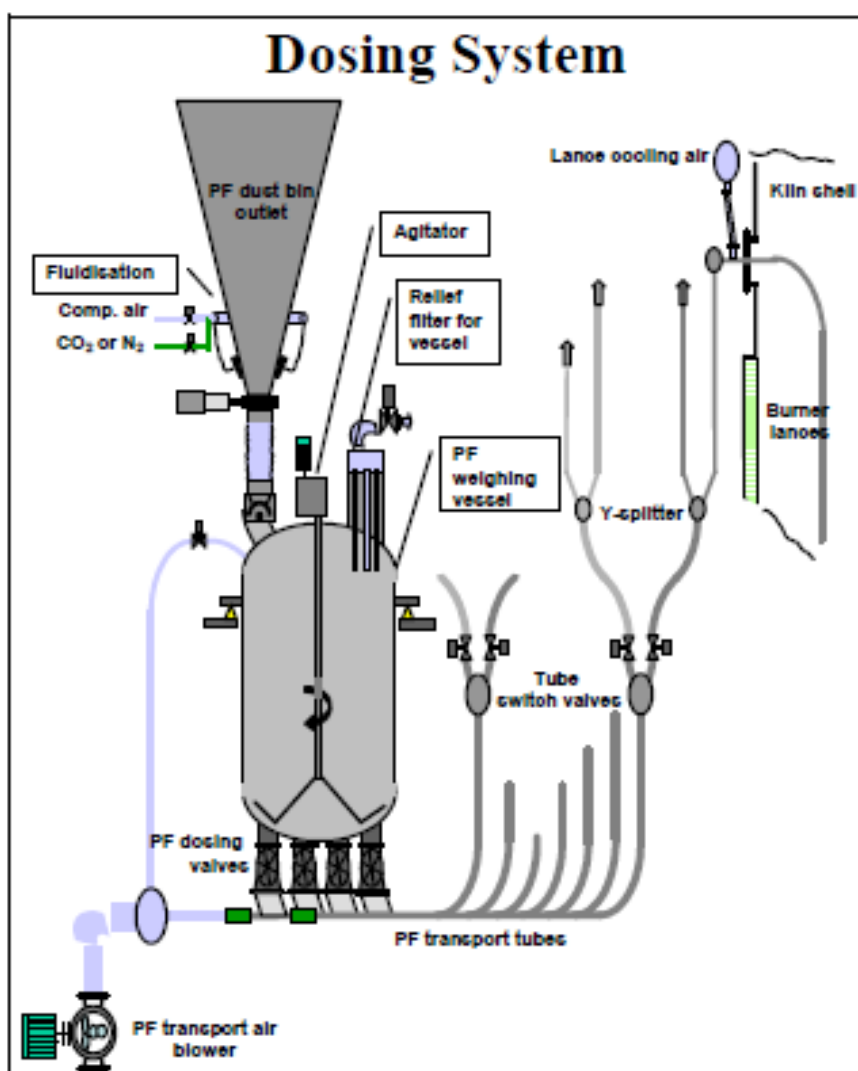


Figure 2.10 : Schéma de principe d'un exemple de système de dosage pour four vertical [44, EuLA, 2006]



Figure 2.11 : Exemple de système de dosage pour four vertical
[44, EuLA, 2006]

2.2.5 Utilisation des déchets

2.2.5.1 Généralités

La fabrication de la chaux exige un apport significatif d'énergie et le combustible constitue donc le coût de production le plus important. L'utilisation de déchets combustibles permet au producteur de chaux de réduire sa consommation de combustibles fossiles comme le gaz et les combustibles liquides, et contribue à la viabilité économique du secteur de la chaux en Europe. Depuis 1997, l'utilisation des déchets combustibles et de la biomasse augmente dans l'industrie européenne de la chaux mais la qualité de ces combustibles joue un rôle important dans la fabrication des produits de chaux. Par ailleurs, le recours à ces déchets a une incidence sur la qualité de la chaux et peut, par exemple, en limiter les usages. Quoiqu'il en soit, l'emploi de déchets combustibles présente également un intérêt économique du point de vue des frais de transport et du coût unitaire de ces combustibles.

Dans l'UE, les Etats membres soumettent l'utilisation des déchets combustibles à des exigences réglementaires assez différentes qui portent sur les caractéristiques des déchets et sur un certain nombre de substances présentes dans ceux-ci. La France, l'Allemagne et le Royaume Uni ont établi des listes de spécifications et de seuils qui peuvent varier d'une région à une autre. De plus, en ce qui concerne les métaux, les autorités nationales ou régionales définissent des seuils différents avec des totaux différents.

Comme pour tout combustible de substitution et en raison des critères spécifiques du produit et de la nature des procédés de production, les propriétés physiques spécifiques des déchets combustibles (état physique, valeur calorifique nette, composition chimique, etc.) doivent être prises en compte et très précisément définies.

Les déchets à haute valeur calorifique comme certaines fractions prétraitées des déchets, peuvent remplacer le combustible primaire dans les fours à chaux. Il est par conséquent essentiel de disposer de déchets de qualité constante, autrement dit qui présentent, entre autres, une valeur calorifique suffisante, une réactivité élevée, une faible teneur en humidité, en métaux, en chlore et en cendre. Enfin, les déchets utilisés comme combustibles doivent être adaptés aux brûleurs (brûleurs à plusieurs canaux).

Le choix des déchets combustibles appropriés dépend également des qualités de produit que l'on souhaite obtenir et de la possibilité technique de les injecter dans le four sélectionné. Leur utilisation est principalement limitée par :

- des propriétés physiques et chimiques qui ne répondent pas toujours aux exigences physiques, chimiques ou propres au procédé. C'est ainsi qu'il est impossible de brûler des combustibles solides en morceaux dans les fours verticaux à cycles alternés (PFRK) ;
- la disponibilité sur le marché.

Les déchets utilisés comme combustibles doivent être disponibles en quantités suffisantes. Ces combustibles ne sont pas préparés dans les usines à chaux. Normalement, des installations spéciales de gestion des déchets préparent différents types de déchets combustibles ou de déchets à fortes fractions calorifiques séparables pour qu'ils puissent être directement brûlés dans les fours à chaux sans traitement supplémentaire sur le site de production. L'une des exceptions est le filtrage des combustibles liquides qui permet d'éviter que des particules de gros diamètre viennent encrasser les vannes de contrôle ou les brûleurs.

Le choix des combustibles (fossiles ou sous forme de déchets) doit également tenir compte des critères de qualité des produits, ce qui dépend fortement des conditions propres au site. C'est pour cela que seul un nombre limité de déchets combustibles sont acceptables pour la production de chaux.

Ces déchets combustibles représentent près de 4 % de toute l'énergie consommée par l'industrie européenne de la chaux. En fait, en 2005, l'utilisation des déchets était réalisée par sept pays dont la République tchèque, le Danemark, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Suède et le Royaume Uni, comme le montre la Figure 2.12.

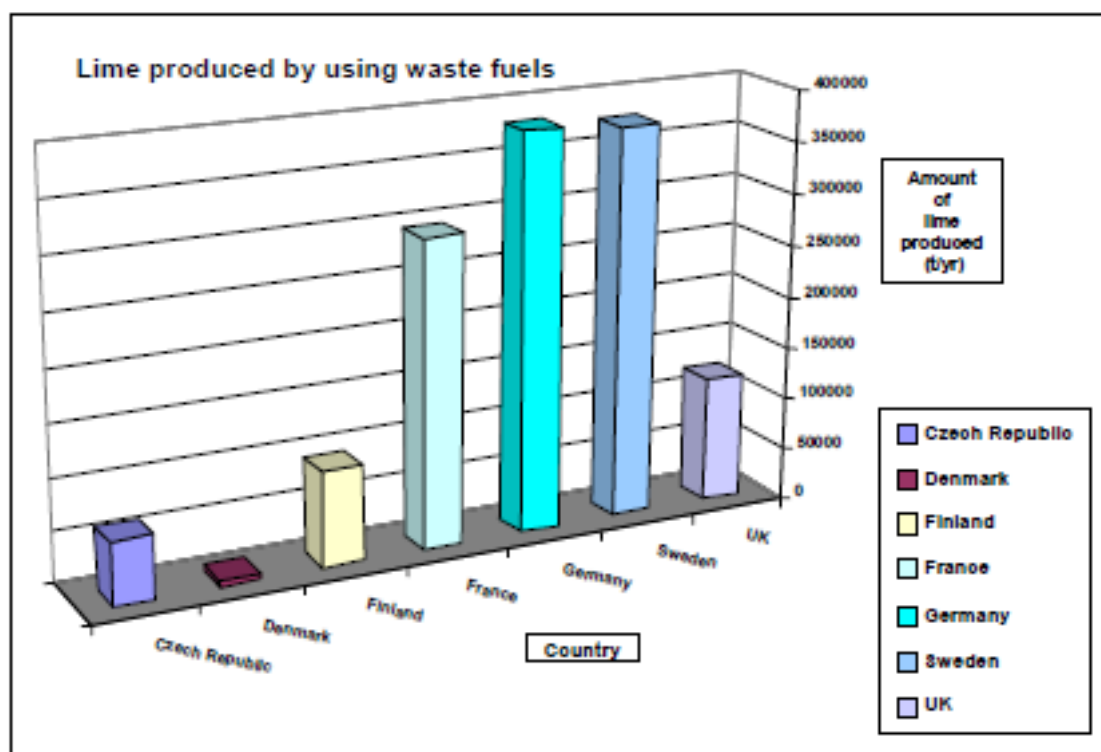


Figure 2.12 : Quantité de chaux produite à l'aide de déchets combustibles dans différents pays européens

[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

Pour des informations utiles sur le traitement des déchets, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les industries de traitement des déchets [48, Commission européenne, 2005].

Pour d'autres informations sur l'incinération des déchets, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles en matière d'incinération des déchets [87, Commission européenne, 2001]. La Directive Incinération des déchets 2000/76/CE [59, Commission européenne, 2000] fournit également d'autres informations.

2.2.5.2 Considérations techniques

L'utilisation de déchets en tant que combustibles ne modifie pas fondamentalement le procédé de fabrication de la chaux. Les fours à chaux peuvent fonctionner avec des taux de substitution très différents, depuis les niveaux faibles où les déchets ne représentent qu'un petit pourcentage de l'énergie totale jusqu'à une substitution intégrale.

Les déchets peuvent être utilisés dans les fours rotatifs (RK), les fours verticaux annulaires (ASK), les fours verticaux à cycles alternés (PFRK) ou dans les autres fours verticaux (OSK). Le choix du type de four dépend des critères de qualité et des capacités de production. La Figure 2.13 montre le nombre et le type de fours qui brûlent des déchets combustibles dans les différents pays d'Europe. Pour d'autres informations sur les différents types de fours utilisés dans l'industrie de la chaux, se reporter à la Section 2.2.7 de ce document.

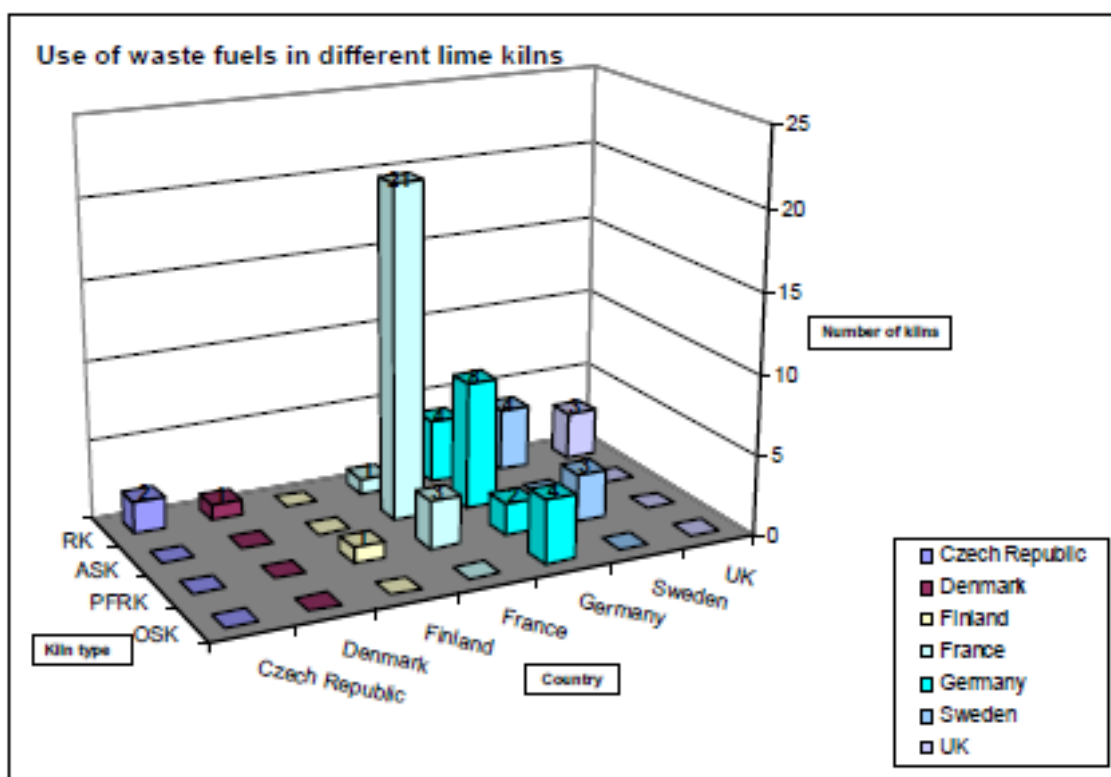


Figure 2.13 : Répartition des fours à chaux utilisant des déchets combustibles dans différents pays européens

[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

Pour brûler des déchets combustibles dans les fours mentionnés plus haut – sauf en ce qui concerne les fours verticaux à flux alternés (PFRK) – il est nécessaire d'installer des brûleurs spéciaux soit pour les combustibles gazeux, soit pour les combustibles liquides. Ces fours sont équipés de lances spécifiquement conçues pour la combustion des combustibles gazeux, liquides et solides.

Dans les fours rotatifs (RK), il est également possible d'utiliser ce que l'on appelle des brûleurs multicanaux qui permettent de brûler différents combustibles (gazeux, solides et liquides) comme le montrent les Figure 2.14 et 2.15.



Figure 2.14 : Vue de face d'un brûleur multicanaux dans un four rotatif (RK)
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

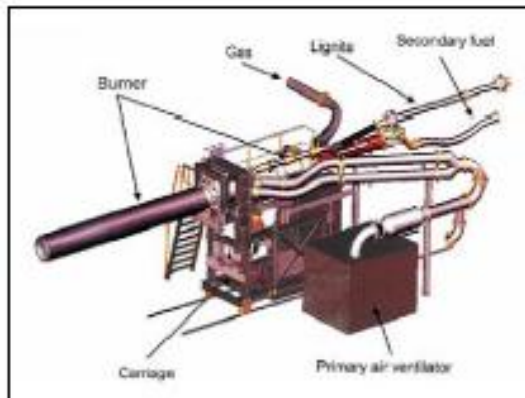


Figure 2.15 : Schéma d'un brûleur dans un four rotatif RK
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

2.2.5.3 Types de déchets combustibles utilisés

La disponibilité sur les marchés est en grande partie responsable des différences constatées dans les types de déchets combustibles utilisés dans différents pays européens comme le montre le Tableau 2.12.

Pays	Types de déchets combustibles		
	Liquide	Solide - pulvérisé	Solide – en morceaux
République tchèque	x		x
Danemark		x	
Finlande	x		
France	x	x	x
Allemagne	x	x	x
Suède	x		x
Royaume - Uni	x		

Tableau 2.12 : Types de déchets combustibles utilisés dans différents pays européens
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

Les déchets combustibles liquides et solides comprennent les composés suivants et peuvent alimenter différents types de fours comme le montrent les Tableaux 2.13 et 2.14.

Déchets combustibles liquides	Déchets combustibles solides
Huiles usagées	Combustibles dérivés de solides
Combustibles dérivés de solvants et de liquides	Matières plastiques (sauf PVC)
Graisses animales	Déchets de bois
	Pneumatiques
	Farines de viandes et d'os

Tableau 2.13 : Composantes des déchets combustibles liquides et solides
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

Types de four	Types de déchets combustibles		
	Liquide	Solide - pulvérisé	Solide – en morceaux
Four long rotatif (LRK)	x	x	x
Four rotatif avec préchauffeur (PRK)		x	x
Four vertical à cycles alternés (PFRK)	x	x	
Four vertical annulaire (ASK)	x	x	x
Autres fours (OK)	x	x	

Tableau 2.14 : Déchets combustibles utilisés dans différents types de four
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

Les déchets combustibles liquides peuvent être utilisés dans les fours rotatifs (LRK, PRK), les fours verticaux annulaires (ASK), les fours verticaux à flux alternés (PFRK) et les types spéciaux d'autres fours (OK) comme les fours verticaux normaux avec brûleur latéral et les fours à double chambre inclinée. Lorsqu'ils sont pulvérisés, les combustibles solides peuvent être utilisés dans tous les types de fours susmentionnés. Les combustibles solides en petits morceaux ne sont utilisables que dans les fours rotatifs (LRK, PRK) et les fours verticaux annulaires. L'utilisation de déchets en tant que combustible permet de ne produire aucun déchet, ni solide, ni liquide.

Les techniques utilisées par les fournisseurs pour préparer et mélanger certaines qualités de déchets combustibles dépendent des caractéristiques des matières entrantes et des exigences des utilisateurs. Les déchets solides non dangereux des types suivants sont traités (tri, broyage, conversion en granules) dans les installations de traitement des déchets à l'intention de l'industrie de la chaux :

- déchets d'origine unique à forte valeur calorifique comme des pneumatiques, les farines animales, etc. ;
- mélange de différents déchets d'origine unique (déchets textiles ou plastiques de certaines productions) ;
- fractions à forte valeur calorifique extraites de déchets municipaux en mélange, déchets commerciaux en mélange ou de déchets de construction et de démolition en mélange.

Les déchets combustibles liquides sont préparés en mélangeant différents déchets comme des huiles ou des solvants usagés de valeur calorifique convenable dans des installations spéciales de gestion des déchets. Normalement, un simple prétraitement suffit (élimination des fonds, des sédiments et de l'eau). Dans certain cas, comme celui des huiles ou des émulsions d'usinage, des procédés chimiques sont nécessaires pour éliminer les polluants métalliques et les additifs.

Pour des informations utiles sur le traitement des déchets, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les industries de traitement des déchets [48, Commission européenne, 2005].

Les déchets combustibles liquides peuvent être dangereux, ce qui doit être pris en compte pour leur manutention (stockage, alimentation des fours, etc.). La récupération de la vapeur permet alors d'éviter les émissions de composés organiques. Les systèmes de récupération de la vapeur sont exploités pour que le flux de substances organiques ne puisse circuler qu'une fois ces systèmes connectés. En fonctionnement normal, le système de récupération de la vapeur et les installations connectées ne libèrent aucun gaz dans l'atmosphère à l'exception des rejets nécessaires pour des raisons de sécurité.

La Section 4.3 (Fabrication de la chaux) décrit un exemple de manutention et d'utilisation d'huiles usagées dans le procédé de chauffage.

Il convient de noter que, en raison de leur viscosité, les graisses animales se solidifient à des températures d'environ 40 °C et sont susceptibles d'obstruer les canalisations et les raccords. Il est

donc nécessaire de manipuler les graisses animales à des températures supérieures à 40 °C, par exemple en utilisant un système de chauffage supplémentaire [50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006].

2.2.5.4 Contrôle qualité des déchets combustibles solides

En raison des critères spécifiques du produit et la nature des procédés de production, les déchets combustibles doivent présenter des propriétés physiques très précises. En ce qui concerne la fabrication de la chaux, seuls les déchets qui possèdent les caractéristiques correspondant à l'usage spécifique attendu peuvent être utilisés.

Les déchets à forte valeur calorifique peuvent remplacer les combustibles primaires dans les fours à chaux et il est par conséquent essentiel de disposer de déchets de qualité constante, autrement dit, entre autres, une valeur calorifique suffisante, une faible teneur en humidité, en métaux, en chlore et en cendre. De plus, les déchets doivent être adaptés aux brûleurs. Les combustibles de ce type sont préparés dans des installations spéciales de traitement des déchets.

Avant leur préparation par le fournisseur, les déchets doivent être contrôlés et analysés afin de déterminer différentes caractéristiques de qualité – valeur calorifique suffisante, faible teneur en humidité et en polluants comme le soufre, le chlore et les métaux, etc. – en raison d'une possible pollution de la chaux également. Le Tableau 4.30 de la Section 4.3.2.2 présente des exemples de teneurs usuelles en polluants autorisées dans les huiles usées et les graisses animales utilisées dans la fabrication de la chaux. Les déchets combustibles peuvent se présenter sous différentes formes, comme des granules. De plus, avant leur utilisation dans le four, les déchets préparés et livrés font également l'objet d'une analyse qui nécessite un équipement de laboratoire spécial. La Section 4.3.4 donne un exemple de contrôle qualité des déchets combustibles solides brûlés dans les fours rotatifs [50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006].

Afin de garantir les caractéristiques des déchets combustibles, un système d'assurance qualité doit être mis en place et comprendre notamment des dispositions pour l'échantillonnage, la préparation des échantillons, l'analyse et la surveillance externe. Pour d'autres informations utiles, se reporter aux spécifications techniques du Comité européen de normalisation Standardisation comme CEN/TC 343 'Combustibles solides de récupération'.

L'origine et la classification des déchets doivent être précisées conformément au Catalogue européen des déchets (CED) [49, Commission européenne, 2000] qui établit une nomenclature des déchets et les catégorise en fonction de leur lieu de production et de leurs caractéristiques. Le CED est mentionné dans plusieurs Directives communautaires et Décisions de la Commission en matière de gestion des déchets.

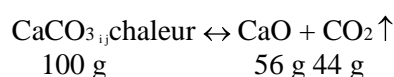
Le fournisseur des déchets doit classer les déchets et garantir que les combustibles prêts à l'emploi possèdent les caractéristiques spécifiées pour la fabrication de la chaux dans différents fours.

Se reporter à la Section 4.3.4 pour trouver un exemple de contrôle qualité ainsi que des explications sur la classification des déchets [44, EuLA, 2006], [46, Allemagne, 2006]

2.2.6 Production de chaux vive et de dolomie

2.2.6.1 Calcination du calcaire – réaction chimique

La chaux est le résultat de la cuisson de carbonates de calcium ou de magnésium ou des deux, à des températures comprises entre 900 et 1 200 °C. Il est également possible de soumettre ces roches à des températures pouvant atteindre 1 800 °C, par exemple pour la clinkérisation (dolomie surcuite). Ces températures sont suffisamment élevées pour permettre la libération du dioxyde de carbone et obtenir l'oxyde dérivé. Cette réaction chimique de la décomposition thermique du carbonate de calcium est souvent appelée « calcination » et s'exprime de la manière suivante :



Ainsi, le processus dépend de la température de cuisson, qui doit au moins dépasser les 800 °C pour permettre la décarbonatation, et d'un temps de séjour suffisant. Cela signifie que la chaux ou le calcaire doit être maintenu pendant une durée suffisamment longue à des températures comprises entre 1000 et 1200 °C afin de contrôler sa réactivité.

La réactivité de la chaux vive est une mesure de la vitesse à laquelle la chaux vive réagit en présence d'eau. La norme européenne EN 45 9-2 décrit la méthode de test utilisée pour mesurer la réactivité de la chaux broyée par extinction avec de l'eau. Pour mesurer la réactivité de la chaux en morceaux, l'industrie a recours à d'autres méthodes, comme le test Wuhler [44, EuLA, 2006].

La réactivité de la chaux dépend de différents paramètres liés aux matières premières et au procédé employés. Ces paramètres sont :

- la température et la durée de cuisson,
- la structure cristalline du calcaire,
- les impuretés présentes dans le calcaire,
- le type de four et de combustible.

La classification de la chaux s'effectue souvent en fonction de sa réactivité, et notamment avec les termes suivants :

- surcuite,
- dure,
- moyenne,
- douce.

La méthode standard européenne pour évaluer la réactivité de la chaux consiste à mesurer une durée appelée « t60 » c'est-à-dire le temps qu'il faut à un mélange de chaux et d'eau pour passer de 20 à 60 °C dans des conditions normalisées. En pratique, plus ce « t60 » est élevé, plus la réactivité de la chaux produite est faible. Il n'existe toutefois aucune norme pour définir la qualité du produit (douce, moyenne ou dure) car les seuils ne sont pas clairement déterminés. La Figure 2.16 montre l'évolution de la réactivité (t60) en fonction de la température de cuisson ainsi que de la nature du calcaire.

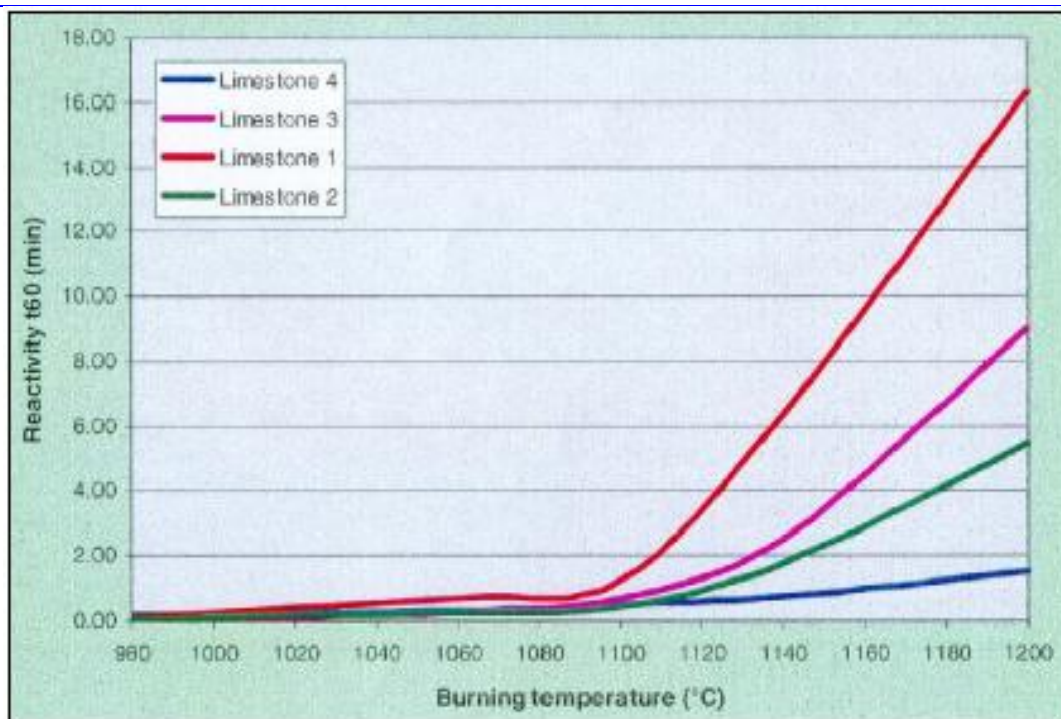


Figure 216 : Evolution de la réactivité en fonction de la température de cuisson et du type de calcaire [44, EuLA, 2006]

Lorsque sa réactivité est faible, la chaux est souvent qualifiée de moyenne, dure et surcuite. La baisse de réactivité s'accompagne d'une réduction de la surface et de la porosité de la chaux, un phénomène appelé frittage.

Chaque type de chaux possède sa réactivité propre qui, à son tour, dépend des exigences de l'application et du procédé spécifique. Comme nous l'avons dit plus haut, les propriétés de la chaux dépendent également du matériau calcaire d'origine, du type de four et du combustible utilisé. Par exemple, les fours verticaux à coke produisent généralement une chaux vive de réactivité moyenne à faible, tandis que les fours régénératifs à cycles chauffés au gaz produisent le plus souvent une chaux très réactive. La chimie et la réactivité de la chaux sont les principaux paramètres qui gouvernent le marché.

La Figure 2.17 présente les différences de morphologie (forme des particules) et de surface de la chaux douce et de la chaux dure (micrographie à balayage électronique (MBE, grossissement : MBEx5000)).

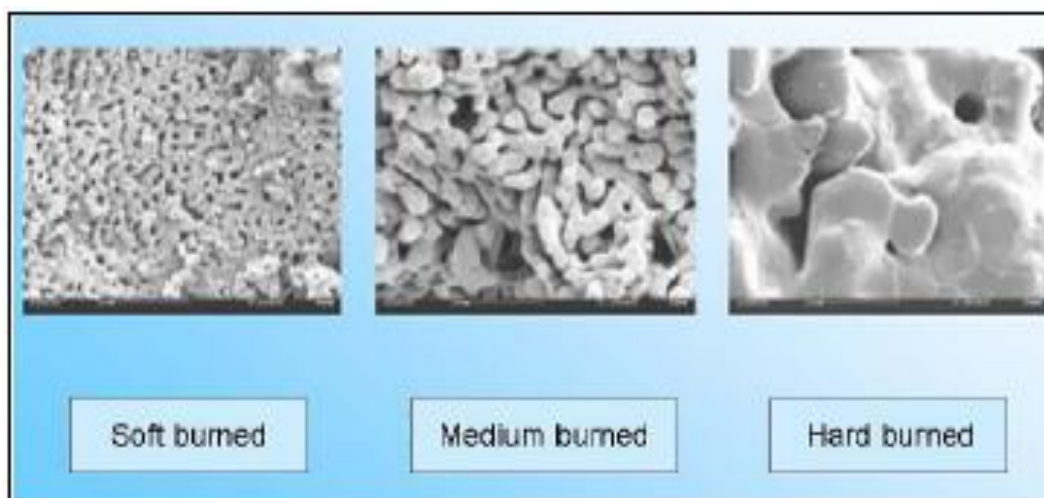
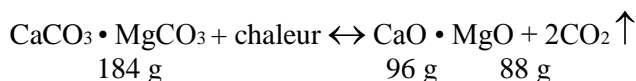
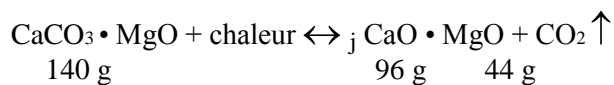
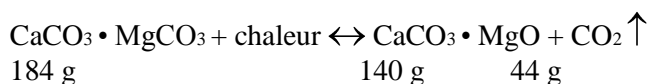


Figure 2,17 : Morphologie de la chaux douce, moyenne et dure
[44, EuLA, 2006], [168, GTT CLM, 2007]

La décomposition des dolomies et des calcaires dolomitiques ou avec magnésium est beaucoup plus complexe. Elle peut se produire en une étape unique, en deux étapes discrètes et parfois en plusieurs étapes intermédiaires [44, EuLA, 2006] :



La température requise pour la décomposition des dolomies et du calcaire dolomitique avec magnésium se situe généralement entre 500 et 750 °C.

2.2.6.2 Calcination du calcaire dans le four

Le passage du calcaire (que celui-ci présente ou non une teneur importante en carbonate de magnésium) dans le four peut être divisé en trois étapes ou zones d'échange thermique qui sont illustrées par la Figure 2.18 et décrites ci-après :

1. *zone de préchauffage* – le calcaire est chauffé, de la température ambiante à plus de 800 °C, par contact direct avec les gaz quittant la zone de calcination composés principalement de produits de la combustion, excès d'air et CO₂ résultant de la calcination ;
2. *zone de cuisson ou de calcination* – le combustible est brûlé dans un air préchauffé provenant de la zone de refroidissement et, selon la conception, dans un complément d'air « comburant » ajouté au combustible. Dans cette zone, on atteint des températures supérieures à 900 °C. De 800 à 900 °C, la surface du calcaire commence à se décomposer. A des températures supérieures à celle de la décomposition du calcaire, soit 900 °C, la décomposition intervient en-dessous de la surface des pierres. A 900 °C, ces pierres quittent la zone de calcination et se retrouvent parfois en tant que calcaire résiduel qui demeure piégé à l'intérieur. Si les pierres sont intégralement décomposées et demeurent dans la zone de calcination, le phénomène de frittage intervient ;
3. *zone de refroidissement* – en sortie de la zone de calcination, la chaux vive à 900 °C est refroidie par contact direct avec l'air « de refroidissement », soit tout ou partie de l'air comburant qui, lui, est préchauffé. La chaux quitte cette zone à des températures inférieures à 100 °C.

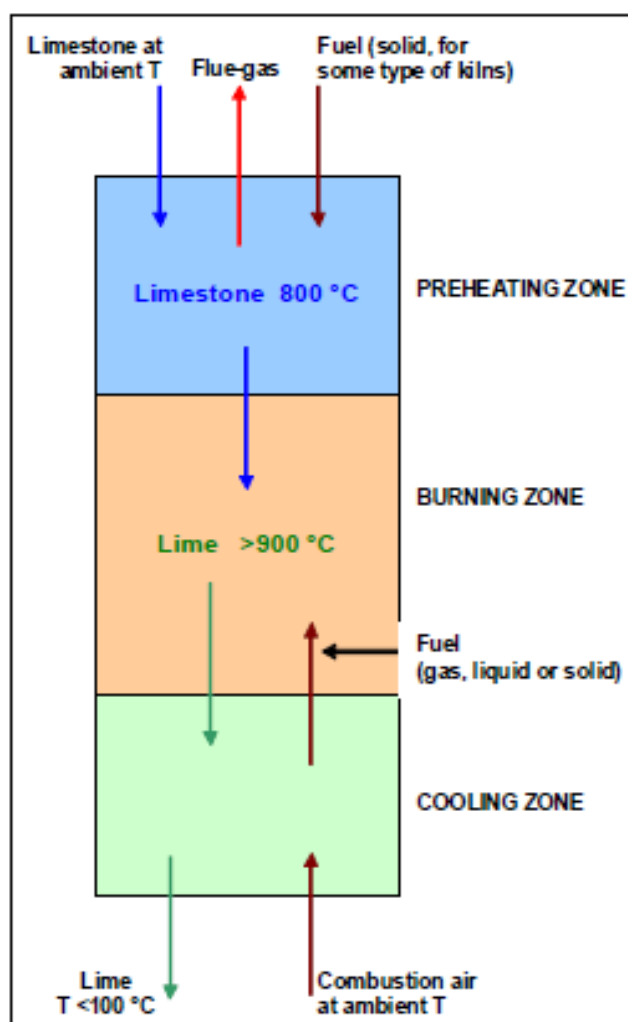


Figure 2.18 : Principes généraux de calcination de la chaux
[44, EuLA, 2006]

Le temps de séjour du calcaire/chaux dans le four, varie dépendant du type de four et de produit final souhaité. Cette période peut s'étaler de six heures à deux jours.

La chaux vive est souvent qualifiée de légère ou douce, moyenne ou dure en fonction de son degré de calcination. Le degré de réactivité à l'eau décroît à mesure que le niveau de porosité augmente.

Le taux de décomposition du calcaire dans le four dépend par conséquent de plusieurs facteurs inhérents aux particules de calcaire elles-mêmes, autrement dit de leur morphologie et de leur composition, ainsi que des conditions du procédé. Les principales variables sont les suivantes :

- les caractéristiques chimiques du calcaire,
- la taille et la forme des particules,
- le profil de température de la zone de calcination,
- le taux des échanges de chaleur entre les gaz et les particules.

Les fours utilisés sont, pour la plupart, de type vertical ou rotatif. Il existe quelques autres conceptions s'appuyant sur des principes différents ; toutes suivent le concept des trois zones. Tandis que les fours verticaux intègrent généralement une zone de préchauffage, certains fours à chaux, à savoir les fours rotatifs, fonctionnent parfois en combinaison avec des préchauffeurs séparés. On utilise deux grands types de préchauffeurs : les préchauffeurs verticaux et les préchauffeurs à grilles mobiles.

La plupart des systèmes de four se caractérisent par la progression à contre-courant des solides et des gaz, ce qui agit sur les émissions résultantes de polluants.

2.2.6.3 Traitement de la chaux vive

La fabrication de la chaux vive en sortie de four a pour but de produire un certain nombre de catégories avec les granulométries et qualités de particules demandées par les différents segments de marché. On utilise plusieurs procédés, dont le criblage, le concassage, la pulvérisation, le broyage, le tri pneumatique et le transport. Une usine de traitement de la chaux bien conçue atteint plusieurs objectifs :

- maximiser la production des principaux produits,
- minimiser la production de classes en excédent (généralement, les fines),
- améliorer la qualité de certains produits,
- assurer une souplesse permettant de moduler la production des produits en fonction des évolutions de la demande sur le marché.

L'usine de traitement devrait intégrer une capacité de stockage adéquate, à la fois pour les produits et les matériaux intermédiaires, afin d'assurer un tampon entre le four, dont l'utilisation est optimisée par un fonctionnement en continu, et les expéditions qui ont tendance à être moins importantes pendant la nuit et les week-ends.

La chaux vive en sortie de four est souvent tamisée à environ mm. Si elle présente une granulométrie maximum excessive de, par exemple, 45 mm, son calibre est réduit moyennant une génération minime de fines. Pour ce faire, on utilise souvent des concasseurs à mâchoires et à rouleaux. La chaux vive en sortie de four concassée est ensuite chargée dans un crible à plusieurs

étages, qui produit une fraction de fines secondaires (par exemple, inférieures à 5 mm) et des fractions granulaires, ou « pierres », de chaux (5 à 15 mm et 15 à 45 mm, par exemple).

Les produits sont stockés dans des silos à partir desquels ils seront soit distribués directement, soit transférés vers une autre installation pour broyage ou hydratation.

2.2.6.3.1 Production de chaux vive broyée

La demande portant sur différentes classes et qualités de chaux vive broyée s'est nettement amplifiée depuis les années 1950. La granulométrie exigée varie de produits relativement grossiers employés pour la stabilisation du sol jusqu'à des produits en grains très fins destinés à des applications spécialisées.

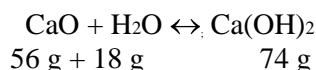
Les produits les plus gros sont produits à des coûts relativement faibles, en un seul passage dans un batteur-broyeur équipé d'une benne intégrée. Les produits plus fins sont généralement produits dans des broyeurs à boulets et des broyeurs verticaux à rouleaux. La plupart des installations de broyage utilisent des systèmes de classification pneumatique.

2.2.6.4 Production de chaux éteinte et/ou hydratée

La chaux éteinte désigne la chaux hydratée (poudre sèche d'hydroxyde de calcium), le lait de chaux et la chaux en pâte (dispersions de particules d'hydroxyde de calcium dans l'eau).

2.2.6.4.1 Production de chaux hydratée

L'hydratation de la chaux consiste à ajouter de l'eau à l'oxyde de calcium dans un hydrateur. La quantité d'eau ajoutée équivaut approximativement au double du volume stœchiométrique requis pour la réaction d'hydratation, l'excès d'eau visant à abaisser la température générée par la chaleur de la réaction par évaporation comme le montre l'équation suivante.



Il existe un grand nombre de types différents d'hydrateurs mais le procédé par lui-même peut en principe être décrit comme le montre la Figure 2.19. L'hydrateur se compose, par exemple, de pales rotatives qui agitent vigoureusement la chaux en présence d'eau. Il se produit alors une forte réaction exothermique qui génère 1,14 MJ par kilogramme d'oxyde de calcium. Le procédé d'hydratation est régulé de manière à obtenir au final une poudre sèche. Après hydratation, le produit est transféré à un séparateur. Tout ou partie de la part la plus grosse peut être stockée, broyée ou recyclée. Les produits sont entreposés en silo.

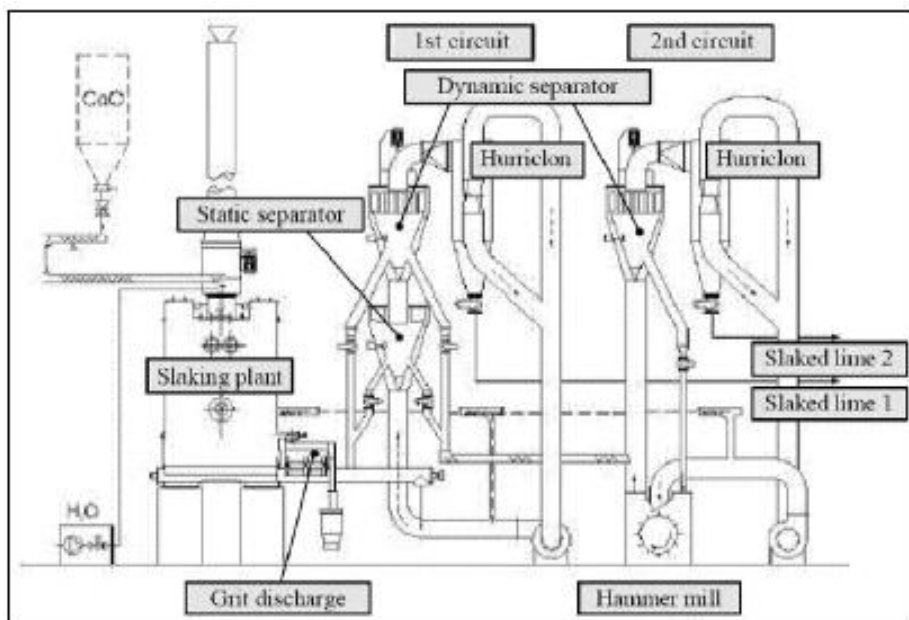


Figure 2,19 : Schéma de principe d'un hydrateur à chaux
[16, EuLA, 2001], [168, GTT CLM, 2007]

Certaines stations d'hydratation améliorent la qualité de la chaux hydratée en éliminant une qualité inférieure composée d'éléments plus gros, riches en carbonates. Ces qualités inférieures de matériau sont, dans la mesure du possible, incorporées dans des produits particuliers, sinon elles sont rejetées dans des décharges.

2.2.6.4.2 Production de lait de chaux et de chaux en pâte

On produit le lait de chaux et la chaux en pâte par extinction de la chaux avec un excès d'eau. L'opération est réalisée dans des unités d'extinction fonctionnant par lot ou en continu. L'expression « lait de chaux » décrit une suspension fluide de chaux éteinte dans l'eau. Les laits de chaux peuvent contenir jusqu'à 40 % de solides en masse. Un lait qui présente une teneur élevée en solides est parfois appelé une boue de chaux. La chaux en pâte est une dispersion épaisse de chaux éteinte dans l'eau. Les chaux en pâte contiennent normalement des solides à hauteur de 55 à 70 % en masse. La chaux en pâte est parfois utilisée pour décrire une pâte semi-fluide.

Dans de nombreuses applications – mortiers pour le bâtiment, réactifs chimiques, etc. – la chaux est utilisée en tant qu'hydroxyde, suspension aqueuse (boue liquide) ou pâte.

Pour des raisons pratiques, les utilisateurs de la chaux préfèrent travailler avec de la chaux hydratée en poudre qu'ils diluent dans l'eau, plutôt qu'avec de la chaux vive. Le procédé d'extinction est une manipulation délicate et exothermique qui nécessite des équipements spécifiques que les utilisateurs de la chaux préfèrent éviter. De plus, la chaux hydratée est parfois préférable à la chaux vive qui réagit immédiatement avec l'humidité. Enfin, le processus d'hydratation permet d'accroître la qualité du produit (rendement) en éliminant les particules grossières (CaCO_3) ainsi que les autres impuretés de dimensions importantes.

2.2.7 Types de fours à chaux – techniques et conception

Au fil des années, à travers le monde, il a été utilisé une grande diversité de techniques et de concepts de four. Bien qu'un nombre relativement limité de configurations ait prédominé parmi les ventes récentes de fours à chaux, il existe de multiples options parfaitement adaptées à des applications données. Les propriétés du calcaire (comme la résistance avant et après la calcination), le type de combustible disponible et la qualité du produit doivent être pris en considération dans le choix d'une technique de four. De nombreux producteurs de chaux travaillent avec deux ou plus de types de four, utilisant différentes granulométries de calcaire d'alimentation et produisant différentes qualités de chaux. Ils font ainsi un meilleur usage des ressources naturelles, ce qui est une bonne pratique environnementale.

Six grands types de fours sont utilisés pour la fabrication de la chaux. En général, les facteurs les plus importants dans le choix d'un four sont les suivants :

- la nature du gisement de minéral,
 - les caractéristiques, la disponibilité et la qualité du calcaire,
- la granulométrie des produits entrants,
 - les propriétés mécaniques de l'alimentation du four,
 - les fines,
- les applications clients concernant les propriétés de la chaux,
- la capacité du four,
- la disponibilité des combustibles (et notamment des déchets combustibles),

- les coûts (combustible, investissement et fonctionnement).
-

Le tableau 2.15 présente les productions courantes et la taille des pierres entrantes en fonction des différents types de fours. Les types de fours utilisés pour la fabrication de la chaux ont une durée de vie de 30 à 45 ans en général.

Type de four	Abréviation	Production (t/j)	Taille des pierres d'alim. (mm)
Four long rotatif	LRK	160 – 1500	2 – 60
Four rotatif avec préchauffeur	PRK	150 – 1500	10 – 60
Four vertical à cycles alternés	PFRK	100 – 600	10 – 200
Four vertical annulaire	ASK	80 – 300	10 – 150
Four vertical à alimentation mixte	MFSK	60 – 200	20 – 200
Autres fours	OK	10 – 200	20 – 250

Tableau 2.15 : Paramètres opérationnels pour les types de four à chaux
[16, EuLA, 2001], [44, EuLA, 2006]

Les propriétés physico-chimiques de la chaux sont liées, de manière inhérente, au type de four utilisé pour la calcination. D'autres paramètres peuvent influencer le choix du four, et notamment :

- le type et la disponibilité des combustibles,
- la capacité du four,
- les coûts d'investissement,
- les frais d'exploitation,
- l'impact environnemental.

Le Tableau 2.16 présente les types de fours généralement utilisés pour produire les types de chaux spécifiques demandés par le marché.

Réactivité	t60 ³⁾ < 3 min						t60 ³⁾ > 3 min					
	<20		20 – 60		>60		<20		20 – 60		>60	
Granulométrie du calcaire (mm)	M1)	L2)	M1)	L2)	M1)	L2)	M1)	L2)	M1)	L2)	M1)	L2)
Teneur de la chaux en soufre												
Four long rotatif (LRK)				+4)					o5)	+4)		
Four rotatif avec préchauffeur (PRK)				+4)			+4)			+4)		
Four vertical à cycles alternés (PFRK)	+4)		+4)		o5)							
Four vertical annulaire (ASK)			+4)								+4)	
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)											o5)	
Autres fours (OK)	+4)		+4)		+4)		+4)			+4)		
1) M=moyenne : >0,05 % 2) L=Faible : <0,05 % 3) t60 = réactivité de la chaux qui indique le temps nécessaire pour que la chaux passe de 20 à 60 °C en présence d'eau 4) Le plus fréquemment utilisé 5) Dans certaines conditions												

Tableau 2.16 : Relation entre les fours et le type de chaux généralement produit dans ces fours
[44, EuLA, 2006]

Le Tableau 2.17 montre les différentes propriétés du produit comme la réactivité pour différents secteurs de marché ou groupes de consommateurs. La chimie et la réactivité de la chaux sont les principaux paramètres qui gouvernent le marché.

Groupe de consommateurs		Pourcentage de production (%) en 2003 (ILA) ¹⁾	Propriétés du produit chaux				
			Réactivité		Chimie		Teneur en soufre
			t60 ²⁾ < 3 min ³⁾	t60 ²⁾ > 3 min ³⁾	Très pure	CL 70 – 80 ⁴⁾	
I.	Industrie						
	1. Sidérurgie	39	x		x		x
	2. Non-ferreux	3					x
	3. Chimique	10	x		x		x
	4. Autres (papier, etc.)	6					x
II.	Matériaux de construction (industrie) ⁶⁾	3		x		x	
III.	Matériaux de construction (négoce) ⁶⁾	17		x		x	
IV.	Protection de l'environnement ⁶⁾	16					
	1. Traitement des gaz résiduels						x
	2. Eau potable						x
	3. Traitement des eaux usées						x
V.	Agriculture	2					
Groupe de consommateurs		Pourcentage de production (%) en 2003 (ILA) ¹⁾	Propriétés du produit chaux dolomitique				
			Réactivité		Chimie		Teneur en soufre
					Très pure	CL 70 – 80 ⁴⁾	
I.	Industrie de l'acier		x ⁵⁾				x
II.	Pas d'application pour la dolomie						
III.	Matériaux de construction		Moyennement calcinée			DL 80 DL 85 ⁵⁾	
IV.	Pas d'application pour la dolomie						
V.			Moyennement calcinée			DL 80 DL 85 ⁵⁾	
VI.	Pas d'application pour la dolomie						
VII.	Réfractaires		Fortement calcinée				x
1) International Lime Association : Association internationale de la chaux 2) t60 = réactivité de la chaux qui indique le temps nécessaire pour que la chaux passe de 20 à 60 °C en présence d'eau 3) Minutes 4) CL 70 – 80 = classification standard ○ CL 70 = chaux définie dans EN 459 « Chaux de construction » avec une teneur en CaO + MgO > 65 % ○ CL 80 = chaux définie dans EN 459 « Chaux de construction » avec une teneur en CaO + MgO > 75 % 5) DL 80, DL 85 = classification standard ○ DL 80 = dolime définie dans EN 459 'Chaux de construction' avec une teneur en CaO + MgO > 75 % ○ DL 85 = dolime définie dans EN 459 'Chaux de construction' avec une teneur en CaO + MgO > 80 % 6) 'Très pure' spécification utilisée au Royaume Uni							

Tableau 2.17 : Spécifications indicatives de la chaux par groupe de consommateurs
[44, EuLA, 2006]

Les fours verticaux représentent près de 90 % de tous les fours utilisés en Europe, soit un total d'environ 551 fours. Cette section décrit succinctement le fonctionnement d'un four vertical avec les différences observées dans les sous-catégories, à savoir :

- les fours verticaux à alimentation mixte (MFSK)
 - 116 fours dans l'UE des EU-27, la plupart d'entre eux en Europe centrale
- les fours verticaux à cycles alternés (PFRK)
 - 158 fours dans l'UE des 27
- les fours verticaux annulaires (ASK)
 - 74 fours dans l'UE des 27
- les autres fours (OK)
 - 203 fours dans l'UE des 27.

Les fours verticaux peuvent mesurer jusqu'à 30 mètres de hauteur et 6 mètres de diamètre. Dans ce type de four, le calcaire est amené par la partie haute du four et descend progressivement les différents étages jusqu'à ce qu'il soit déchargé dans la partie basse en tant que chaux. Les performances des fours verticaux traditionnels ont été limitées par la difficulté à obtenir une répartition uniforme de la chaleur dans les différentes sections ainsi qu'un déplacement uniforme du matériau dans les différents étages [44, EuLA, 2006].

2.2.7.1 Four vertical à alimentation mixte (MFSK)

Les fours verticaux à alimentation mixte utilisent du calcaire d'une granulométrie maximum comprise entre 20 et 200 mm et présentant un rapport de taille d'environ 2 sur 1. Le combustible est le plus souvent un coke dense à faible teneur en cendres. La taille du coke n'est que légèrement inférieure à celle des pierres, et celui-ci se déplace donc avec elles plutôt que de passer à travers les interstices. Les pierres et le coke sont mélangés et chargés afin que, dans la mesure du possible, ils ne soient pas séparés. L'anthracite est de plus en plus utilisé en raison du prix et de la disponibilité du coke de qualité métallurgique. La Figure 2.20 décrit le principe de fonctionnement d'un four vertical à alimentation mixte et la Figure 2.21 présente un exemple de ce type de four.

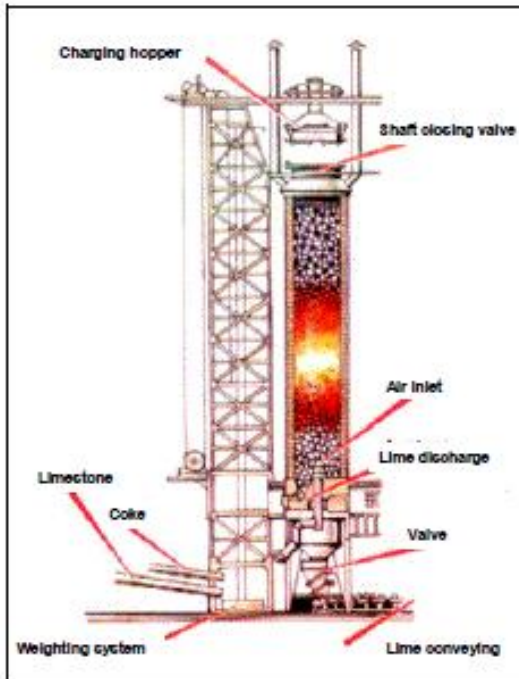


Figure 2.20 : Principe de fonctionnement d'un four vertical à alimentation mixte
[44, EuLA, 2006]



Figure 2.21 : Four vertical à alimentation mixte
[44, EuLA, 2006]

La qualité de la chaux vive est plutôt moyenne avec une réactivité nettement plus basse que lorsqu'elle est produite dans un four rotatif, avec un CaCO_3 de qualité comparable. La rétention du soufre provenant du combustible est importante. Les principales caractéristiques techniques sont présentées dans le Tableau 2.18.

Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	
Types d'alimentation en combustible	Combustible mélangé au calcaire
Production (tonnes/jour)	60 – 200
Consommation thermique (MJ/t de chaux)	3400 – 4700
Consommation énergétique / électrique (kWh/t de chaux)	5 – 15
Structure	Cuve verticale cylindrique ou rectangulaire avec revêtement réfractaire
Granulométrie du calcaire (mm)	20 – 200
Types de combustible	Coke ¹⁾ et anthracite en morceaux
Injection d'air comburant	Seulement air de refroidissement provenant du bas du four
Défournement de la chaux	Plaque rotative excentrique
Points importants	Exige un mélange uniforme de pierres et de combustible Exige une répartition régulière des pierres dans la section transversale Forte rétention par la chaux du soufre présent dans le combustible
Avantages	Inconditionnels Coûts de construction et frais d'entretien Bon équipement pour une chaux à faible réactivité Faibles besoins en électricité (ventilateurs) (voir le Tableau 2.23) Air de refroidissement utilisé comme air de combustion Faible excès d'air CO_2 élevé pour CCP ²⁾ , sucre et soude pour la production de chaux intégrée
Inconvénients	Difficulté à obtenir un mélange uniforme combustible – air entraînant des variations dans le rapport air-combustible Conditions du procédé entraînant des émissions de CO Exige de grosses pierres de calcaire, ce qui réduit la durée de vie du gisement Faible réaction à la modification des paramètres (24 heures) et donc inertie importante
1) Coke métallurgique 2) Carbonate de calcium précipité	

Table 2.18 : Principales caractéristiques techniques des fours verticaux à alimentation mixte

2.2.7.2 Four vertical à cycles alternés (PFRK)

La principale caractéristique du four vertical à cycles alternés standard est qu'il dispose de deux cuves cylindriques reliées entre elles, bien que certaines configurations anciennes possèdent trois cuves et d'autres, des cuves rectangulaires. Ces fours sont conçus pour des productions généralement comprises entre 100 et 600 tonnes par jour. Les Figures 2.22 et 2.24 montrent le principe de base et la circulation des gaz dans ce type de four et la Figure 2.23 en donne un exemple.

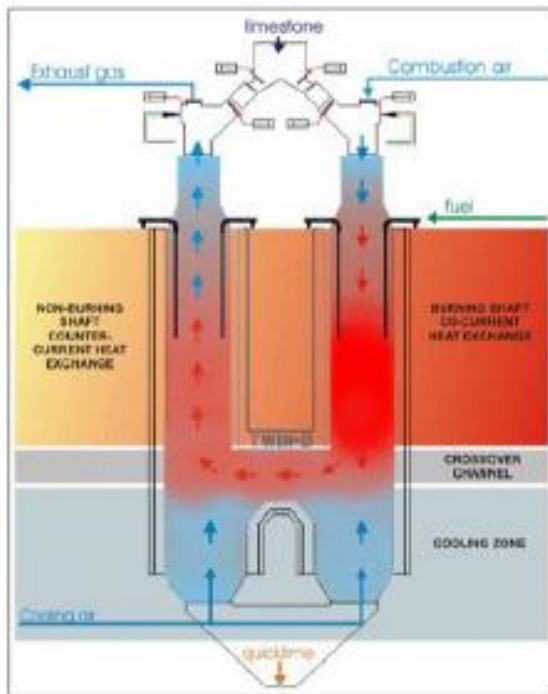


Figure 2.22 : Principes de fonctionnement d'un four vertical à cycles alternés
[44, EuLA, 2006]



Figure 2.23 : Exemple de four vertical à cycles alternés
[44, EuLA, 2006]

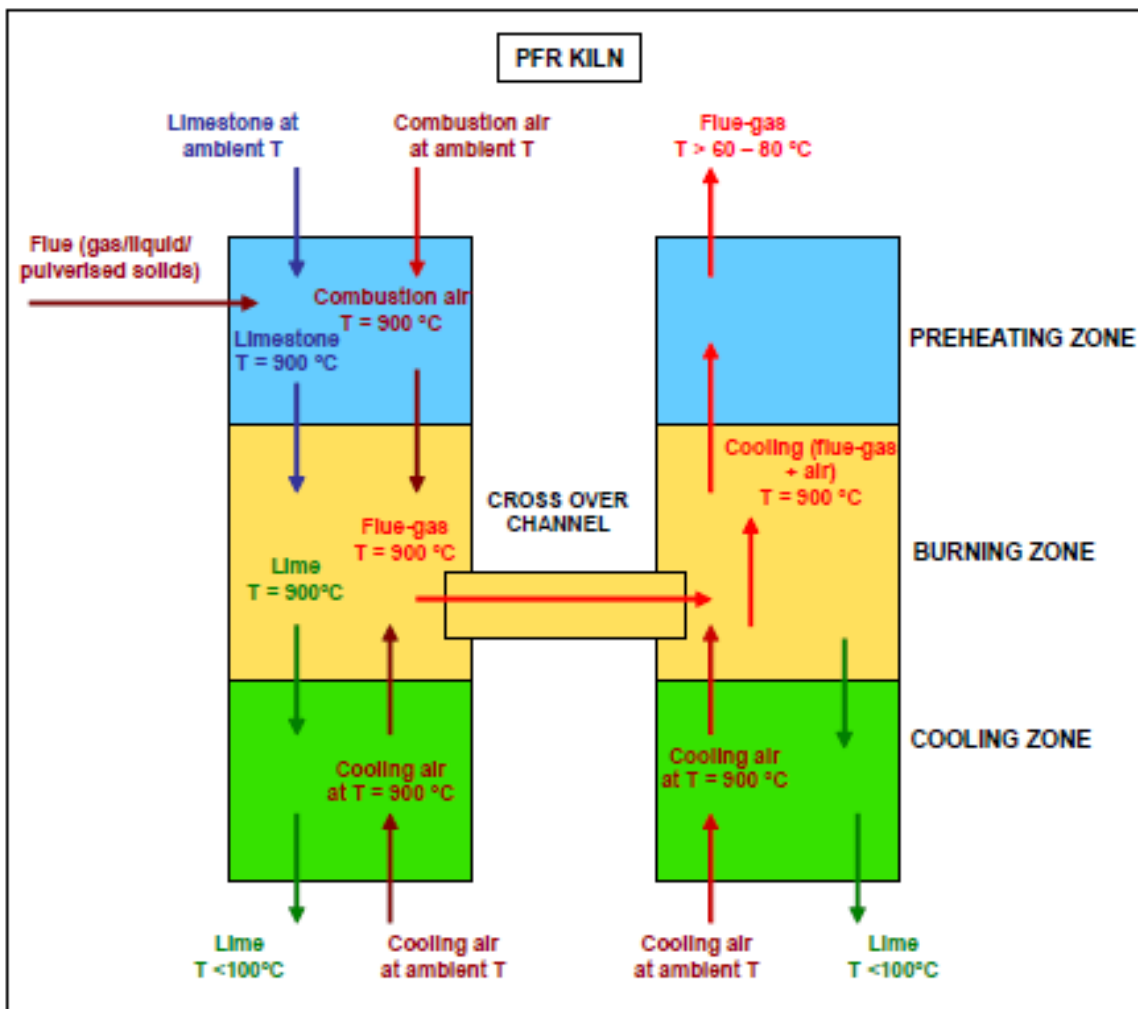


Figure 2.24 : Principe élémentaire de fonctionnement et circulation des gaz dans un four vertical à cycles alternés
 [44, EuLA, 2006]

La méthode de fonctionnement s'appuie sur deux principes fondamentaux :

- dans chacune des cuves, la zone de préchauffage agit comme un échangeur thermique par récupération, en plus de préchauffer les pierres à la température de calcination. L'excédent de chaleur contenu dans les gaz est transmis aux pierres dans l'autre cuve pendant la première phase du processus. Il est ensuite récupéré en passant des pierres à l'air comburant qui est préchauffé à près de 800 °C, ce qui explique que ce four offre une très faible consommation de chaleur spécifique ;
- la calcination de la chaux s'effectue à une température relativement modérée, le plus souvent aux alentours de 900 à 1 100 °C. Ces fours sont ainsi idéalement adaptés à la production de chaux à moyenne et à haute réactivité avec un faible niveau de CO₂ résiduel.

En pratique, des charges de calcaire sont alternativement chargées dans chaque cuve et s'écoulent à travers la zone de préchauffage, passant devant les lances à combustible pour atteindre la zone de calcination. De là, elles arrivent à la zone de refroidissement.

Le fonctionnement du four se décompose en deux périodes égales, d'une durée comprise entre 8 et 15 minutes à plein régime. Au cours de la première période, le combustible est injecté dans les lances de la première cuve et brûle dans l'air comburant insufflé par le haut. La chaleur dégagée est absorbée en partie par la calcination du calcaire dans cette première cuve. De l'air de refroidissement est soufflé à la base de chaque cuve afin de refroidir la chaux.

L'air de refroidissement de la cuve n° 1, accompagné des gaz de combustion et du dioxyde de carbone issu de la calcination, passe par le conduit transversal et pénètre dans la cuve n° 2 à une température approximative de 1 050 °C. Dans la cuve n° 2, les gaz provenant de la cuve n° 1 se mélangent à l'air de refroidissement soufflé à la base de la cuve n°2 et montent. Ce faisant, ils chauffent les pierres qui se trouvent dans la zone de préchauffage de la cuve n° 2.

Si le mode opératoire ci-dessus devait se poursuivre, la température des gaz d'exhaure augmenterait bien au-delà de 500 °C. Toutefois, après 8 à 15 minutes, les flux de combustible et d'air vers la première cuve sont stoppés et il se produit une « inversion de sens ». Après le chargement du calcaire dans la cuve n° 1, le combustible et l'air sont injectés vers la cuve n° 2, et les gaz d'exhaure évacués par le haut de la cuve n° 1.

Le four peut être chauffé à l'aide de combustible gazeux, liquide ou solide pulvérisé ainsi qu'avec des déchets combustibles ou de la biomasse. Il présente également un rapport de débit élevé bien que son efficacité énergétique puisse se détériorer quelque peu pour des niveaux de production faibles. Une fois que le four est allumé, il n'est pas souhaitable de l'éteindre au risque de réduire la durée de vie des réfractaires. La durée de vie (campagne) des réfractaires dans les passages de cuisson et d'une cuve à l'autre est comprise entre 4 et 8 ans pour la plupart des opérations.

Le four vertical à cycles alternés standard fonctionne avec des pierres propres, dans l'idéal avec un rapport de granulométrie inférieur ou égal à 2:1. Les dimensions minimales des pierres sont de 30 mm, bien qu'une version modifiée appelé four PFRK à chaux fine puisse travailler avec des pierres propres de diamètre compris entre 10 et 30 mm.

Le Tableau 2.19 récapitule les principales caractéristiques techniques du four vertical à cycles alternés.

Four vertical à cycles alternés (PFRK)	
Types d'alimentation en combustible	Lances dans le lit de pierres
Production (tonnes/jour)	100 – 600
Consommation thermique (MJ/t de chaux)	3200 – 4200
Consommation énergétique / électrique (kWh/t de chaux)	20 – 41
Structure	Deux ou trois cuves cylindriques ou rectangulaires avec revêtement réfractaire reliées par un système de canalisations pour la circulation des gaz chauds
Granulométrie du calcaire (mm)	10 – 200
Types de combustible	Combustibles gazeux, liquides ou solides pulvérisés, déchets combustibles ou biomasse
Injection d'air comburant	Par le haut (principal) et les lances (10 %)
Défournement de la chaux	Plaque rotative excentrique
Points importants	La qualité du placement des réfractaires est très importante
Avantages	Souplesse de la production Chaux à forte réactivité Possibilité raisonnable de faire varier la réactivité de haute à moyenne lorsque le calcaire le permet Bonne répartition du combustible en raison de l'aire réduite de la section spécifique touchée par une lance Faibles exigences en combustible Faible consommation d'énergie (voir le Tableau 2.23) Campagne longue durée, arrêt après 5 à 7 ans de fonctionnement seulement
Inconvénients	Peu de souplesse d'arrêt et redémarrage Non adapté aux pierres à forte décrépitation Souplesse limitée (chaux faiblement ou moyennement calcinée) Revêtement réfractaire plus coûteux que pour les autres types de fours

Table 2.19 : Caractéristiques techniques des fours verticaux à cycles alternés
[44, EuLA, 2006]

2.2.7.3 Fours verticaux annulaires (ASK)

Dans un four annulaire (Figures 2.25 et 2.27), la principale caractéristique est un cylindre central qui restreint la largeur de la chambre annulaire et qui, avec les voûtes prévues pour la distribution des gaz de combustion, garantit une bonne répartition de la chaleur. La colonne centrale permet également qu'une partie des gaz de combustion provenant des brûleurs inférieurs soient récupérés dans la cuve et réinjectés dans la chambre inférieure.

Ce recyclage réduit la température au niveau des brûleurs inférieurs, tout en abaissant la température dans les dernières phases de la calcination. Les deux effets permettent d'obtenir un produit à faible teneur en CaCO_3 et avec une haute réactivité. Le four annulaire, dont un exemple est donné à la Figure 2.26, peut être chauffé à l'aide de combustibles gazeux, liquides ou solides. Les gaz d'exhaure présentent une forte concentration de CO_2 .

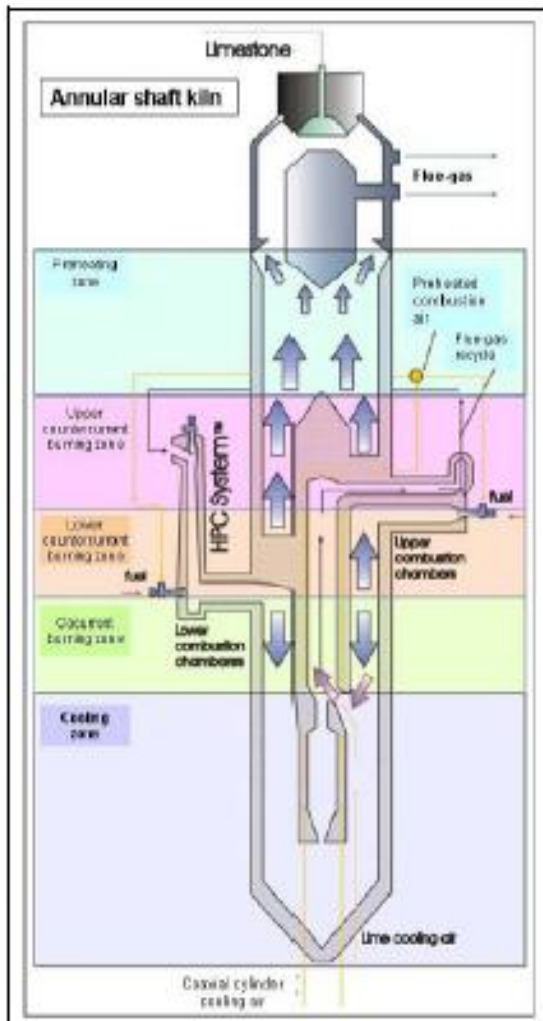


Figure 2.25 : Four vertical annulaire
[44, EuLA, 2006]



Figure 2.26 : Exemple de four vertical annulaire
utilisé dans la fabrication de la chaux
[44, EuLA, 2006]

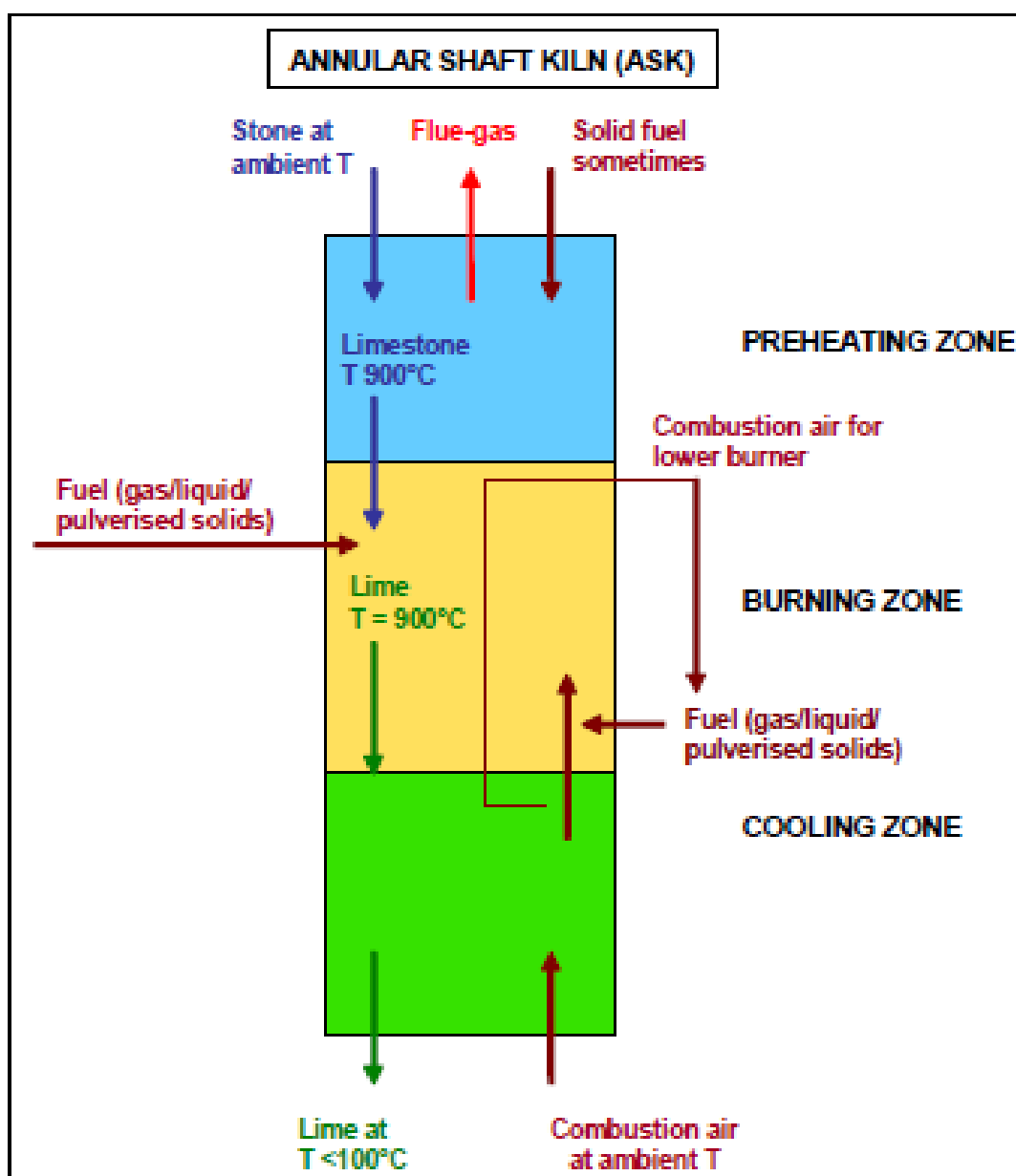


Figure 2.27 : Principe de fonctionnement de fours verticaux annulaires (ASK)
[44, EuLA, 2006]

Le Tableau 2.20 présente les caractéristiques techniques des fours annulaires [44, EuLA, 2006].

Four annulaire (ASK)	
Types d'alimentation en combustible	Chambre de combustion supérieure et inférieure ; parfois mélangé au calcaire
Production (tonnes/jour)	80 – 300
Consommation thermique (MJ/t de chaux)	3300 – 4900
Consommation énergétique / électrique (kWh/t de chaux)	18 – 35 (jusqu'à 50 pour des granulométries inférieures à 40 mm)
Structure	Cylindre vertical avec réfractaire et cylindre intérieur Chambres externes et brûleurs
Granulométrie du calcaire (mm)	(10) 40 – 150
Types de combustible	Combustibles gazeux, liquides ou solides pulvérisés Déchets combustibles ou biomasse
Injection d'air comburant	Par le haut : <ul style="list-style-type: none"> • conduite • dépoussiéreur • ventilateur
Défournement de la chaux	Plaque rotative excentrique
Points importants	Exige un contrôle très précis du procédé
Avantages	Faible CO ₂ résiduel Réactivité de haute à moyenne Economie d'énergie par récupération de la chaleur Le cylindre central réduit la largeur de la chambre annulaire Bonne répartition de la chaleur
Inconvénients	Entretien du récupérateur de chaleur et des chambres extérieures Coût de construction relativement élevé en raison de sa conception

Tableau 2.20 : Caractéristiques techniques des fours verticaux annulaires
[44, EuLA, 2006]

2.2.7.4 Autres fours (OK)

2.2.7.4.1 Autres fours verticaux simples

Ce groupe de fours comprend un certain nombre de concepts non présentés précédemment. Selon ces conceptions, le combustible est introduit à travers les parois du four et brûlé dans la zone de calcination, les produits de la combustion se déplaçant vers le haut, à contre-courant de la chaux et du calcaire. Parfois, le combustible est brûlé partiellement dans des unités de gazéification externes, parfois, il est introduit par l'intermédiaire de dispositifs tels qu'un brûleur central ou en faisceau, ou bien injecté sous des voûtes internes.

2.2.7.4.2 Fours verticaux à double chambre inclinée

Ce type de four peut produire une chaux réactive à faible teneur en carbonate. Il est en grande partie de section rectangulaire, mais sa zone de calcination comprend deux sections inclinées. En regard de chaque section inclinée, des arcs en saillie créent des espaces où le combustible et l'air comburant préchauffé sont brûlés dans des chambres de combustion.

L'air de refroidissement est amené à la base du four, où il est préchauffé, extrait, puis réinjecté par les chambres de combustion. Les trajets tortueux que suivent les gaz et la charge, combinés à une cuisson des deux côtés, assurent une répartition efficace de la chaleur. Il est possible d'utiliser toute une gamme de combustibles solides, liquides ou gazeux, même s'il faut les choisir avec précaution pour éviter des amas excessifs provoqués par des dépôts de cendres et de sulfate de calcium.

La Figure 2.28 montre les principales caractéristiques des fours à double chambre inclinée.

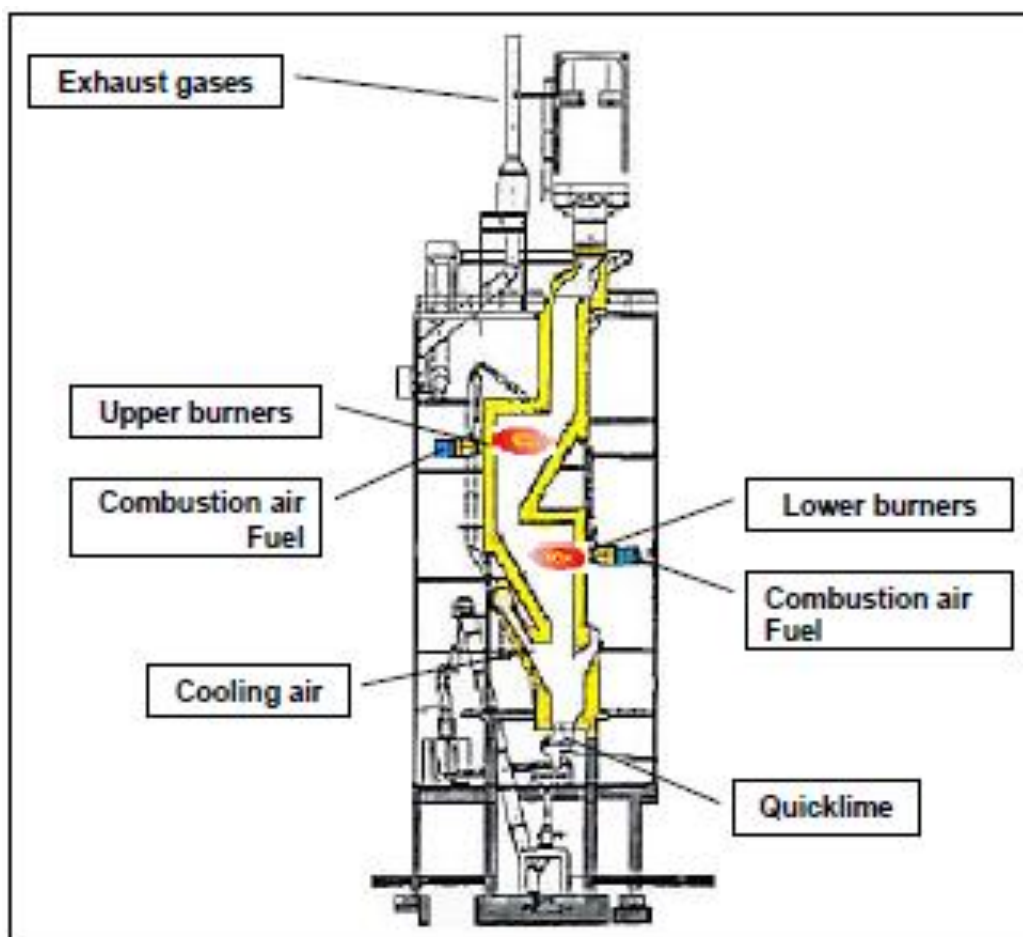


Figure 2.28 : Four vertical à double chambre inclinée
[40, Ullmann's, 1990], [168, GTT CLM, 2007]

2.2.7.4.3 Fours verticaux à plusieurs chambres

Il s'agit d'un autre type de four à double chambre inclinée. La zone de calcination comporte alors quatre ou six sections inclinées successivement, à l'opposé desquelles se trouve un arc en saillie. Ces arcs ont la même fonction que dans un four à double chambre inclinée.

L'air de refroidissement est préchauffé par la chaux dans la zone de refroidissement, puis extrait, dépoussiéré et réinjecté par les chambres de combustion.

L'une des caractéristiques de ce four tient au fait qu'il est possible de moduler la température des chambres de combustion inférieures afin de contrôler la réactivité de la chaux sur une amplitude considérable. Le four peut être chauffé au moyen de combustibles solides, liquides ou gazeux ou d'un mélange de différents types de combustibles.

2.2.7.4.4 Fours à grilles mobiles

Avec un calcaire d'une granulométrie comprise entre 15 et 45 mm, il est possible d'utiliser un four à « grilles mobiles » ou four CID. Ce type de four a été mis au point en Allemagne.

Il se compose d'une zone de préchauffage verticale rectangulaire qui achemine le calcaire dans la zone de calcination ; là, le calcaire descend lentement en cascade sur cinq plateaux articulés, en regard desquels est montée une série de brûleurs. La chaux est ensuite transférée dans une zone de refroidissement rectangulaire.

Le four à grilles mobiles peut brûler des combustibles gazeux, liquides ou pulvérisés et, d'après les données collectées, il est capable de produire une chaux légèrement calcinée d'une teneur résiduelle en CaCO_3 inférieure à 2,3 %. Les quatre fours construits à ce jour présentent des capacités allant de 80 à 130 tonnes/jour de chaux vive.

2.2.7.4.5 Fours avec mise en forme au sommet

Le four avec mise en forme au sommet est une configuration relativement nouvelle qui accepte en alimentation des pierres d'une granulométrie comprise entre 10 et 25 mm. Ce type de four a été mis au point au Japon.

Il se compose d'une zone de préchauffage annulaire d'où le calcaire est transféré par des poussoirs dans une zone de calcination cylindrique. Le brûleur central est dirigé vers le bas, chauffé au fuel et positionné au milieu de la zone de préchauffage ; les gaz de combustion qu'il produit sont évacués dans la zone de calcination par l'intermédiaire d'un éjecteur. La chaux descend ensuite dans une zone de refroidissement conique.

Les données indiquent que le four produit une chaux vive de grande qualité, propre à la production d'acier et à la précipitation du carbonate de calcium. Sa capacité peut atteindre 100 tonnes/jour de chaux vive. D'après les données, ce four peut être chargé avec des roches calcaires peu résistantes, notamment grâce à sa hauteur relativement modeste.

2.2.7.4.6 Fours de calcination avec mise en suspension par le gaz (GSC)

La calcination avec mise en suspension par le gaz (GSC) est une technique appliquée au traitement des minéraux, comme la calcination du calcaire, de la dolomie et de la magnésie à partir de matières premières pulvérisées, afin de produire des produits très réactifs et uniformes. En 2007, toutefois, une seule usine utilisait cette technique dans l'UE des 27. La plupart des procédés dans l'usine (séchage, préchauffage, calcination et refroidissement) sont effectués en suspension par le gaz.

En conséquence, l'installation se compose d'équipements fixes et de quelques éléments mobiles, comme le décrit la Figure 2.29.

La quantité de matériau dans le système est négligeable ; ainsi, il suffit de quelques minutes de fonctionnement pour que le produit respecte les spécifications. Il n'y a ni perte de matériau ni défaut de qualité au démarrage et à l'arrêt, donc pas de produits de sous-qualité. Il résulte de ce procédé un produit très réactif, même s'il est calciné à un haut niveau.

Le matériau à traiter en suspension par le gaz doit avoir la finesse appropriée, l'expérience ayant démontré qu'il ne faut pas dépasser une granulométrie de 2 mm.

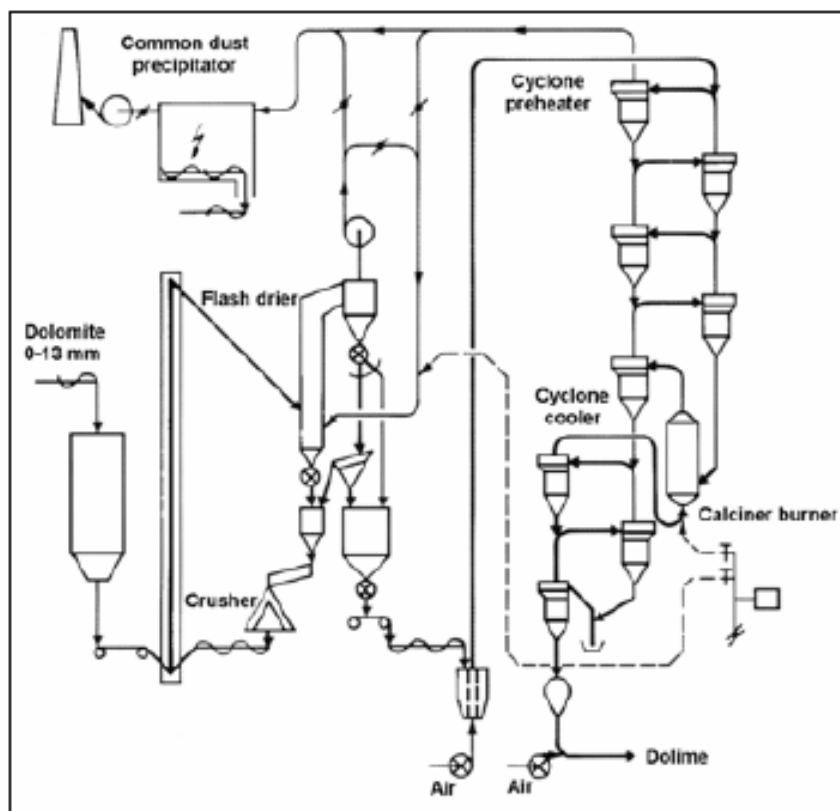


Figure 2.29 : Schéma du procédé de calcination avec mise en suspension par le gaz
[53, Norsk Hydro Norvège, 2001]

Depuis août 1986, une usine utilisant le procédé de calcination avec mise en suspension par le gaz, pour la production de chaux dolomitique, fonctionne en continu chez Norsk Hydro, à Porsgrunn en Norvège. Certaines valeurs de performance du bilan de fonctionnement du procédé et des stations de broyage/séchage sont présentées ci-dessous [53, Norsk Hydro Norvège, 2001] :

- Capacité de l'usine 430 tonnes/jour
- Consommation de combustible 4,8 GJ/tonne de produit
- Consommation électrique 33 kWh/tonne de produit

2.2.7.4.7 Fours à sole rotative

Ce type de four, aujourd'hui quasiment obsolète, a été conçu pour produire de la chaux en roches. Il se compose d'une sole annulaire mobile qui transporte la charge de calcaire. Celui-ci est calciné par plusieurs brûleurs alors qu'il roule sur la sole annulaire. L'air de combustion est préchauffé par l'excédent de chaleur contenu dans les gaz d'exhaure ou par son utilisation pour refroidir la chaux vive.

Compte tenu de l'abrasion minimisée par rapport aux fours rotatifs et verticaux, les fours à sole rotative produisent une forte proportion de chaux en roches.

2.2.7.5 Fours longs rotatifs (LRK)

En 2008, près de 29 fours longs rotatifs étaient en service dans l'UE des 27, principalement dans le nord de l'Europe. Le four long rotatif se compose d'un cylindre en rotation dont le diamètre est compris entre 2 et 4,5 mètres et pouvant atteindre 150 m de longueur, incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlés à l'extrémité inférieure. La chaux vive est défournée vers un refroidisseur, utilisé également pour préchauffer l'air comburant. Il existe diverses configurations de refroidisseur à chaux, dont des unités planétaires montées autour de la carcasse du four, des grilles mobiles et plusieurs types de refroidisseurs verticaux à contre-courant.

La Figure 2.30 présente le schéma de principe du four long rotatif ainsi qu'un procédé de fabrication de chaux classique à contre courant. La Figure 2.31 montre un exemple de four de ce type. Les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.21.

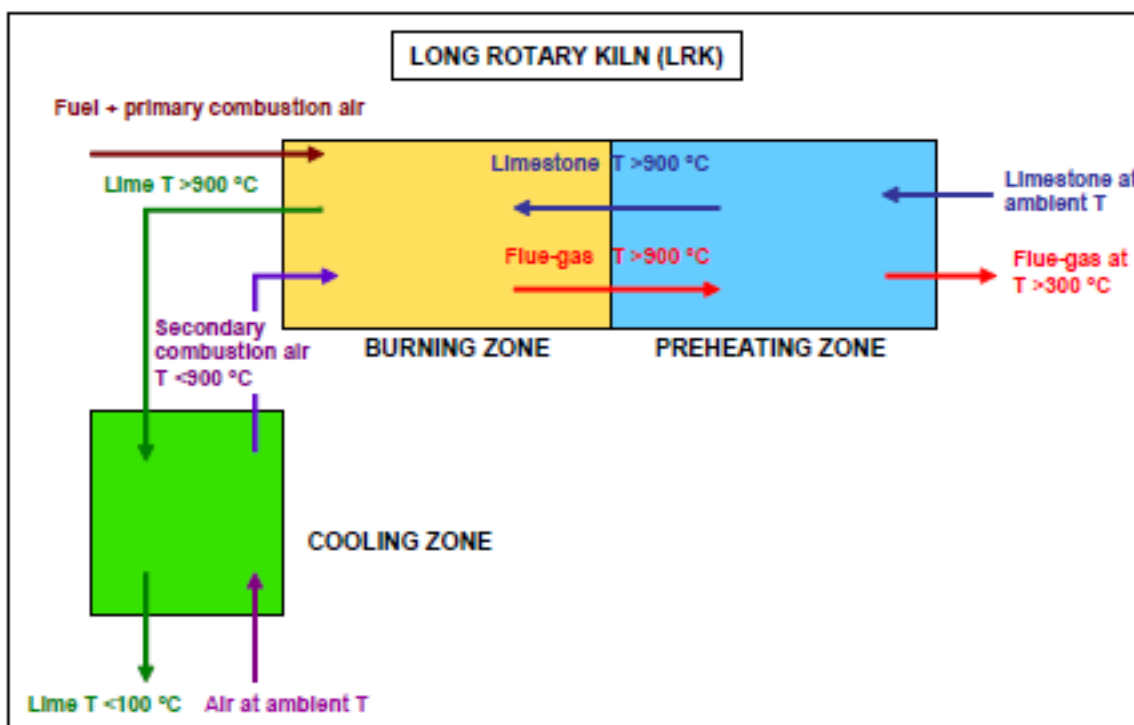


Figure 2.30 : Principe de fonctionnement des fours longs rotatifs [44, EuLA, 2006]

Four long rotatif (LRK)	
Types d'alimentation en combustible	Brûleur au niveau de la décharge de la chaux
Production (tonnes/jour)	160 – 1500
Consommation thermique (MJ/t de chaux)	6000 – 9200
Consommation énergétique ou électrique (kWh/t de chaux)	18 – 25
Structure	Cylindre rotatif incliné avec mélangeurs avec revêtement réfractaire pour améliorer les échanges de chaleur : <ul style="list-style-type: none"> • jusqu'à 150 m de longueur • de 2 à 4,5 m de diamètre Chambres et brûleurs externes
Types de préchauffeur	Aucun
Types de refroidisseur	<ul style="list-style-type: none"> • Planétaire autour de la carcasse du four • grille mobile ou • cylindre rotatif ou • refroidisseur à chambre statique
Granulométrie du calcaire (mm)	2 – 60
Types de combustible	Combustibles gazeux, liquides ou solides pulvérisés, Déchets combustibles et biomasse
Injection d'air comburant	Air de refroidissement à l'extrémité du refroidisseur et air primaire avec le combustible
Extraction des gaz d'exhaure	A l'extrémité du tube, côté alimentation en calcaire : <ul style="list-style-type: none"> • conduite • refroidisseur • dépoussiéreur • ventilateur
Défournement de la chaux	A l'extrémité du refroidisseur
Points importants	Qualité des réfractaires Broyage fin du charbon pour garantir une bonne combustion et améliorer la réduction Mesure en continu du CO et O ₂ nécessaire pour une bonne combustion et des raisons de sécurité
Avantages	Souplesse de la production Réaction très rapide pour la modification des paramètres Utilisation possible de pierres de tailles très diverses qui permet de préserver les gisements et les ressources naturelles Possibilité d'obtenir de très faibles teneurs en CO ₂ résiduel Souplesse de la réactivité de faiblement à fortement calcinée, production possible de dolomie surcuite Souplesse d'utilisation des combustibles Possibilité d'utiliser du calcaire peu solide (qui produit un grand nombre de fines pendant la calcination) lorsqu'il est inadapté à une utilisation dans les fours verticaux
Inconvénients	Besoins élevés en énergie (gaz d'exhaure chauds et température élevée de la carcasse du four) Formation d'anneaux de concrétion (cendres de charbon, sulfates de calcium, argile)

Tableau 2.21 : Caractéristiques techniques des fours longs rotatifs (LRK)
[44, EuLA, 2006]



Figure 2.31 : Exemple de four long rotatif utilisé dans la fabrication de la chaux
[44, EuLA, 2006]

La conception du brûleur est importante si l'on veut obtenir un fonctionnement efficace et fiable du four. La flamme doit être réglable en fonction du type de combustible utilisé.

Les fours rotatifs, dont les procédés peuvent être rapidement et facilement modifiés, peuvent produire de la chaux avec une gamme de réactivité plus large et des niveaux plus faibles de CO_2 résiduel que les fours verticaux. Les pierres relativement peu solides, comme les dépôts de coquillages, ainsi que les calcaires qui se désagrègent, ne sont pas adaptés pour alimenter les fours verticaux, mais peuvent convenir pour les fours rotatifs.

Les fours rotatifs peuvent être chauffés au moyen de nombreux combustibles. Comme, dans la zone de calcination, l'échange de chaleur s'effectue largement par rayonnement et comme les émissions infrarouges s'accroissent progressivement dans l'ordre suivant : gaz, fuel, combustible solide, le choix du combustible peut avoir une incidence considérable sur l'utilisation de la chaleur. Les pertes par rayonnement et convection sont relativement élevées par rapport aux autres configurations de fours à chaux, ce qui entraîne une consommation d'énergie généralement plus importante qu'avec les autres types de fours.

Un des avantages des fours rotatifs tient à ce que le soufre contenu dans le combustible et, dans une moindre mesure, dans le calcaire peut être expulsé du four dans les gaz d'exhaure, du fait du contrôle de la température et du pourcentage de CO dans la zone de calcination. Il est donc possible de produire des chaux à faible teneur en soufre à partir de combustibles contenant beaucoup de soufre, sous réserve des limites d'émissions de SO_2 dans les gaz d'exhaure.

Les fours longs rotatifs permettent une utilisation souple de combustibles et de granulométries, et peuvent notamment traiter les fractions les plus fines.

2.2.7.6 Fours rotatifs avec préchauffeurs (PRK)

Les fours rotatifs peuvent être équipés de préchauffeurs et sont en général nettement plus courts que les fours longs rotatifs traditionnels (entre 40 et 90 m, par exemple). L'utilisation de la chaleur diminue à cause de la réduction des pertes par rayonnement et convection, et grâce à la meilleure récupération de chaleur à partir des gaz d'exhaure.

En 2008, l'UE des 27 comptait 20 fours rotatifs avec préchauffeur en exploitation.

La Figure 2.32 montre les principales caractéristiques d'un four rotatif avec préchauffeur pour la fabrication de la chaux.

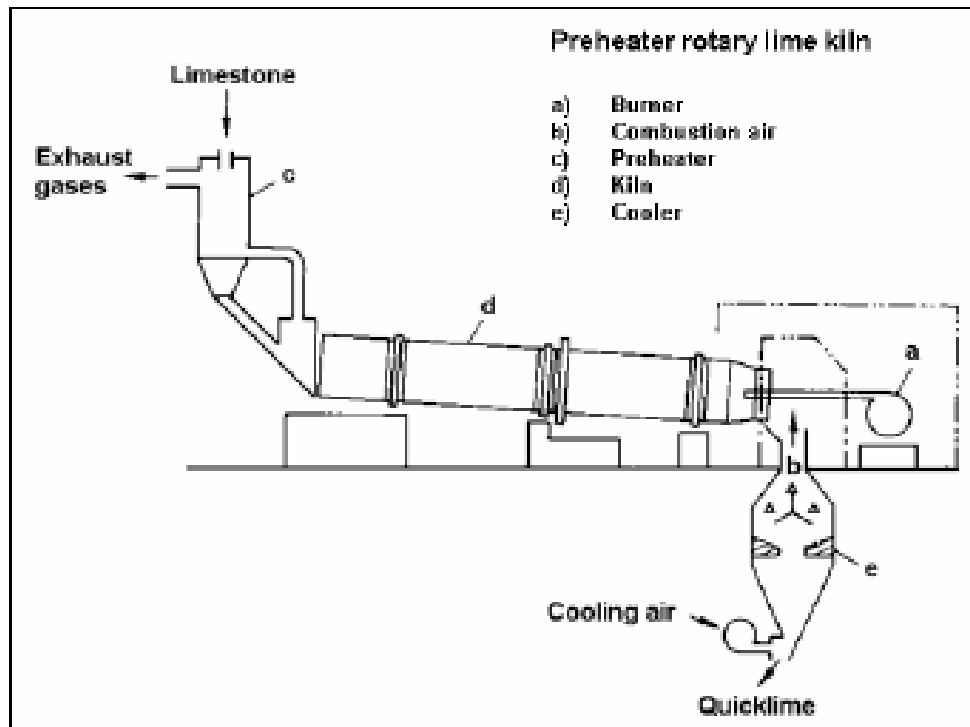


Figure 2.32 : Four rotatif avec préchauffeur (PRK)
[40, Ullmann's, 1990]

Un certain nombre de configurations de préchauffeurs ont été mises au point, notamment des systèmes verticaux et à grilles mobiles. Le préchauffeur doit être choisi en fonction de la taille et des propriétés des pierres chargées. La plupart acceptent une dimension minimale de 10 mm, certains ont utilisé de petites pierres de 6 mm, et d'autres ne peuvent admettre celles qui sont peu solides ou qui ont tendance à se désagréger.

Si l'élimination du soufre est plus difficile lorsqu'on utilise des fours avec préchauffeur, il existe néanmoins de multiples méthodes pour y parvenir :

- faire fonctionner le four dans des conditions réductrices et introduire un complément d'air à l'arrière du four (uniquement avec certaines conceptions de préchauffeur) ainsi qu'aux endroits suivants :
 - brûleur
 - air comburant
 - préchauffeur
 - four
 - refroidisseur

- ajouter à l'alimentation un calcaire suffisamment fin pour qu'il absorbe en priorité le SO_2 et qu'il soit récupéré dans le dépoussiéreur à l'arrière du four ou bien séparé de la chaux déchargée du refroidisseur.

La Figure 2.33 présente le schéma de principe du four rotatif avec préchauffeur utilisé pour la fabrication de la chaux. La Figure 2.34 montre un four de ce type. Les principales caractéristiques techniques sont présentées dans le Tableau 2.22.

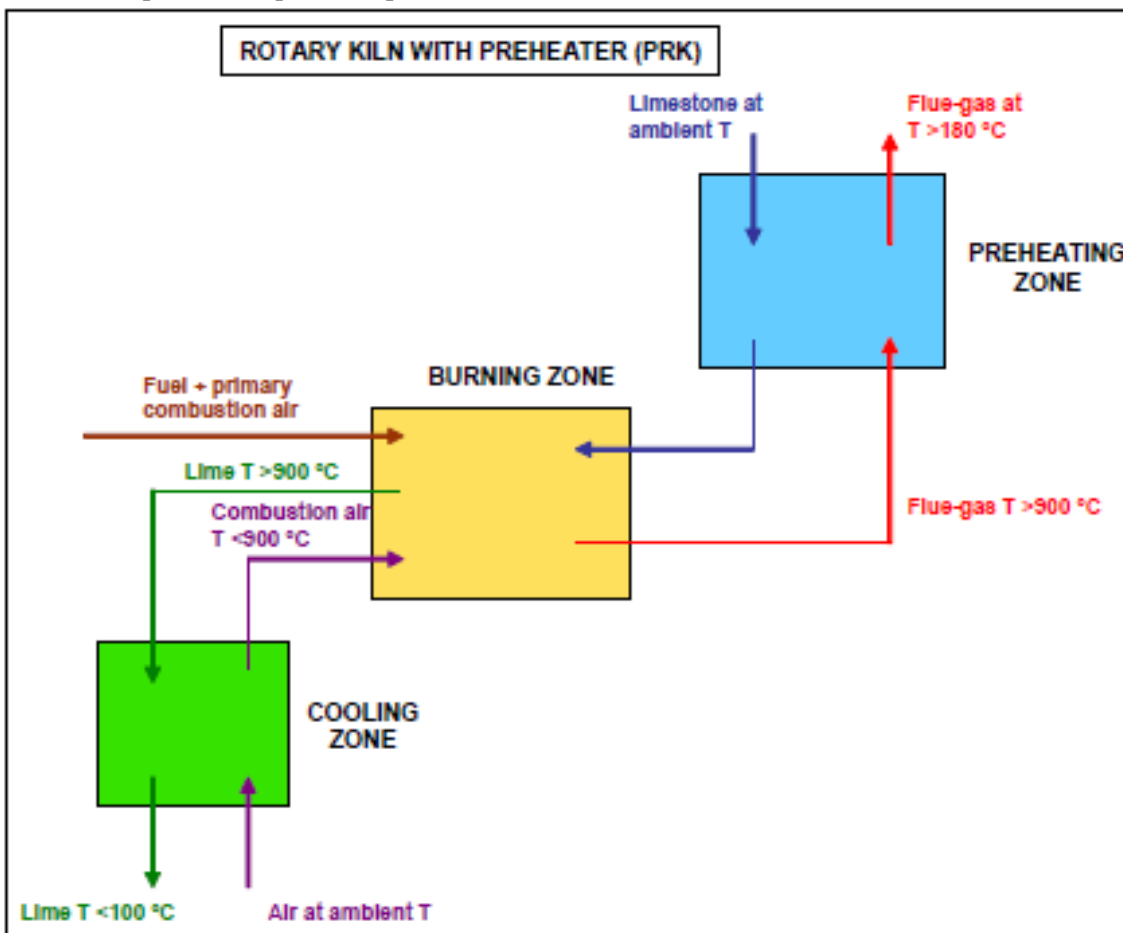


Figure 2.33 : Principe de fonctionnement d'un four rotatif avec préchauffeur (PRK)
[44, EuLA, 2006]

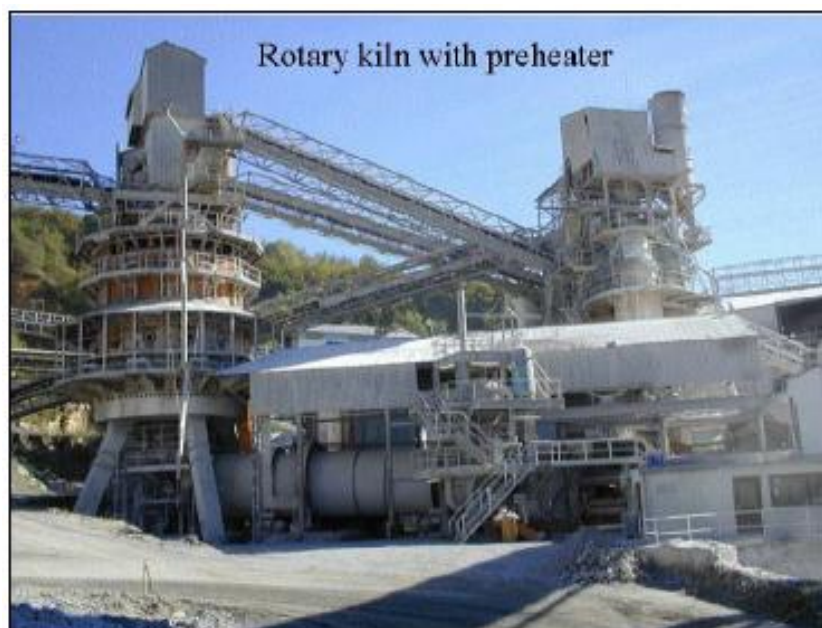


Figure 2.34 : Exemple de four rotatif avec préchauffeur
[44, EuLA, 2006]

Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	
Types d'alimentation en combustible	Brûleur au niveau de la décharge de la chaux
Production (tonnes/jour)	100 – 1500
Consommation thermique (MJ/t de chaux)	5100 – 7800
Consommation énergétique / électrique (kWh/t de chaux)	17 – 45
Structure	Cylindre rotatif incliné avec mélangeurs avec revêtement réfractaire pour améliorer les échanges de chaleur : <ul style="list-style-type: none"> • 90 m de longueur maximum • de 2 à 4,5 m de diamètre
Types de préchauffeur	Vertical ou grille mobile
Types de refroidisseur	Planétaire autour de la carcasse du four Cylindre rotatif à grille mobile
Granulométrie du calcaire (mm)	10 – 60
Types de combustible	Combustibles gazeux, liquides ou solides pulvérisés, Déchets combustibles ou biomasse
Injection d'air comburant	Air de refroidissement à l'extrémité du refroidisseur
Extraction des gaz d'exhaure	Les gaz chauds passent par le préchauffeur : <ul style="list-style-type: none"> • conduite, refroidisseur, dépoussiéreur et ventilateur
Défournement de la chaux	A l'extrémité du refroidisseur
Points importants	Qualité des réfractaires Broyage fin du charbon pour garantir une bonne combustion et améliorer la réduction Étanchéité du joint entre le préchauffeur et le four Dimension des pierres : des fines en surnombre peuvent bloquer le préchauffeur Mesure en continu du CO et O ₂ nécessaire pour une bonne combustion et des raisons de sécurité
Avantages	Souplesse de la production Réaction très rapide pour la modification des paramètres Utilisation possible de pierres de tailles très diverses qui permet de préserver les gisements et les ressources naturelles Possibilité d'obtenir de très faibles teneurs en CO ₂ résiduel Souplesse de la réactivité de faiblement à fortement calcinée, production possible de dolomie surcuite Souplesse d'utilisation des combustibles Possibilité d'utiliser du calcaire peu solide (qui produit un grand nombre de fines pendant la calcination) lorsqu'il est inadapté à une utilisation dans les fours verticaux Consommation de combustible plus faible grâce à l'amélioration des échanges de chaleur dans le préchauffeur (au début de la décarbonatation)
Inconvénients	Formation d'anneaux de concrétion (cendres de charbon, sulfates de calcium, argile) Le préchauffeur est un équipement supplémentaire qu'il faut entretenir

Tableau 2.22 : Caractéristiques techniques des fours rotatifs avec préchauffeur (PRK)
[44, EuLA, 2006]

2.2.8 Stockage et manutention

2.2.8.1 Stockage

2.2.8.1.1 Stockage de la chaux vive

Il est préférable de stocker la chaux vive dans un environnement sec et protégé des courants d'air pour limiter l'extinction à l'air. Il faut être particulièrement vigilant afin d'éviter tout contact entre eau et chaux, car l'hydratation libère de la chaleur et provoque une dilatation, deux conséquences potentiellement dangereuses.

Les véhicules de déchargement à pression d'air peuvent insuffler directement le produit dans le silo de stockage, lequel est équipé d'un filtre qui enlève la poussière entraînée dans l'air de convoyage. Le filtre doit être étanche à l'eau et résistant aux intempéries. La poussière collectée peut être déchargée dans le silo. Une soupape (pression/vide) peut être installée sur le silo à titre de mesure de précaution.

Tous les conteneurs de stockage peuvent être équipés de dispositifs permettant de fermer hermétiquement la base du silo pour permettre des travaux de maintenance sur le mécanisme de déchargement.

Si la quantité de chaux vive n'est pas suffisante pour justifier l'implantation de silos, le produit peut être stocké sur une dalle de béton, de préférence dans une aire spécifique d'un bâtiment afin de prévenir l'extinction spontanée.

2.2.8.1.2 Stockage de la chaux hydratée

La chaux hydratée absorbe le dioxyde de carbone de l'atmosphère, formant du carbonate de calcium et de l'eau. Il vaut donc mieux la stocker dans un environnement sec et protégé des courants d'air.

De préférence, la chaux hydratée conditionnée dans des sacs en papier est stockée couverte afin d'éviter une détérioration par l'humidité et une re-carbonatation de la chaux hydratée. Même si l'on utilise des « big bags », il vaut mieux les entreposer couverts afin de prévenir toute détérioration. Il est possible de stocker à l'extérieur des palettes de chaux hydratée ensachée, si chaque palette est recouverte d'un film en plastique avant le dépôt des sacs et si l'ensemble est enveloppé d'un film thermorétractable.

La chaux hydratée en vrac est stockée dans des silos qui doivent être totalement protégés contre les intempéries. Le silo est aéré via un filtre à manches résistant aux intempéries et au courant d'air qui le traverse. Si le filtre est monté au sommet du silo, la poussière collectée est redéchargée dans le silo. Le sommet du silo peut être équipé d'un trou d'homme pour les inspections et d'une soupape de sûreté. On peut installer un indicateur de trop plein ou une alarme pour éviter un débordement.

À la base du silo, il est recommandé de prévoir une inclinaison d'au moins 60° par rapport à l'horizontale, une ouverture d'évacuation de 200 mm minimum, et une vanne de fermeture positive au niveau de la sortie pour permettre la maintenance du matériel sous le silo.

Comme la chaux hydratée peut créer des « voûtages », des dispositifs appropriés pour rompre ces agglomérats sont installés : brides de ventilation, vibrateurs et dispositifs mécaniques, par exemple. En revanche, il faut veiller à empêcher un « noyage » de la poudre aérée.

2.2.8.1.3 Stockage du lait de chaux

Une grande partie des clients dont le procédé comprend une addition de chaux éteinte a estimé que le lait de chaux était une forme appropriée en termes de stockage et de manutention. Sous réserve de quelques précautions, il peut en effet être manipulé comme un liquide.

Tout système de stockage et de manutention doit veiller au fait que, si le lait de chaux est dilué avec de l'eau ou si la chaux hydratée est dispersée dans l'eau, toute dureté carbonée présente dans cette eau se dépose sous forme de carbonate de calcium. Si aucune mesure adéquate n'est prise, il en résulte un entartrage des parois des conduits, ainsi que du rotor et du corps des pompes. À cet égard, deux approches peuvent être adoptées : soit le système est conçu pour supprimer la formation de tartre, soit des mesures sont prises pour prévenir ou minimiser ce phénomène.

Dans les systèmes de stockage du lait de chaux, empêcher la décantation est important, car la pâte produite peut se révéler difficile à re-disperser. C'est pourquoi le contenu des réservoirs doit être agité. L'ampleur de l'agitation peut être faible et doit éviter de provoquer un tourbillon, ce qui accroîtrait l'absorption du dioxyde de carbone de l'atmosphère.

Le conduit de déchargement de la cuve de stockage constitue inévitablement un « bras mort » et il faut prévoir de le rincer à l'eau afin d'éliminer les obturations.

2.2.8.2 Manutention

Il existe de nombreux équipements appropriés pour le transfert du produit, et ce domaine fait l'objet d'innovations continues. Les mesures ou techniques présentées ci-dessous ont donné entière satisfaction, même s'ils ne conviennent pas à toutes les applications.

Les *élévateurs à benne* (ou skips) peuvent être utilisés pour toutes les catégories de granules et de morceaux, mais sont mieux adaptés en cas de particules supérieures à 100 mm. Les *élévateurs*, qu'il s'agisse d'un tapis élévateur à godets ou d'une chaîne à godets, sont utilisés pour toutes les granulométries de chaux vive. Les *transporteurs à raclettes* sont appropriés pour la chaux vive granuleuse et fine ; en général, ils servent à un transfert horizontal ou incliné. Les *bandes transporteuses* sont très souvent utilisées pour transporter des morceaux ou des granules horizontalement ou sur une pente ascendante. Quant aux *convoyeurs à vis*, ils s'emploient généralement pour la chaux vive fine. Enfin, des *transporteurs vibrants* ont déjà servi pour des particules d'une granulométrie allant jusqu'à 40 mm ; toutefois, ils sont plus efficaces lorsque la configuration présente une légère inclinaison descendante entre le point d'entrée et le point de sortie.

Il est possible d'utiliser un système de *convoyage pneumatique* avec des produits d'une taille maximum de 20 mm ; celui-ci représente souvent un investissement moins onéreux que les autres installations, mais les coûts d'exploitation sont plus élevés. Le produit est chargé dans un joint soufflé rotatif raccordé à une soufflerie. Le calibre de la conduite et le rapport volume/pression de l'air soufflé sont conçus pour prendre en compte la granulométrie de la chaux à transporter, la vitesse de transfert, ainsi que la longueur et le trajet de la conduite. Le silo de réception est équipé d'un filtre à air et d'une soupape de sûreté.

2.2.9 Autres types de chaux

2.2.9.1 Production de chaux hydraulique

Les chaux hydrauliques naturelles sont produites à partir de calcaires siliceux ou argileux contenant plus ou moins de silice, d'alumine et de fer. Les niveaux rencontrés normalement dans le calcaire sont les suivants : 4 à 16 % de SiO_2 , 1 à 8 % de Al_2O_3 , et 0,3 à 6 % de Fe_2O_3 . La teneur en carbonates de calcium et de magnésium réunis est comprise entre 78 et 92 %.

En général, le calcaire est calciné dans des fours verticaux qui doivent être conduits avec précision afin de s'assurer qu'autant de silice et d'alumine que possible réagit sans fripper la chaux libre. Les températures de calcination caractéristiques vont de 950 à 1 250 °C : la température requise s'élève au fur et à mesure que l'indice de cémentation augmente (de chaux faiblement à hautement hydrauliques).

La chaux calcinée est hydratée avec une quantité d'eau suffisante pour convertir l'oxyde de calcium libre en Ca(OH)_2 . Si la teneur en CaO libre est supérieure à 10 ou 15 %, les morceaux trop frittés se désagrègent en poudre. Sinon, la chaux doit être broyée avant hydratation. Par ailleurs, il faut parfois broyer le produit hydraté pour atteindre le degré de finesse et la vitesse d'établissement.

Des chaux hydrauliques naturelles « spéciales » sont produites à partir d'un mélange intime de chaux hydrauliques naturelles en poudre et de matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques réduits en poudre. On fabrique également des chaux hydrauliques artificielles en mélangeant intimement des chaux hydratées en poudre avec des matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques pulvérisés.

2.2.9.2 Production de dolomie calcinée

La dolomie est calcinée dans des fours verticaux ou rotatifs. Il existe trois qualités de production : légèrement, moyennement et fortement calcinée.

La dolomie légèrement calcinée est généralement produite dans des fours rotatifs ou verticaux. Les principes de fabrication sont similaires à ceux de la production de chaux vive à forte teneur en calcium. L'utilisation de chaleur est moindre du fait de la chaleur plus faible de la calcination et de la température de dissociation inférieure pour la dolomie (MgCO_3).

La dolomie fortement calcinée est produite en deux qualités : la qualité très pure, utilisée pour la fabrication des matériaux réfractaires, est réalisée par calcination de la dolomie à des températures pouvant atteindre 1 800 °C, dans des fours rotatifs ou verticaux ; la qualité « de mise en forme » est produite par calcination de la dolomie avec 5 à 10 % d'oxyde de fer, entre 1 400 et 1 600 °C, généralement dans un four rotatif. Les gaz d'exhaure de ces deux procédés présentent des températures supérieures à celles d'autres fours à chaux ; le plus souvent, ils sont refroidis en dessous de 420 °C au moyen d'échangeurs de chaleur, d'air humidifié ou d'injections d'eau atomisée.

La dolomie moyennement calcinée ($\text{CaCO}_3\text{-MgO}$) est produite par la calcination lente de la dolomie à environ 650 °C. On la fabrique en quantités relativement restreintes et l'Allemagne en est l'unique pays producteur en Europe.

2.2.10 Considérations générales sur les fours à chaux intégrés

La chaux est nécessaire à de nombreux autres secteurs industriels comme la sidérurgie, le sucre et le papier ainsi que dans celui de la chimie, et certains de ces secteurs possèdent leurs propres fours à chaux pour répondre à leurs besoins.

2.2.10.1 Les fours à chaux dans la sidérurgie

La plus grande partie de la chaux employée dans la sidérurgie sert à fluidifier les impuretés dans le convertisseur à oxygène. La chaux est aussi utilisée en plus petites quantités dans le procédé d'agglomération sur bande par frittage (préparation du minerai de fer), dans la désulfuration de la fonte brute, mais aussi comme fondant dans d'autres procédés de préparation de l'acier à l'oxygène, d'élaboration par arc électrique et dans de nombreux procédés secondaires de l'élaboration de l'acier.

Les fours à chaux de la sidérurgie sont essentiellement des fours verticaux, de configurations et capacités diverses. Dans leurs modèles de consommation ou d'émission, ils ne se distinguent pas des fours à chaux non intégrés.

Pour des informations utiles sur la sidérurgie, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la production du fer et de l'acier [87, Commission européenne, 2001].

2.2.10.2 Les fours à chaux dans la fabrication de la pâte à papier selon le procédé Kraft

On comptait environ 100 fours à chaux dans l'industrie du papier européenne en 2001. Ce sont tous des fours rotatifs dont les capacités s'échelonnent entre 30 et 400 tonnes de chaux calcinée par jour. La plupart sont des fours longs rotatifs, mais on rencontre aussi quelques fours rotatifs modernes équipés de préchauffeur.

Les fours à chaux longs rotatifs sont généralement alimentés par une pâte de carbonate de calcium contenant 30 % d'eau. En principe, le combustible de base est le gaz naturel ou le fioul. En outre, les gaz non condensables produits dans plusieurs zones du procédé de fabrication de la pâte sont généralement brûlés, ce qui accroît la teneur en H_2S , en composés organiques soufrés et en SO_2 dans les gaz à la cheminée. Dans certains cas, on emploie aussi comme combustible de la sciure et des gaz obtenus par gazéification de la biomasse.

Des laveurs de gaz de type Venturi et des filtres électrostatiques (pour les matières particulaires) sont normalement installés afin d'assurer le nettoyage des gaz d'exhaure.

Pour des informations utiles sur le papier et la pâte à papier, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour le papier et la pâte à papier [124, Commission européenne, 2001].

2.2.10.3 Les fours à chaux dans l'industrie sucrière

La plupart des fours à chaux de l'industrie du sucre européenne sont des fours verticaux à alimentation mixte. La majorité d'entre eux produisent entre 50 et 350 tonnes de chaux vive par jour pendant la campagne de sucre qui, pour la saison 1997-1998, a duré de 63 à 170 jours, avec une moyenne de 86 jours.

Tant la chaux vive que le CO_2 des gaz d'exhaure sont utilisés dans les sucreries. Les gaz dégagés par le four sont capturés et la plus grande partie est dépoussiérée dans un laveur de gaz avant d'être utilisée dans le procédé de fabrication du sucre (carbonatation). La majorité du CO_2 se recombine avec le lait de chaux dans le jus chaulé, afin de produire du $CaCO_3$.

Le coke est le combustible le plus courant dans les fours à chaux de l'industrie du sucre. La principale raison est que le gaz produit contient davantage de CO_2 (40 à 42 % de CO_2 par volume) que le gaz produit par les fours à fioul ou à gaz (28 à 32 % de CO_2 par volume).

Les niveaux de consommation (calcaire et combustible) propres aux fours à chaux de l'industrie du sucre sont quasi-similaires à ceux des mêmes types de fours à chaux dans d'autres secteurs.

Pour des informations utiles sur l'industrie sucrière, se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les industries agro-alimentaires et laitières (FDM). Toutefois les informations sur le type et la quantité de chaux produits ainsi que sur les fours et les combustibles employés ne sont pas encore couvertes par le BREF FDM [125, Commission européenne, 2006].

2.3 Niveaux d'émission et de consommation actuels

Les principales questions environnementales associées à la fabrication de la chaux sont la pollution de l'air et la consommation d'énergie. Le procédé de cuisson de la chaux est la principale source d'émissions et également le principal consommateur d'énergie. Les procédés secondaires d'extinction et de broyage de la chaux peuvent également avoir une certaine importance, de même que les opérations subsidiaires (à savoir le concassage, le criblage, le transport, le stockage et le déchargement), et sont plutôt mineurs en termes d'émissions et d'utilisation de l'énergie.

Il convient de noter que, sauf mention contraire dans le présent document, pour la présente section concernant l'industrie de la chaux, les conditions standard pour les mesures de débits et de concentrations de gaz de carneau sont liées aux définitions suivantes, qui sont également indiquées dans le Glossaire :

m ³ /h	débit : sauf mention contraire dans le présent document, les débits se réfèrent à 11 % en volume d'oxygène et à l'état standard
mg/m ³	concentration : sauf mention contraire dans le présent document, les concentrations des substances ou mélanges de substances gazeuses se réfèrent à des effluents gazeux à 11 % en volume d'oxygène et à l'état standard
état standard	correspond à une température de 273 K, une pression de 1013 hPa et à un gaz sec

De plus, il convient de noter que les plages d'émission font référence à une teneur en oxygène de référence de 11 %, même si la teneur en oxygène réelle au cours de la cuisson est bien inférieure à 11 %. La formule de calcul permettant de déterminer la concentration des émissions est indiquée ci-dessous :

$$E_R = \frac{21 - O_R}{21 - O_M} * E_M$$

E_R (mg/Nm³) : concentration des émissions par rapport à la teneur en oxygène de référence O_R
 O_R (% en vol.) : teneur en oxygène de référence
 E_M (mg/Nm³) : concentration des émissions par rapport à la teneur en oxygène mesurée O_M
 O_M (vol %) : teneur en oxygène mesurée

Le lecteur trouvera d'autres informations utiles sur la surveillance dans le Document de référence sur les principes généraux de surveillance (MON) [151, Commission européenne, 2003].

2.3.1 Consommation de calcaire

La production de chaux nécessite habituellement entre 1,4 et 2,2 tonnes de calcaire par tonne de chaux vive marchande. La consommation dépend du type de produit, de la pureté du calcaire, du degré de calcination et de la quantité de poussières émises par le four ou les gaz d'exhaure du four.

2.3.2 Utilisation d'énergie

2.3.2.1 Calcination du calcaire

L'utilisation d'énergie dépend en outre pour un type de four donné de plusieurs facteurs différents, tels que la qualité des pierres utilisées, le degré de conversion du carbonate de calcium en oxyde de calcium, la taille de la pierre, l'humidité, le combustible, la conception du four, le contrôle du procédé, l'étanchéité, etc.

La chaleur de dissociation du calcaire est de 3,2 GJ/tonne pour la chaux (environ 9 % de moins pour la dolomie). L'utilisation de chaleur nette par tonne de chaux vive varie d'une conception de four à une autre. Les fours rotatifs exigent généralement une chaleur supérieure à celle des fours verticaux. L'utilisation de la chaleur tend à augmenter avec le degré de calcination (cf. Section 2.2.6.1).

L'utilisation d'électricité varie entre une plage basse de 5 à 15 kWh/tonne de chaux pour les fours verticaux à alimentation mixte, et une plage haute de 20 à 40 kWh/tonne pour les conceptions de fours verticaux les plus avancés et pour les fours rotatifs.

Le Tableau 2.23 présente l'utilisation caractéristique de chaleur et d'électricité de plusieurs types de fours à chaux. La consommation de chaleur représente environ 95 % de la consommation d'énergie totale nécessaire à la production de chaux.

Type de four	Type d'énergie utilisée pour la fabrication de chaux et dolomie	
	Utilis. chaleur/consommation ¹⁾ GJ/tonne	Utilis. électricité four kWh/tonne
Fours longs rotatifs (LRK)	6,0 – 9,2	18 – 25
Fours rotatifs avec préchauffeur (PRK)	5,1 – 7,8	17 – 45
Fours verticaux à cycles alternés (PFRK)	3,2–4,2	20 – 40
Fours verticaux annulaires (ASK)	3,3 – 4,9	18 – 35 ²⁾ jusqu'à 50 ³⁾
Fours verticaux à alimentation mixte (MFSK)	3,4 – 4,7	5 – 15
Autres fours (OK)	3,5 – 7,0	20 – 40
1) L'utilisation/consommation de chaleur représente environ 80 % de la consommation d'énergie totale nécessaire à la production de chaux. 2) Pour les granulométries de calcaire entre 40 et 150 mm. 3) Pour les granulométries de calcaire < 40 mm.		

Tableau 2.23 : Utilisation de chaleur et d'électricité habituelle par type de four dans l'UE des 27 pour la fabrication de chaux et de dolomie

[46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006], [64, République tchèque, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

Les paramètres suivants peuvent influencer sur les valeurs de consommation d'énergie indiquées dans le Tableau 2.23 :

- granulométrie
 - à 5 %
- humidité du calcaire
 - 1 à 10 %
- combustible (sec, rendement, etc.)
 - à 5 %
- CO₂ résiduel :
 - 0,5 à 5 %

- dolomie :
 - jusqu'à 9 %/chaux
- chaux dure :
 - ~10 %.

La teneur en CO₂ résiduel dans les produits peut affecter la consommation d'énergie. La consommation d'énergie augmente en fonction de la dureté des produits. La teneur en CO₂ résiduel détermine l'utilisation de la chaux ; de la chaux d'une teneur de CO₂ d'environ 5 % est utilisée dans la sidérurgie, de la chaux d'une teneur de CO₂ d'environ 1,5 % est utilisée pour la désulfuration des gaz d'exhaure.

Dans le cas particulier de la dolomie calcinée à mort, la consommation d'énergie se situe dans la plage de 6,5 à 13 GJ/tonne selon le type de four [54, EuLA, 2006].

Afin de réduire la consommation élevée d'énergie sous forme de combustible, différentes mesures/techniques ont été appliquées à différents types de fours à chaux, notamment :

- l'optimisation et le contrôle du procédé ;
- la réduction de l'excès d'air.

2.3.2.2 Hydratation de la chaux

Le procédé d'hydratation est exothermique ; un excédent d'eau est donc ajouté pour contrôler la température dans les hydrateurs. Cet excédent d'eau, qui est faible en quantité, se transforme en vapeur laquelle est libérée dans l'atmosphère en même temps qu'une petite quantité de l'air qui a été insufflé dans l'hydrateur pour éviter à l'humidité et à la poussière de pénétrer dans les équipements de l'usine ou dans le système d'alimentation en chaux vive, ainsi que pour faciliter l'évaporation de l'excès d'eau.

Les besoins en énergie pour le fonctionnement des hydrateurs, des séparateurs à air et des transporteurs s'élèvent à environ 5 à 30 kWh/tonne de chaux vive.

2.3.2.3 Broyage de la chaux

L'utilisation d'énergie pour le broyage de la chaux varie de 4 à 10 kWh/tonne de chaux vive pour les qualités grossières (par exemple, celles qui servent à la stabilisation du sol) et de 10 à 40 kWh/tonne de chaux vive pour les qualités plus fines. La quantité d'énergie requise dépend aussi de l'équipement. Des broyeurs de fines à percussion peuvent être employés pour des produits plus gros. Les broyeurs à boulets, cylindres broyeurs et broyeurs haute pression, ainsi que les désagglomérateurs (par ordre décroissant d'utilisation d'énergie spécifique) servent à fabriquer des produits plus fins.

2.3.3 Émissions dans l'air

Des émissions dans l'air et des émissions de bruit surviennent au cours de la fabrication de la chaux. De plus, des émissions dans l'eau, des pertes et/ou déchets de procédé et, dans de rares cas, des odeurs, peuvent survenir. Dans la présente section, les plages d'émissions de polluants de l'air sont présentées pour le procédé de production de chaux, y compris pour d'autres étapes du traitement, telles que le stockage et la manutention des matières premières, des combustibles ou des produits.

Des émissions significatives dans l'air lors de la fabrication de chaux surviennent au cours de la calcination. Les émissions dans l'air les plus pertinentes de la calcination de calcaire sont :

- les oxydes de carbone (CO, CO₂),
- les oxydes d'azote (NO_x),
- le dioxyde de soufre (SO₂),
- les poussières (PM).

La nature et la concentration des émissions sont influencées par plusieurs facteurs, tels que :

- le type de four et la conception de four,
- les conditions de fonctionnement ou de procédé,
- la chimie et la qualité du calcaire en tant que matière première,
- les combustibles utilisés,
- les techniques de dépollution pour la réduction des émissions.

D'autres émissions dans l'air peuvent survenir dans le procédé de production et comprennent :

- le chlorure d'hydrogène (HCl),
- le fluorure d'hydrogène (HF),
- les composés organiques,
- les métaux lourds,
- les polychlorodibenzo-p-dioxines et les polychlorodibenzofuranes (PCDD/F),
- le sulfure d'hydrogène (H₂S).

Type de four et conception de four

Le type de four est choisi, notamment, de façon à être cohérent avec la taille et la nature du calcaire disponible et pour sa capacité à satisfaire les exigences de qualité particulières.

Les configurations de four présentent différentes caractéristiques, telles que :

- leur capacité à utiliser des types de calcaires spécifiques (chimie et granulométrie) ;
- les types de combustibles utilisés et leurs méthodes d'injection de combustible dans le four ;
- le rapport air/combustible ;
- leurs profils de température d'exploitation ;
- leur répartition de chaleur.

Un autre facteur important lié au type de four est l'interaction gaz/solide, qui dépend du profil de température dans le four. Elle permet à certains composants dans les gaz du four (principalement SO₂ et HCL) de réagir avec la chaux vive ou le calcaire. Ces composants sont éliminés des gaz, recouverts par le produit et intégrés au produit à la sortie du four.

Conditions de procédé

Les paramètres de procédé sont choisis afin de minimiser l'utilisation de combustibles et d'éviter le calcaire non calciné. Les paramètres exacts de procédé choisis sont importants pour atteindre les exigences de qualité du produit et ont un effet sur les émissions.

Chimie du calcaire

La concentration en impuretés et le comportement de la pierre au cours de la calcination peuvent influencer sur les émissions. Les variations des teneurs de soufre et de chlore dans le calcaire/la dolomie jouent un rôle important et ont un effet sur la plage des émissions de SO₂ et de HCl dans les gaz d'exhaure. Cela dépend du type de four et des conditions de procédé nécessaires pour produire une certaine qualité de produits.

Type de combustible

La composition naturelle, telle que solide, liquide et gazeuse, le pouvoir calorifique et les caractéristiques de combustion des combustibles utilisés, ainsi que la teneur des différents composants, tels que le soufre et le chlore, ont une influence sur les émissions dans l'air.

Un exemple de principe de système de dosage de combustible pour un four vertical est présenté sur la Figure 2.10 dans la Section 2.2.4.

Équipement de réduction

Les fours à chaux disposent d'ordinaire de techniques de réduction permettant de réduire les émissions dans l'air, par exemple de poussières. Le type de technique de réduction utilisé dépend, par exemple, du type de four et des combustibles utilisés. Les émissions de poussières ne surviennent pas uniquement lors du procédé de calcination, mais aussi au cours des opérations de procédé utilisées dans la fabrication de la chaux, telles que le criblage, le concassage, le broyage, l'hydratation et le conditionnement.

En 2006, les producteurs de chaux européens ont fourni des plages d'émissions dans l'air mises à jour. Les émissions typiques pour les fours à chaux européens sont présentées dans le Tableau 2.24.

Polluant	Concentration		Rapport/tonne de chaux	
	Min mg/Nm ³	Max mg/Nm ³	Min kg/tonne de chaux	Max kg/tonne de chaux
Particules				
Poussières	1 ²⁾ <10	>250	0,003 – 0,006	>1,3
Gaz				
NO _x	<50 – <100	>2500	<0,15	>12,5
SO ₂	<50	>2000	0	>10,0
CO ₂			987	1 975
CO	100	>2500	<0,3	>12,5
HCl	0,02 ²⁾ – 10	>250	0,00006	>1,3
Dioxines (moyenne)	0,0155 ng I-TEQ/Nm ³	0,0638 ng I-TEQ/Nm ³	4,7*10 ⁻⁸	3,2 *10 ⁻⁷
Métaux lourds (formes gazeuses et particulaires)¹⁾				
Arsenic	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Cadmium	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Cuivre	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Manganèse	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Mercure	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Étain	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Tellure	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Thallium	<0,01	<0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Vanadium	<0,01	>0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Chrome	<0,01	>0,10	<5*10 ⁻⁵	<5*10 ⁻⁴
Antimoine	<0,01	<0,04	<5*10 ⁻⁵	<2*10 ⁻⁴
Sélénium	<0,01	<0,06	<5*10 ⁻⁵	<3*10 ⁻⁴

Cobalt	<0,01	<0,06	$<5*10^{-5}$	$<3*10^{-4}$
Plomb	<0,10	>1,00	$<5*10^{-4}$	$<5*10^{-3}$
Zinc	<0,10	>1,00	$<5*10^{-4}$	$<5*10^{-3}$
<p>Les concentrations émises sont des moyennes et constituent des valeurs indicatives basées sur diverses techniques de mesure.</p> <p>Basé sur les volumes caractéristiques de gaz sec d'exhaure suivants, les conditions de référence correspondent à une pression de 1013 hPa et une température de 273,15 K, et une teneur en O₂ de 11 % :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3000 Nm³/t de chaux pour les fours verticaux normaux, les fours verticaux annulaires et les fours verticaux à cycles alternés (min) • 3700 Nm³/t de chaux pour les fours rotatifs avec préchauffeurs • 5000 Nm³/t de chaux pour les fours longs rotatifs (max) <p>1) La plage basse correspond au niveau de détection des métaux</p> <p>2) Mesures ponctuelles</p>				

Tableau 2.24 : Exemples d'émissions types provenant des fours à chaux en Europe
[54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

2.3.3.1 Poussières (PM)

2.3.3.1.1 Émissions de poussières canalisées

Calcination du calcaire

Les poussières (matière particulaire / PM) sont générées par les fines particules contenues dans le calcaire d'alimentation, par la décrépitation thermique et mécanique (dégradation de la chaux et du calcaire) dans le four et, dans une moindre mesure, par les cendres de combustible. Les niveaux de poussières à l'entrée de l'équipement de dépoussiérage varient considérablement, notamment en fonction de la conception du four, de sa capacité et des matières premières utilisées.

Étant donné la diversité des situations de rejet de gaz d'exhaure, on utilise des séparateurs de poussières de plusieurs types, tels que cyclones, épurateurs en voie humide, filtres à manches, filtres électrostatiques ou filtres à gravier. Les cyclones types éliminent environ 90 % des poussières des fours à chaux.

Après réduction, les émissions caractéristiques sont comprises entre 10 et 250 mg/Nm³, variant de 20 à 100 mg/Nm³ dans le cas de l'utilisation d'épurateurs en voie humide. La figure 2.35 présente des résultats de mesures ponctuelles et indique que 70 % des essais sur les fours à chaux utilisant des ESP et des filtres à manches donnent des émissions de poussières inférieures à 20 mg/Nm³ (dont 60 % sont inférieures à 10 mg/Nm³) et que cette valeur n'est obtenue que pour 6 % des essais sur les fours à chaux utilisant des épurateurs en voie humide. De plus, des émissions ponctuelles de poussières par la chauffe du four dans une plage située entre 1,4 et 2 mg/Nm³ ont également été signalées [16, EuLA, 2001], [45, Schorcht, 2006], [46, Allemagne, 2006], [66, Autriche, 2006], [68, EuLA, 2006], [71, Hongrie, 2006].

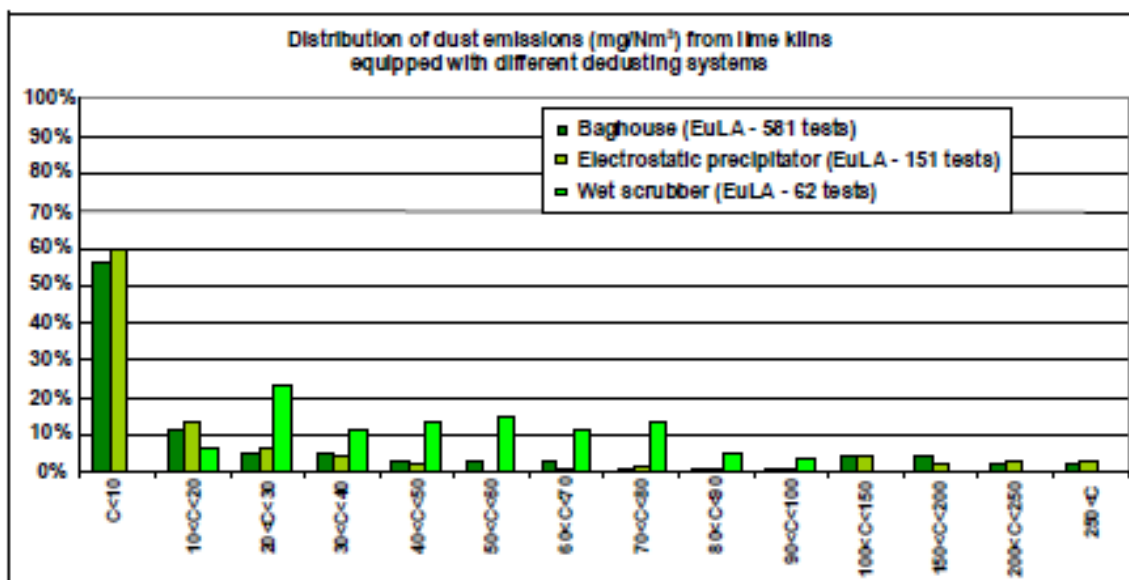


Figure 2.35 : Émissions de poussières mesurées à partir de différents types de fours à chaux utilisant différents types de techniques de réduction de poussières dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure) [129, EuLA, 2006]

En Allemagne, tous les fours verticaux sont équipés de filtres à manches. Après traitement des gaz résiduels avec les filtres à manches, les émissions de poussières se situent d'ordinaire dans la plage de <10 à <20 mg/Nm³ (mesures ponctuelles, état standard, 10 % de O₂ lors de l'utilisation de déchets). Les filtres à manches atteignant ces niveaux ont une vitesse de filtration variant de <1 à 1,2 m³/m²•min. Les fours rotatifs sont équipés de filtres électrostatiques (ESP). De manière caractéristique, les émissions sont inférieures à 20 mg/m³. Les poussières séparées des filtres à manches ou des ESP sont principalement utilisées comme produit. Les émissions de poussières dans le gaz propre après épurateurs en voie humide et filtres à gravier ont été utilisées en Allemagne et se situaient d'ordinaire dans la plage de 30 à 60 mg/Nm³ mesurée en valeurs moyennes journalières dans des conditions standards. Toutefois, afin d'atteindre un niveau d'émission de poussières inférieur à 20 mg/Nm³, les épurateurs en voie humide et les filtres à gravier ont été remplacés par des filtres à manches. Les mesures indiquent que les valeurs d'émission de poussières ne dépendent pas du type de combustible utilisé, c'est-à-dire qu'il soit d'origine fossile ou issu de déchets. Dans le cas des déchets utilisés comme combustibles, par exemple dans les fours verticaux, la plage d'émissions de poussières varie de <5 à <10 mg/Nm³ en valeurs moyennes journalières [46, Allemagne, 2006].

Hydratation de la chaux

Les effluents gazeux provenant des stations d'hydratation sont d'un volume plutôt restreint ; leurs niveaux se situent à peu près à 800 m³/tonne de chaux hydratée, mais peuvent compter 2 g/m³ de poussières avant traitement. La génération de poussières peut donc atteindre environ 1,6 kg/tonne de chaux hydratée. Pour dépoussiérer les émissions, on utilise à la fois des épurateurs en voie humide et des filtres à manches. La teneur en humidité des émissions peut influencer sur le niveau d'émission. Pour cette raison, on utilise souvent des épurateurs en voie humide dans les stations d'hydratation. En utilisant de nouvelles générations d'épurateurs en voie humide, les niveaux d'émission après traitement varient de 10 à 30 mg/Nm³, ce qui correspond à environ 0,008 à 0,024 kg/tonne de chaux hydratée. Au Royaume-Uni en 2007, trois des épurateurs en voie humide les plus modernes ont donné des résultats de 11 mg/Nm³, 17 mg/Nm³ et 18 mg/Nm³. Cependant, des émissions de poussières atteignant 60 mg/Nm³ ont également été signalées (exprimées dans des conditions humides) [168, TWG CLM, 2007], [177, EULA, 2008].

Broyage de la chaux

L'air est aspiré dans tous les équipements de broyage afin de récupérer la chaux broyée à la granulométrie requise. Le produit est séparé de l'air par des filtres à manches, souvent précédés de cyclones. La récupération des poussières fait donc entièrement partie du procédé. Après réduction, les émissions de poussières se situent de manière caractéristique entre <10 et 50 mg/Nm^3 . En Allemagne, les valeurs d'émission du procédé de broyage de la chaux sont, de manière caractéristique, inférieures à 20 mg/Nm^3 .

Procédés/opérations connexes et annexes

Presque tous les procédés connexes et annexes d'une usine à chaux peuvent générer des émissions de poussières, tels que le concassage, le criblage, le transport, l'extinction, le stockage et le déchargement. L'émission de poussières est limitée par le confinement. L'air est amené à travers des filtres à manches où il est séparé régulièrement, par exemple pour les procédés suivants :

- concasseur primaire/secondaire,
- stockage du calcaire,
- broyeurs pour chaux vive,
- machines de criblage,
- silos de stockage de la chaux vive,
- stockage de combustibles solides (par exemple de lignite pulvérisé)
- manutention de la chaux.

La poussière récupérée est généralement recyclée dans le produit. Le matériel pour le broyage et la manutention de la chaux vive est maintenu sous légère aspiration. Les valeurs d'émission de poussières à partir de ces sources sont signalées comme étant situées dans une plage inférieure à 10 à 20 mg/m^3 , ce qui peut être atteint sans danger.

2.3.3.1.2 Émissions de poussières diffuses

Les émissions de poussières diffuses sont principalement liées au stockage et à la manutention des matières premières, des combustibles et de la chaux, ainsi qu'à la circulation des véhicules sur le site de fabrication. Une implantation simple et linéaire est préférable, car elle permet de minimiser les éventuelles sources d'émissions de poussières diffuses.

Les poussières diffuses émanant, par exemple, des piles de stockage de matières premières et de combustibles solides peuvent être sources de problèmes qui peuvent être réduits en utilisant les mesures/techniques suivantes :

- humidification suffisante des piles de stockage, des points de chargements et des points de déchargement ;
- utilisation de bandes transporteuses à hauteur réglable.

Les transporteurs et les élévateurs sont construits comme des circuits fermés au cas où les matériaux pulvérulents risqueraient de dégager des poussières. Les routes utilisées par les camions dans l'enceinte de l'usine sont revêtues et nettoyées périodiquement afin d'éviter les émissions de poussières diffuses. De plus, de l'eau est également aspergée sur le site des installations. Lorsque cela est possible, des systèmes de stockage fermés sont utilisés. Afin de réduire les émissions de poussières diffuses lors du chargement de la chaux calcinée, un exemple consiste à utiliser des tuyaux de remplissage flexibles équipés d'un système d'extraction de poussière. Ces tuyaux de remplissage flexibles sont équipés de dispositifs d'aspiration qui garantissent un chargement sans poussières. Ils sont placés au niveau du plancher de chargement du camion et montent automatiquement jusqu'à ce que la hauteur de remplissage programmée soit atteinte. Une fois le camion avancé d'environ 30 cm , le tuyau de remplissage flexible est positionné et le chargement redémarre [46, Allemagne, 2006], [66, Autriche, 2006].

2.3.3.2 Oxydes d'azote

Le NO et le NO₂ sont les principaux oxydes d'azote (NO_x) détectés dans les gaz résiduaux des fours rotatifs produisant de la chaux, même s'ils peuvent provenir du combustible au cours de la combustion. Il existe deux principales sources de formation de NO_x :

- les NO_x thermiques sont principalement produits par la réaction à haute température de l'azote et de l'oxygène dans l'air de combustion (NO_x thermiques), un procédé qui dépend en grande partie de la température et des combustibles utilisés ;
- les NO_x combustibles proviennent de la réaction entre les composés azotés présents dans le combustible et l'oxygène de l'air de combustion.

Les NO_x thermiques se forment au-dessus de 1 000 °C, c'est-à-dire dans la zone de chauffe du four, où la température est suffisamment élevée. La quantité de NO_x thermiques produite augmente avec la température et la teneur en oxygène dans la zone de chauffe. Du fait que les fours produisant de la chaux fortement calcinée ou surcuite avec une faible réactivité nécessitent des températures plus élevées dans la zone de chauffe, ils tendent à former une quantité de NO_x thermiques supérieure à celle des fours produisant de la chaux légèrement calcinée avec une réactivité élevée. Du fait de cette dépendance par rapport à la température, les émissions de NO_x dans les fours verticaux sont généralement inférieures à celles dans les fours rotatifs, comme le montre la Figure 2.36.

Les NO_x combustibles sont générés par l'oxydation des composés azotés présents dans le combustible. Selon les conditions de combustion, l'azote du combustible se combine avec d'autres atomes d'azote pour former du N₂ ou réagit avec l'oxygène pour former des NO_x. Dans la zone de chauffe des fours rotatifs, la température est en général assez élevée pour favoriser une certaine oxydation de l'azote du combustible en NO_x combustibles.

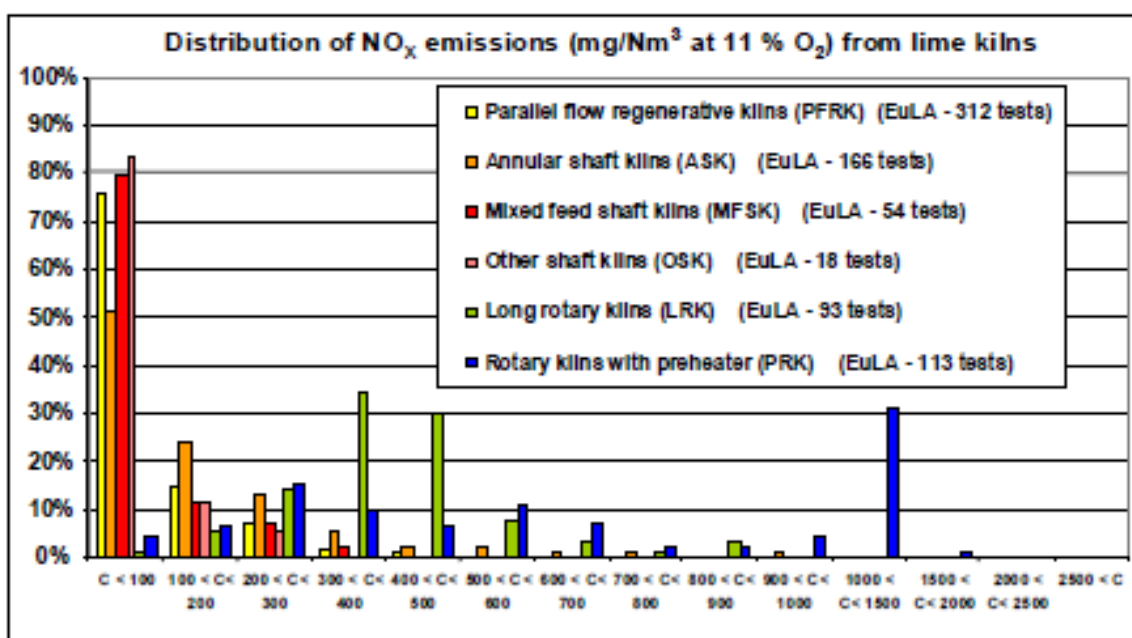


Figure 2.36 : Émissions de NO_x mesurées à partir de différents types de fours à chaux dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure) [129, EuLA, 2006]

Comme le montre la Figure 2.36, les émissions de NO_x des fours rotatifs varient entre 300 et 2 000 mg/Nm³ suivant le type de four, les combustibles utilisés et le type de chaux produite. Les mesures ponctuelles montrent que pour ces essais, 68 % des émissions de NO_x des fours rotatifs sont inférieures à 500 mg/Nm³. Les émissions de NO_x des fours verticaux se situent entre <100 et 500 mg/Nm³ suivant le type de four utilisé et le type de chaux produite. Les mesures ponctuelles montrent que pour ces essais, 60 % des émissions de NO_x des fours verticaux sont inférieures à 100 mg/Nm³.

De plus, environ 80 % des PFRK, des MFSK et des OSK et environ 50 % des ASK atteignent des valeurs d'émission de $\text{NO}_x < 100 \text{ mg/Nm}^3$ mesurées en valeurs moyennes sur une demi-heure.

Fours rotatifs (fours longs rotatifs (LRK) ou fours rotatifs avec préchauffeur (PRK))

La flamme est bien définie et la température est plus élevée que dans les fours verticaux. En raison des procédés de transfert de chaleur, la température maximale des gaz brûlés est également élevée, ce qui provoque un accroissement des niveaux de NO_x thermiques.

La dolomie surcuite est principalement produite dans des fours rotatifs. Le procédé exige des températures plus élevées, générant par conséquent des niveaux de NO_x encore plus élevés.

Les émissions de NO_x par ces fours varient généralement de 300 à 2000 mg/Nm^3 selon le type de chaux/dolomie produite (légèrement à fortement calcinée) et dépendent de la teneur en azote des combustibles, de la température du procédé, de l'excès d'air et du produit fabriqué. Sur la base d'un débit de gaz résiduels spécifique de :

- 5 000 Nm^3/t à 11 % de O_2 pour les LRK,
- 4 000 Nm^3/t à 11 % de O_2 pour les PRK

Le débit spécifique d'oxydes d'azote se situe entre 1,5 et 10 kg/t de chaux pour les LRK et 1,2 et 8 kg/t de chaux pour les PRK.

Fours verticaux (autres fours (OK), à alimentation mixte (MFSK), annulaires (ASK) et verticaux à cycles alternés (PFRK))

Les fours de type vertical émettent moins de NO_x que les fours rotatifs, car la température dans les fours verticaux est généralement inférieure à 1 400 °C, de sorte que la formation de NO_x thermiques est proportionnellement inférieure.

En outre, les procédés de combustion génèrent habituellement des températures de flamme plutôt moins élevées que les fours rotatifs, ce qui s'ajoute aux conditions de mélange de faible intensité pour donner des niveaux inférieurs de NO_x combustibles.

Les émissions de NO_x pour ces fours varient habituellement de 100 à 500 mg/Nm^3 selon le type de chaux/dolomie produite. Sur la base d'un débit de gaz résiduels spécifique de :

- 3 000 Nm^3/t (11 % de O_2) pour les PFRK et les ASK,
- 2 500 Nm^3/t (11 % de O_2) pour les MFSK et les OK,

le débit spécifique d'oxyde d'azote se situe entre 0,3 et 1,5 kg/t de chaux pour les PFRK/ASK et 0,25 et 1,3 kg/t de chaux pour les MFSK/OK.

Cependant, quand des fours verticaux sont utilisés pour produire des chaux calciques fortement calcinées ou de la dolomie surcuite, des niveaux d'émissions de NO_x plus élevés atteignant 2 000 mg/Nm^3 peuvent être observés.

2.3.3.3 Dioxyde de soufre

Durant la majorité des opérations de calcination de la chaux, la chaux vive capture la plus grande partie du soufre présent dans le calcaire et le combustible. Le contact entre les gaz brûlés et la chaux vive assure habituellement une absorption efficace du dioxyde de soufre. On signale des émissions de SO₂ types inférieures à 50 mg/Nm³ en valeur moyenne sur une demi-heure pour les fours à chaux dans l'UE des 27, et celles-ci dépendent du four utilisé pour la production de chaux, comme le montre la Figure 2.37.

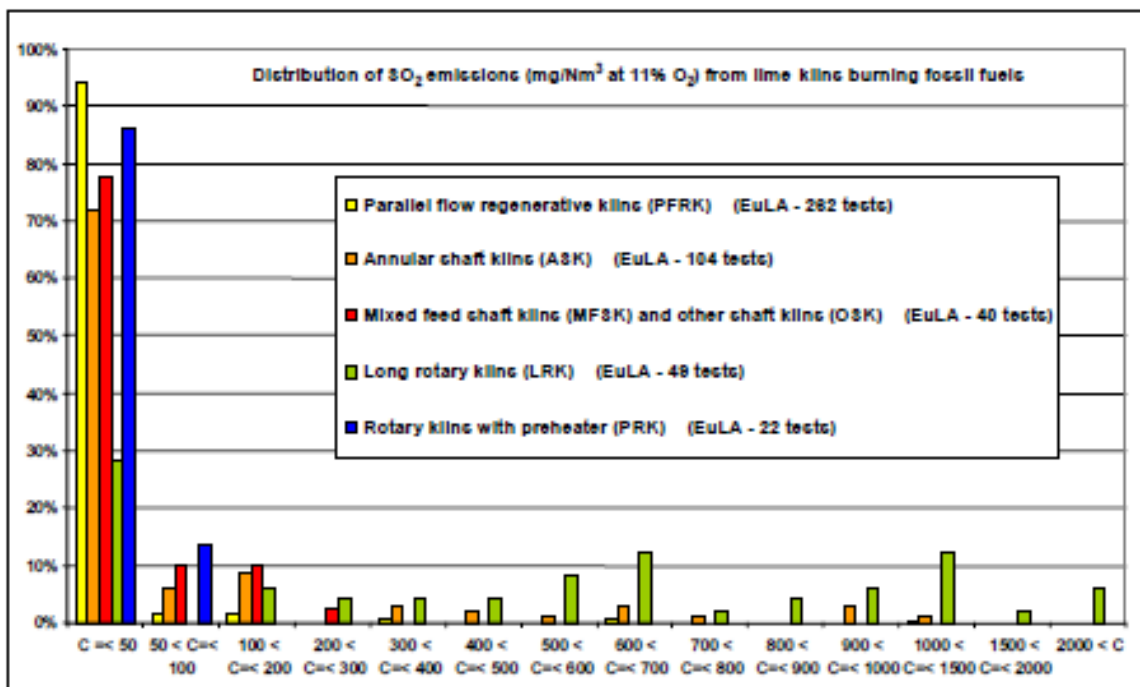


Figure 2.37 : Émissions de SO₂ mesurées à partir de différents types de fours à chaux utilisant des combustibles fossiles dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure) [129, EuLA, 2006]

Comme le montre la Figure 2.37, les émissions de SO_x des fours rotatifs varient entre 50 et 2 000 mg/Nm³ selon le four, le type de combustible utilisé et le type de chaux produite. Les mesures ponctuelles montrent que parmi ces essais, 63 % des émissions de SO_x des fours rotatifs sont inférieures à 500 mg/Nm³. Les émissions de SO_x des fours verticaux varient entre <50 et 1 000 mg/Nm³ suivant le type de four utilisé et le type de chaux produite. Les mesures ponctuelles montrent que parmi ces essais, 87 % des émissions de SO_x des fours verticaux sont inférieures ou égales à 50 mg/Nm³. De plus, les mesures ponctuelles montrent que parmi ces essais, plus de 90 % des émissions de SO_x des PFRK sont <50 mg/Nm³ et que 90 % des émissions de SO_x des OSK sont <200 mg/Nm³ (mesurées en valeurs moyennes sur une demi-heure). En outre, près de 90 % des fours rotatifs avec préchauffeurs (PRK), environ 78 % des fours verticaux annulaires (ASK), les autres fours verticaux (OSK) et les fours verticaux à alimentation mixte (MFSK) atteignent une valeur inférieure ou égale à 50 mg/Nm³ (mesurée en valeur moyenne sur une demi-heure).

Il convient de noter qu'en utilisant des déchets combustibles pour la cuisson, 100 % des PFRK et des ASK, 90 % des PRK et environ 80 % des LRK atteignent des émissions de SO_x inférieures ou égales à 50 mg/Nm³ (mesurées en valeur moyenne sur une demi-heure) Comme le montre la Figure 2.3 8.

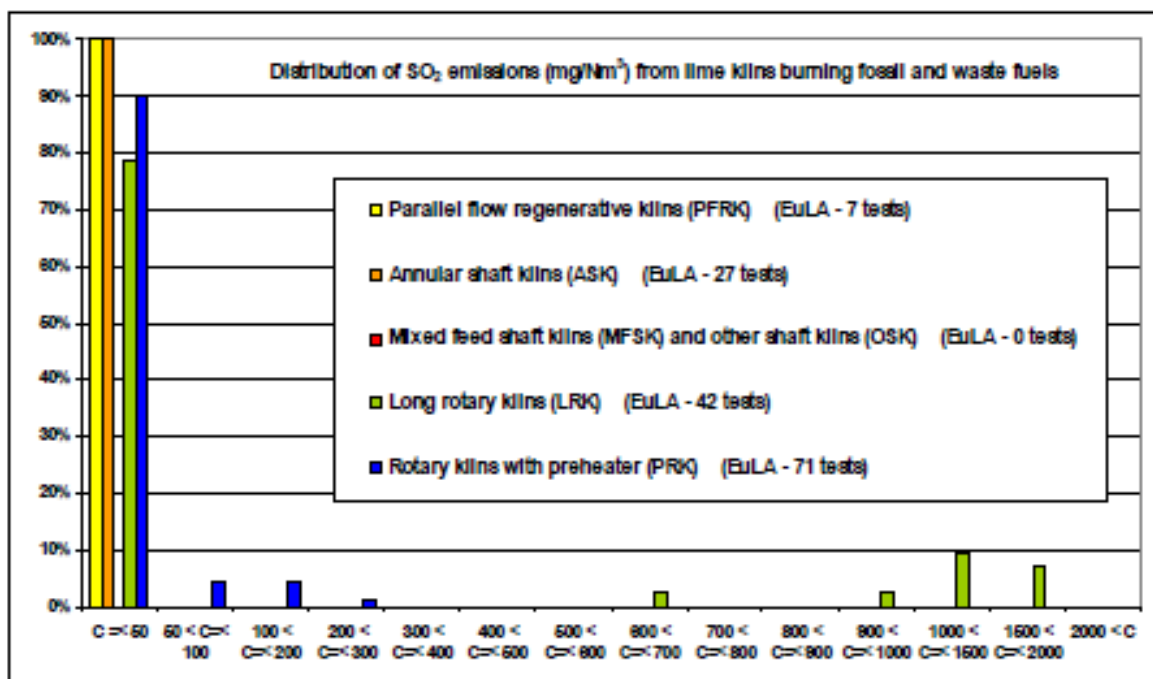


Figure 2.38 : Émissions de SO₂ mesurées à partir de différents types de fours à chaux utilisant des combustibles fossiles et des déchets combustibles pour la cuisson dans l'UE des 27 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure) [129, EuLA, 2006]

Fours longs rotatifs (LRK)

Les fours longs rotatifs ont la capacité de produire de la chaux vive à faible teneur en soufre dans une atmosphère réductrice. Dans ce cas, une partie du soufre du combustible et du calcaire est expulsée principalement dans les gaz d'exhaure sous forme de dioxyde de soufre.

Les émissions de SO_x pour ces fours varient généralement de 50 à 1 500 mg/Nm³ selon le type de combustible utilisé et l'atmosphère réductrice ou oxydante dans le four nécessaire pour différentes qualités de produit. Les émissions plus élevées sont liées à des combustibles à forte teneur en soufre, car l'opérateur ne dispose pas toujours de combustibles à faible teneur en soufre. Sur la base du débit spécifique de gaz résiduaires de 5 000 Nm³/t (11 % de O₂), le débit spécifique d'oxydes de soufre se situe entre 0,3 et 7,5 kg/t de chaux.

Fours rotatifs avec préchauffeur (PRK)

Les fours rotatifs avec un préchauffeur ont également la capacité de produire de la chaux vive à faible teneur en soufre dans une atmosphère réductrice, mais, dans ce cas, une partie du soufre présent dans le combustible est capturée principalement par la chaux et dans les poussières. Par conséquent, les émissions de soufre sont plus faibles que pour les LRK.

Les émissions de SO_x pour ces fours varient généralement de 50 à 400 mg/Nm³ selon le type de combustible utilisé et l'atmosphère réductrice ou oxydante dans le four nécessaire pour différentes qualités de produit. Sur la base du débit spécifique de gaz résiduaires de 4 000 Nm³/t (11 % de O₂), le débit spécifique d'oxydes de soufre se situe entre 0,2 et 1,6 kg/t de chaux.

Fours verticaux (autres fours (OK), à alimentation mixte (MFSK), annulaires (ASK) et verticaux à cycles alternés (PFRK))

Dans les fours verticaux, le contact entre les gaz du four et la chaux vive assure habituellement une absorption efficace du dioxyde de soufre (ce qui peut donner de la chaux vive à forte teneur en soufre avec un combustible à forte teneur en soufre).

Les émissions de SO_x pour ces fours varient généralement de 50 à 400 mg/Nm^3 selon le type de combustible utilisé, excepté pour les ASK pour lesquels le maximum est de 1 000 mg/Nm^3 . Sur la base d'un débit de gaz résiduaires spécifique de :

- 3 000 Nm^3/t (11 % de O_2) pour les PFRK et les ASK,
- 2 500 Nm^3/t (11 % de O_2) pour les MFSK et les OK,

le débit spécifique de soufre se situe entre 0,2 et 1,2 kg/t de chaux pour les PFRK/ASK et 0,1 et 1,0 kg/t de chaux pour les MFSK/OK.

2.3.3.4 Oxydes de carbone (CO_x)

2.3.3.4.1 Dioxyde de carbone (CO_2)

Le CO_2 émis est déterminé et déclaré comme un gaz à effet de serre. Les émissions de CO_2 de l'industrie de la chaux font partie du système d'échange de quotas d'émissions (ETS). Le lecteur trouvera des informations concernant les émissions de CO_2 et le système d'échange européen du carbone dans la Directive 2003/87/EC du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre et modifiant la Directive 96/61/EC du Conseil [99, Commission européenne, 2003].

La réaction minéralogique de base dans la fabrication de chaux/dolomie peut être exprimée par :

- chaux : $\text{CaCO}_3 + \text{énergie} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \text{ procédé} + \text{CO}_2 \text{ combustion}$
- dolomie : $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 + \text{énergie} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{MgO} + 2\text{CO}_2 \text{ procédé} + \text{CO}_2 \text{ combustion}$

(CO_2 procédé) déterminé à partir de la production de chaux/dolomie

(CO_2 combustion) déterminé à partir de la consommation d'énergie

Le Tableau 2.25 présente les quantités de CO₂ du procédé et de la combustion, par type de four.

Type de four ¹⁾	Tonne de CO ₂ de procédé par tonne de chaux (CaO) ²⁾	Tonne de CO ₂ de procédé par tonne de dolomie (CaO.MgO) ²⁾	Tonne de CO ₂ de combustion par tonne de chaux/dolomie	Émissions de CO ₂ de l'activité totale
Four long rotatif (LRK)	0,785	0,913	0,31 – 1,062	Chaux 1,150 – 1,847 Dolomie 1,278 – 1,975
Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	0,785	0,913	0,21 – 0,617	Chaux 1,054 – 1,402 Dolomie 1,182 – 1,530
Four vertical à cycles alternés (PFRK)	0,785	0,913	0,21 – 0,425	Chaux 0,987 – 1,210 Dolomie 1,115 – 1,338
Four vertical annulaire (ASK)	0,785	0,913	0,21 – 0,465	Chaux 1,009 – 1,250 Dolomie 1,137 – 1,378
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	0,785	0,913	0,21 – 0,708	Chaux 1,009 – 1,493 Dolomie 1,137 – 1,621
Autres fours (OK)	0,785	0,913	0,21 – 0,508	Chaux 1,009 – 1,291 Dolomie 1,137 – 1,419
1) Le type de four dépend de la qualité de produit requise, de la qualité et de la granulométrie d'origine du calcaire. 2) Émissions de CO ₂ de procédé définies par les guides UNFCCC IPCC. Le lecteur trouvera d'autres informations dans les « 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3, Industrial Processes and Product Use ».				

Tableau 2.25 : Facteurs d'émissions de CO₂ par différents types de fours dans l'industrie de la chaux [54, EuLA, 2006]

Jusqu'à 2008, les émissions de dioxyde de carbone par tonne de chaux vive ont été réduites dans la plupart des pays de l'UE des 27, non seulement en remplaçant les vieux fours par des configurations de plus grand rendement thermique, mais aussi en améliorant l'utilisation de l'énergie (par exemple, par un meilleur contrôle des procédés) et en augmentant la productivité (par exemple en réduisant la quantité de poussières résiduelles).

2.3.3.4.2 Monoxyde de carbone (CO)

La Figure 2.39 représente les émissions de CO types des usines à chaux. Les émissions de CO des fours à chaux se situent entre moins de 100 et 2 500 mg/Nm³ suivant le type de four et le type de combustible utilisé. Environ 50 % des résultats des essais ponctuels indiquent des valeurs d'émission de CO inférieures à 100 mg/Nm³.

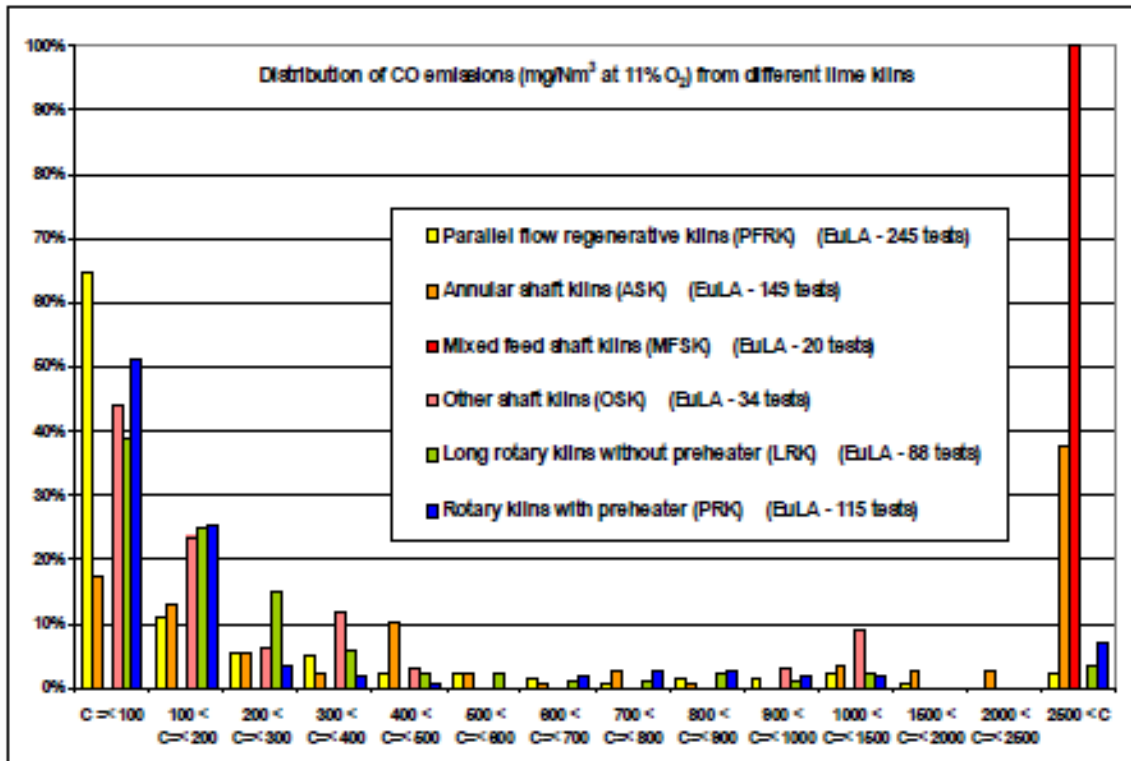


Figure 2.39 : Émissions de CO par différents types de fours à chaux dans l'UE des 27 [129, EuLA, 2006]

Les expériences menées sur des fours à chaux montrent qu'en utilisant l'oxydation thermique, des concentrations de CO de 2 % en volume peuvent être gérées sans danger. Cependant, la concentration des émissions de CO dans les gaz propres est toujours <100 mg/Nm³ [142, EnvNGO/Tebert, 2007].

La concentration de CO est mesurée au bas de la cheminée. Lorsqu'il pénètre dans l'atmosphère, le CO sera rapidement oxydé en CO₂ et dispersé.

Lorsque les émissions de monoxyde de carbone (CO) résultent d'une combustion incomplète, ils représentent généralement une perte de rendement. L'opérateur a donc tendance à limiter les émissions de CO de ses fours.

Fours rotatifs

Les émissions de CO sont contrôlées en permanence à l'extrémité du tube, du côté des gaz d'exhaure. Les émissions de CO sont liées à la qualité de chaux visée lorsque du soufre est présent dans le calcaire et/ou le combustible.

Les émissions de CO pour ces fours varient habituellement de 100 à 400 mg/Nm³ selon le type de combustible utilisé. Sur la base d'un débit de gaz résiduaux spécifique de :

- 5 000 Nm³/t à 11 % de O₂ pour les LRK,
- 4 000 Nm³/t à 11 % de O₂ pour les PRK,

Le débit spécifique de monoxyde de carbone se situe entre 0,5 et 2,0 kg/t de chaux pour les LRK et 0,4 et 1,6 kg/t de chaux pour les PRK.

Fours verticaux (autres fours (OK), à alimentation mixte (MFSK), annulaires (ASK) et verticaux à cycles alternés (PFRK))

Du fait de leur configuration de base, les fours verticaux annulaires (ASK) sont utilisés avec un excès d'oxygène dans le brûleur inférieur et dans des conditions stœchiométriques dans le brûleur supérieur. Par conséquent, les émissions varient de manière caractéristique de 100 à 2 500 mg/Nm³. Sur la base du débit spécifique de gaz résiduaires de 3 000 Nm³/t (11 % de O₂), le débit spécifique de monoxyde de carbone se situe entre 0,3 et 7,5 kg/t de chaux.

Pour les autres fours verticaux (OSK), la quantité de mesures ne donne pas de plages cohérentes pour les émissions de CO qui doivent être mentionnées.

Pour les fours verticaux à alimentation mixte, il convient de noter que, contrairement aux autres procédés de combustion, le niveau d'émission de CO des fours à chaux n'indique pas nécessairement une combustion incomplète. Les conditions de fonctionnement des fours à chaux sont toujours déterminées par les exigences des produits, c'est-à-dire par les propriétés requises pour la chaux calcinée. Du fait que des émissions de CO plus élevées correspondent à une consommation d'énergie supérieure par le four (+1 % de CO dans les gaz résiduaires représente une consommation d'énergie supplémentaire d'environ 200 kJ/kg de chaux), les fours à chaux sont habituellement exploités de façon à maintenir les émissions de CO aussi faibles que possible, suivant les produits particuliers. Dans l'industrie allemande de la chaux en général, le niveau de CO dans les gaz résiduaires est maintenu à une valeur inférieure à 3 % par des mesures/techniques d'optimisation des procédés. Afin de réduire les émissions de CO, l'optimisation des procédés est la seule solution [46, Allemagne, 2006]. De plus, pour les fours verticaux à alimentation mixte, des émissions de CO entre 1 et 6 % peuvent être observées lors de la fabrication de certains produits. Dans ce cas, des niveaux de monoxyde de carbone contrôlés sont nécessaires pour obtenir la qualité de produit requise. Cependant, certaines applications de chaux nécessitent de la chaux fortement calcinée qui est principalement produite dans des fours verticaux à alimentation mixte. Les émissions de CO des fours verticaux à alimentation mixte sont déterminées par la réaction dite de Boudouard représentée sur la Figure 2.40.

Pour les fours verticaux à cycles alternés (PFRK), des pics de CO très courts apparaissent au début des cycles. A la fin du cycle, l'injection de combustible est arrêtée et avant « l'inversion de sens », seul de l'air est injecté pendant une certaine période afin de s'assurer que tout le combustible a été brûlé. L'expérience montre que, malgré cela, une faible quantité de combustible peut subsister sous les lances. Après l'inversion de sens, il continue à brûler dans des conditions défavorables, produisant un « pic » de CO.

Les émissions de CO pour ces fours varient habituellement de 100 à 400 mg/Nm³ selon le type de combustible utilisé. Sur la base du débit spécifique de gaz résiduaires de 3 000 Nm³/t (11 % de O₂), le débit spécifique de monoxyde de carbone se situe entre 0,3 et 1,2 kg/t de chaux.

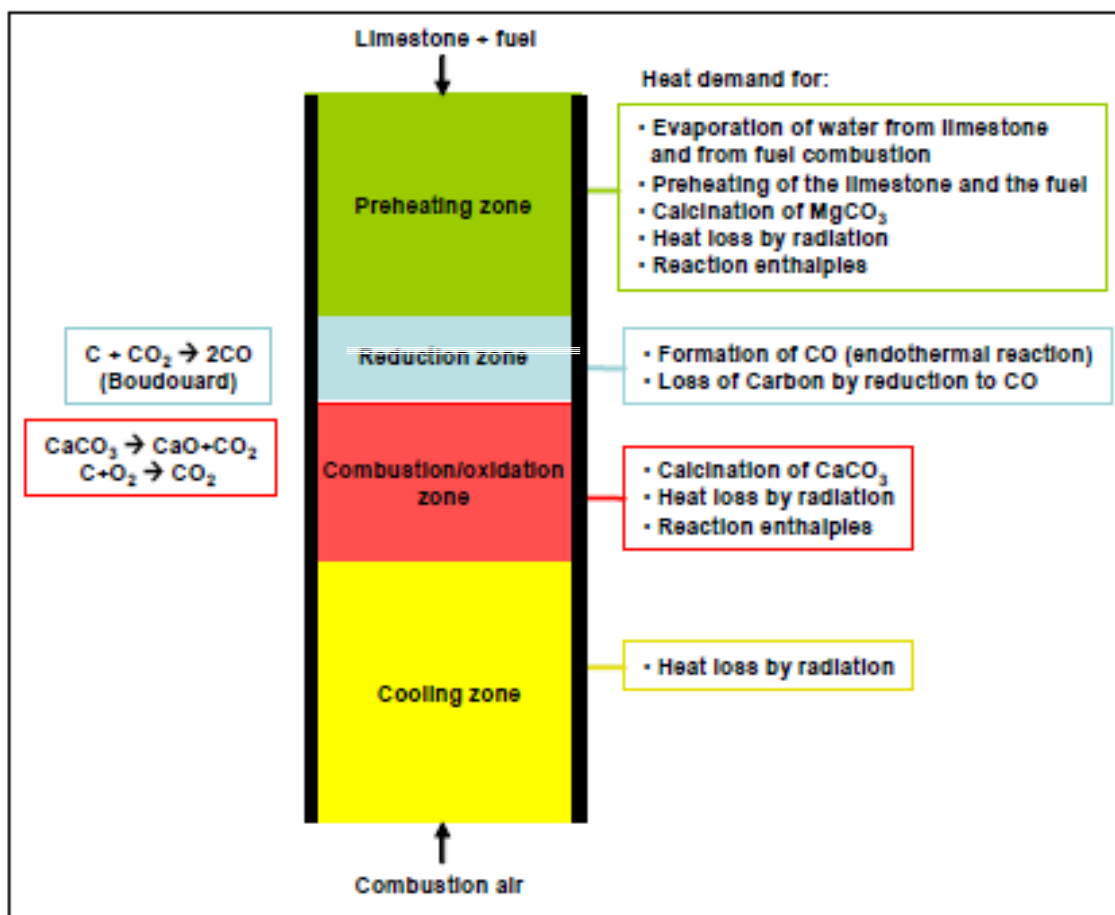


Figure 2.40 : Réactions chimiques et utilisation d'énergie dans un four vertical à alimentation mixte (réaction de Boudouard)
[46, Allemagne, 2006]

La réaction de Boudouard est principalement déterminée par le profil de température du combustible dans l'atmosphère exempte d'oxygène. Les autres facteurs pertinents sont la granulométrie, la réactivité du combustible, l'homogénéité des matières, la vitesse de l'air et la teneur en CO_2 initiale. Le taux de génération de CO augmente en fonction de la température dans la zone de réduction. Par conséquent, la prévention des émissions de CO par les fours verticaux à alimentation mixte peut être difficile, voire impossible [46, Allemagne, 2006].

Production de chaux hydrauliques

Certaines pierres à chaux contiennent du carbone, ce qui peut également conduire à des émissions de CO plus élevées par le procédé de cuisson de la chaux, comme dans le cas des usines de production de chaux hydrauliques naturelles (cf. Section 2.2.2.) utilisant des OSK dans lesquelles le calcaire contient 65 – 90 % de $CaCO_3$ et de $MgCO_3$. La pureté de cette matière première est différente de celle des matières premières qui sont utilisées pour la production d'autres types de chaux. Au cours des mesures périodiques (deux fois par an) entre 2003 et 2006, des valeurs d'émission de CO situées entre 5 904 et 12 560 mg/Nm^3 (mesure ponctuelle, 8 % de O_2 , état de référence) ont été enregistrées (respectivement 4 541 – 9 555 mg/Nm^3 à 11 % de O_2) [128, Portugal, 2007].

2.3.3.5 Composés organiques/carbone organique total (COT)

De manière caractéristique, les émissions de COV sont mesurées comme le carbone organique total (COT). Une analyse spécifique a montré qu'une partie du COT provenait essentiellement du méthane, cependant, le benzène est également apparu comme résultat de mesure. Avec des fours verticaux à alimentation mixte, on observe 80 – 90 % de méthane et 2 % de benzène dans les émissions [46, Allemagne, 2006] [54, EuLA, 2006]. La Figure 2.41 représente les émissions de composés organiques caractéristiques mesurées en tant que carbone organique total (COT) pour différents types de fours à chaux (LRK, PFRK, ASK).

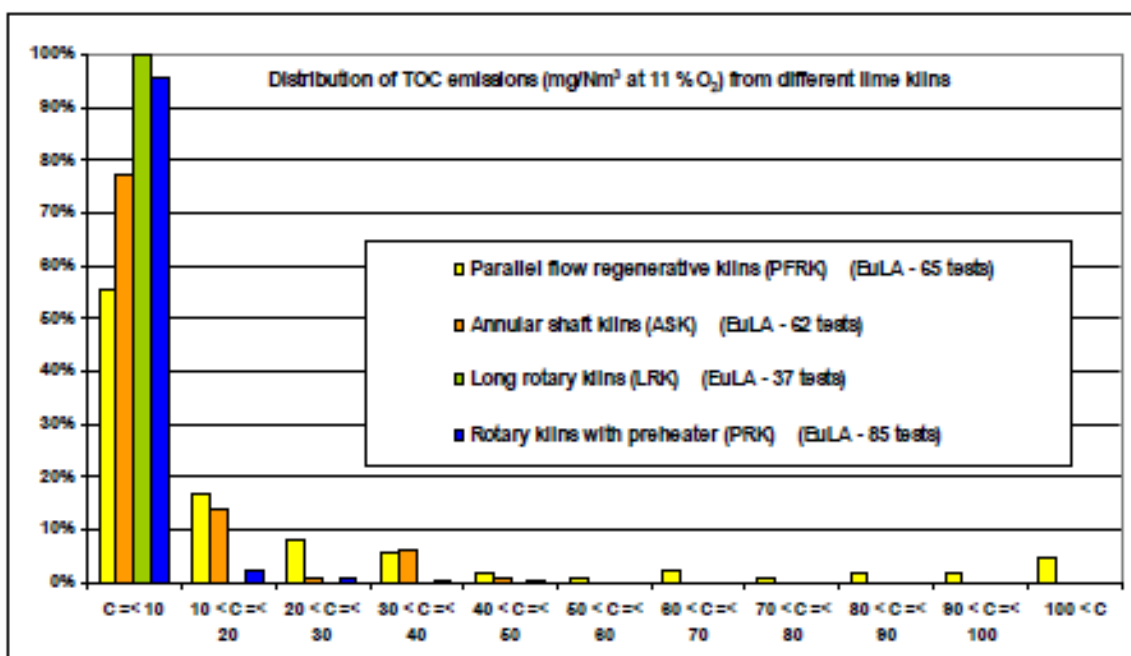


Figure 2.41 : Émissions de COT par différents types de fours à chaux dans l'UE des 27 [129, EuLA, 2006]

Les émissions de COV sont souvent liées aux émissions de CO, dues à la combustion incomplète du combustible. Du fait que l'exploitant a tendance à limiter les émissions de CO des fours, les émissions de COV restent généralement faibles. Dans un nombre très limité de cas où la matière première de calcaire contient de la matière organique jusqu'à une teneur de 0,1 %, on peut trouver des émissions continues de composés organiques volatils.

Pour tous les types de four hormis les fours verticaux à cycles alternés (PFRK) et les fours verticaux à alimentation mixte (MFSK), ces émissions surviennent pendant de courtes périodes au démarrage ou dans des conditions anormales, conduisant ainsi à des émissions inférieures à 10 mg/Nm³ (eqC). Pour les PFRK, le procédé comprend des changements de conditions de combustion toutes les 10 à 12 minutes. Par conséquent, les niveaux d'émission de COV sont légèrement supérieurs à ceux observés pour les autres types de four. Avec des MFSK plus anciens, des émissions de COT plus élevées peuvent survenir en raison des conditions de procédé particulières qui existent dans la partie supérieure du four (zones réductrices).

Production de chaux hydrauliques

La situation d'émission dans le cas de la production de chaux hydrauliques naturelles est différente. La pureté de la matière première utilisée est différente de celle de la matière première qui est utilisée pour la production d'autres types de chaux. La teneur élevée en matière organique dans la matière première est due à la fossilisation d'organismes dans la matière au lieu de leur conversion en dioxyde de carbone et en eau au fil des siècles.

La teneur en matière organique (exprimée en COT) se situe dans une plage caractéristique de 0,8 à 5 %. Une étude de cas de 2005 montre que, lorsque la teneur en matière organique de la matière première se situait entre 2,8 et 5 %, la teneur en COT dans le produit calciné se situant entre 0,7 et 1,2 %. Dans un nombre très limité de cas où le calcaire contient une quantité importante de matière organique, on peut trouver des émissions continues de carbone organique volatil (exprimé en COT). Au cours des mesures périodiques (deux fois par an) entre 2003 et 2006, des valeurs d'émission de COT situées entre 593 et 2 169 mg/Nm³ (mesure ponctuelle, 8 % de O₂, état standard) ont été enregistrées (respectivement 456 – 1 668 mg/Nm³ à 11 % de O₂) [127, Portugal, 2007].

2.3.3.6 Polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzofuranes (PCDF)

Les matières premières ou les combustibles qui contiennent des chlorures peuvent potentiellement provoquer la formation de PCDD/F dans les zones de procédé où la température se situe dans une plage de 300 à 450 °C.

D'après le document intitulé *Identification des sources industrielles pertinentes d'émissions de dioxines et de furanes en Europe*, les usines de production de chaux entrent pour une part minime dans le total des émissions de dioxines et de furanes en Europe [31, LUA NRW, 1997].

L'industrie de la chaux a procédé à des mesures, dont la plupart à des fins internes, dans le but d'avoir une meilleure vision globale de la situation des PCDD/F. Les données disponibles en 2006 étaient tout à fait représentatives de la production de chaux dans l'UE des 27, ainsi qu'indiqué dans le Tableau 2.26.

Type de four	Émissions moyennes de PCDD/F (ng I-TEQ/Nm ³ (11 % de O ₂))	Nombre de fours contrôlés	Nombre total de fours dans l'UE des 27	Pourcentage (%)
Four long rotatif (LRK)	0,0638	11	25	44
Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	0,0698	15	20	75
Four vertical à cycles alternés (PFRK)	0,0198	45	149	30
Four vertical annulaire (ASK)	0,0155	40	77	52
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	0,0532	25	115	22
Autres fours (OK)	0,0050	1	158	0.6

Tableau 2.26 : Émissions moyennes de PCDD/F pour différents types de fours dans l'UE des 27 [54, EuLA, 2006]

2.3.3.7 Chlorure d'hydrogène et fluorure d'hydrogène (HCl et HF)

Le Tableau 2.27 présente des exemples d'émissions de HCl et de HF caractéristiques pour différents types de fours à chaux.

Type de four	mg de HCl/Nm ^{3 1)}	mg de HF/Nm ^{3 1)}
Chaux vive (légèrement à fortement calcinée)		
Four long rotatif (LRK)	<5 – <50	<1
Four rotatif avec préchauffeur (PRK) ²⁾	<5 – <20	<1
Four vertical à cycles alternés (PFRK)	<10	<1
Four vertical annulaire (ASK)	<20 – <40	<2
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	<15 – <20	<1
Autres fours (OK)	<10	<1
Dolomie (légèrement calcinée à frittée)		
Four long rotatif (LRK)	<150	<1
Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	<30	<1
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	<20	<1
Utilisation des déchets		
Types de four différents	103)	13)
	604)44)	
1) Les concentrations d'émission sont mesurées en valeurs moyennes sur une demi-heure pour 10 % de O ₂ pour rendre les valeurs comparables 2) Four rotatif avec préchauffeur à grilles 3) Valeur moyenne journalière 4) Valeur moyenne sur une demi-heure		

Tableau 2.27 : Émissions types de HCl et de HF par différents types de fours à chaux dans l'UE des 27 [46, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

Le comportement du HCl dans les fours à chaux est très proche de celui du SO₂. Par conséquent, durant la majorité des opérations de calcination de la chaux, la plus grande partie du chlore qui est présent dans la matière première (calcaire) et le combustible est capturée par la chaux vive. Le contact efficace entre les gaz du four et la chaux vive/dolomie assure habituellement une absorption efficace du HCl. Cela est particulièrement vrai pour les fours verticaux dans lesquels il existe un contact efficace entre les gaz du four et la chaux/dolomie. Cependant, les émissions de HCl par les fours verticaux dépendent principalement de la teneur en composés chlorés dans le calcaire. Les émissions de HCl ont tendance à être plus élevées lorsque du calcaire sec est calciné. Dans certains cas, les émissions de HCl peuvent être réduites en injectant de l'eau dans les gaz résiduels.

Du fait que la teneur en chlore est plus élevée dans la dolomie (100 à environ 1 000 ppm) que dans le calcaire (10 à 150 ppm), les émissions de HCl associées sont, en général, plus élevées dans le cas de la production de dolomie. Pour les fours rotatifs produisant de la dolomie, il a donc été observé que ces émissions pouvaient dépasser une valeur d'émission de 10 mg/Nm³ (seuil de la WID), même si aucun combustible chloré n'avait été utilisé [59, Commission européenne, 2000].

La Figure 2.42 présente la répartition des émissions caractéristiques de HCl pour différents types de fours à chaux (LRK, PFRK, ASK).

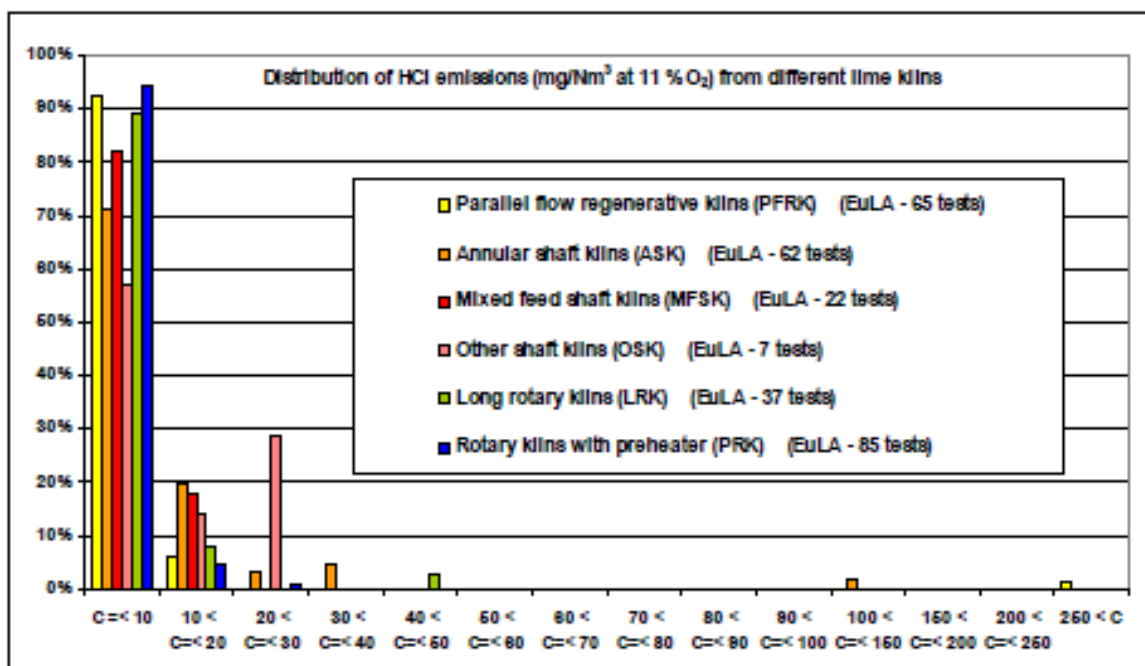


Figure 2.42 : Émissions de HCl par différents fours à chaux dans l'UE des 27 [129, EuLA, 2006]

Dans certains cas, en utilisant les déchets comme combustibles et/ou matières premières, des valeurs d'émission de 10 mg/Nm³ pour le HCl et de 1,0 mg/Nm³ pour le HF sont fixées comme valeurs moyennes journalières (teneur en oxygène de 10 %). Ces niveaux d'émission doivent également être maintenus au cours des mesures ponctuelles ou périodiques [46, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007].

2.3.3.8 Sulfure d'hydrogène (H₂S)

En raison des conditions fortement réductrices présentes dans la partie supérieure des fours verticaux à alimentation mixte, les émissions de H₂S ne sont générées que par ce type de four. Des émissions atteignant 20 mg/Nm³ ont été observées.

Cependant, aucun lien n'a été établi entre la teneur en soufre de l'alimentation du four, telle que les pierres et le combustible, et les émissions de H₂S. Cela est dû au fait qu'une partie du soufre (dans l'alimentation du four) est présente sous forme réduite, par exemple sous forme de pyrite, de soufre organique ou du soufre élémentaire, tandis que le reste est présent sous forme oxydée, par exemple sous forme de sulfate. La proportion des deux n'est habituellement pas connue, car l'analyse de soufre caractéristique indique uniquement le total de l'ensemble. Toutefois, durant les procédés chimiques qui surviennent au sommet du four vertical à alimentation mixte, seules les formes réduites ou élémentaires du soufre conduisent à la formation de H₂S [46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006].

2.3.3.9 Métaux

D'importantes quantités de données sont maintenant disponibles pour les métaux suivants : l'antimoine, l'arsenic, le cadmium, le chrome, le cobalt, le cuivre, le plomb, le manganèse, le mercure, le nickel, le sélénium, le tellure, le thallium, le vanadium et le zinc. De plus, en utilisant des déchets, des émissions de métaux peuvent également survenir, ainsi que le montre l'exemple de la Section 4.3.4 (cf. Tableau 4.40).

Le Tableau 2.28 présente les données relatives aux émissions de métaux dans l'UE des 27. Dans ce tableau, les résultats (C) font référence à une teneur en oxygène de 11 % et correspondent à la compilation des métaux sous forme de vapeur et sous forme de particules. Dans les cas où la concentration mesurée était inférieure à la limite de détection, il a été supposé que le résultat était égal à cette limite. Pour conclure concernant la plupart de ces mesures, les émissions sont inférieures aux limites de détection de l'analyse même dans le cas de l'utilisation de déchets combustibles. Par conséquent, les valeurs d'émission se situent dans une plage de 0,01 à 0,1 mg/Nm³. Pour le plomb et le zinc, dans des cas spécifiques d'émissions de poussières plus élevées, on peut observer des valeurs atteignant jusqu'à 0,40 mg/Nm³.

Les chiffres détaillés concernant la répartition des différents types de concentrations de métaux dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27 sont indiqués dans la Section 4.3.1 [56, EuLA, 2006].

Métaux	Résultats des émissions de métaux (C) en mg/Nm ³										
	C<0,010	0,010<C<0,020	0,010<C<0,030	0,010<C<0,040	0,010<C<0,050	0,010<C<0,060	0,010<C<0,070	0,010<C<0,080	0,010<C<0,090	0,010<C<0,100	0,100<C
Arsenic (As)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	283	7	1	1	0	0	1	1	1	1	2
Cadmium (Cd)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	279	30	9	8	0	1	0	0	0	0	2
Cobalt (Co)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	248	15	1	0	3	1	0	0	0	0	0
Chrome (Cr)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	242	30	13	13	3	1	0	0	0	0	2
Cuivre (Cu)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	254	20	6	4	1	5	7	1	1	0	3
Mercure (Hg)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	237	27	10	6	3	0	0	0	0	0	3
Manganèse (Mn)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	206	25	11	6	5	3	3	2	1	0	13
Nickel (Ni)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	230	36	19	14	4	0	4	0	1	0	5
Plomb (Pb)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	292	21	9	1	2	1	1	0	0	0	3
Antimoine (Sb)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	255	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Sélénium (Se)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	139	3	5	0	0	1	0	0	0	0	0
Étain (Sn)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	145	33	5	5	2	4	2	0	0	2	9
Tellure (Te)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	124	6	2	0	0	0	0	0	0	0	1
Thallium (Tl)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	159	40	18	10	1	1	0	0	0	1	0
Vanadium (V)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	210	19	2	1	0	1	0	0	0	0	11
	Résultats des émissions de métaux (C) en mg/Nm ³										
	C<0,1	0,1<C<0,2	0,2<C<0,3	0,3<C<0,4	0,4<C<0,5	0,5<C<0,6	0,6<C<0,7	0,7<C<0,8	0,8<C<0,9	0,9<C<1	1<C
Zinc (Zn)											
Tous types de combustibles, fours, systèmes de dépoussiérage	184	14	11	5	1	3	1	0	2	0	9

Tableau 2.28 : Nombre d'usines atteignant différents niveaux d'émissions de métaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

2.3.3.10 Impact de l'utilisation de déchets sur le comportement des émissions

2.3.3.10.1 Exemples d'émissions dans l'utilisation d'huile usagée.

Une usine allemande servant d'exemple montre des résultats d'analyse caractéristiques pour les émissions générées par un four vertical utilisant de l'huile usagée comme combustible. Ce four vertical est équipé d'un filtre à manches. Dans les 10 chambres de combustion d'un four vertical annulaire, la température caractéristique varie de 1 140 à 1 300 °C. L'huile usagée incinérée est fournie par une installation spéciale de collecte et de mélange des huiles usagées. Avant l'alimentation du brûleur en huile usagée, celle-ci passe à travers un tamis de filtration d'une largeur de maille de 200 µm. Le Tableau 2.29 présente la qualité de l'huile usagée (pouvoir calorifique d'environ 0,030 – 0,039 GJ/kg et teneur en eau d'environ 4 - 13 % en poids) incinérée dans le four vertical annulaire. Ce tableau montre les résultats d'analyse caractéristiques de 2002.

Polluant	Unité	Teneur caractéristique en polluants dans l'huile usagée après filtration (200 µm) ¹⁾
Soufre	% en poids	0,34 – 0,55
Chlore total	% en poids	0,03 – 0,04
Hg	mg/kg	<0,05
Cd	mg/kg	0,2 – 0,3
Ti	mg/kg	<0,5
Métaux		
m Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Ni, Mn, V, Sn	mg/kg	42 – 244
m 6 PCB 28, 52, 101, 153, 138, 180	mg/kg	<1
1. Résultats d'analyse caractéristiques de 2002		

Tableau 2.29 : Résultats types d'analyse de la qualité des huiles usagées utilisées dans les fours verticaux en Allemagne
[46, Allemagne, 2006]

Le Tableau 2.30 montre les résultats allemands des mesures d'émission individuelles de 2002. L'huile usagée a été le seul combustible utilisé durant les mesures.

Paramètre	Unité	Plage des mesures individuelles sur une demi-heure
Poussières	mg/Nm ³	1 – 11
COT/COV	mg/Nm ³	<4
CO	g/Nm ³	0,06 – 1,2
NO _x	mg/Nm ³	110 – 240
SO ₂	mg/Nm ³	1–13
HF	mg/Nm ³	<0,2
HCl	mg/Nm ³	11 – 19
PCDD/F	ng I-TEQ/Nm ³	<0,004 ¹⁾
Métaux lourds,		
Σ Cd, Ti	mg/Nm ³	<0,0 1
Hg	mg/Nm ³	<0,0 1
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Ni, Mn, V, Sn	mg/Nm ³	<0,04
Teneur en oxygène 10 %, 273,15 K, 101,3 kPa, gaz sec		
1) Pour les PCDD/F, la période d'échantillonnage est de 6 heures		

Tableau 2.30 : Mesures d'émissions individuelles provenant d'un four vertical allemand utilisant de l'huile usagée
[46, Allemagne, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

Les recherches ont montré que les émissions de métaux étaient très faibles, quels que soient le type de four et le combustible incinéré. Les mesures pour tous les types de four ont montré des valeurs caractéristiques pour le cadmium (Cd) dans une plage de $<0,001 - 0,05 \text{ mg/Nm}^3$. Pour l'ensemble des métaux arsenic (As), plomb (Pb), chrome (Cr), cuivre (Cu), nickel (Ni), sélénium (Se) et tellure (Te), on a observé des niveaux d'émission caractéristiques des fours verticaux dans une plage de $0,01$ à $0,04 \text{ mg/Nm}^3$. Dans les fours rotatifs, les émissions des métaux arsenic (As), plomb (Pb), chrome (Cr), cuivre (Cu), nickel (Ni), sélénium (Se) et tellure (Te) ont été plus élevées dans certains cas, atteignant $0,16 \text{ mg/Nm}^3$. Les émissions de mercure de tous les types de four ont en général été $<0,05 \text{ mg/Nm}^3$. Il convient d'être particulièrement attentif à l'éventuelle contamination des déchets combustibles utilisés par le mercure (par exemple, les déchets de bois). En raison de la volatilité du mercure, des émissions de mercure plus élevées significatives peuvent survenir. Par conséquent, l'apport de mercure à travers les déchets combustibles doit être limité.

Concernant l'utilisation des déchets, il a été observé que les émissions de mercure mesurées étaient inférieures à $0,03 \text{ mg/Nm}^3$ en valeur moyenne journalière ou $0,05 \text{ mg/Nm}^3$ en valeur moyenne sur une demi-heure. Pour l'ensemble du cadmium et du thallium, il a été observé que les émissions mesurées étaient inférieures à $0,05 \text{ mg/Nm}^3$ en valeur moyenne sur une demi-heure et pour la somme de l'arsenic, du cobalt, du chrome, du cuivre, du manganèse, du plomb, de l'antimoine, de l'étain et du vanadium, il a été observé que les émissions mesurées étaient inférieures à $0,5 \text{ mg/Nm}^3$ en valeur moyenne sur une demi-heure (teneur en oxygène de 10 %) [46, Allemagne, 2006].

2.3.3.10.2 Exemples d'émissions liées à l'utilisation de déchets solides dans des fours rotatifs

Dans quatre fours rotatifs d'une usine d'Allemagne servant d'exemple, des déchets solides ont été utilisés. Les types de déchets solides sélectionnés et utilisés dépendent des exigences techniques du procédé de chauffe et de la qualité du produit. A titre d'exemple, le contrôle qualité de ces déchets solides est décrit dans la Section 4.3.4. Tous les fours rotatifs utilisent des techniques de réduction d'émission, par exemple des cyclones, un ESP pour la réduction des émissions de poussières et la technique SNCR pour la réduction des émissions de NO_x .

Les émissions et facteurs de référence suivants sont mesurés en continu au niveau des cheminées des fours :

- les poussières (y compris PM_{10}),
- les oxydes d'azote (NO_x),
- les oxydes de soufre (SO_2) (démarré en 2007)
- le débit des gaz résiduels,
- l'humidité des gaz résiduels,
- la pression des gaz résiduels,
- la température des gaz résiduels,
- la teneur en oxygène.

Les instruments de mesure et les unités d'analyse sont conformes à la norme DIN/ISO 14181. Les valeurs mesurées sont enregistrées et transférées en ligne à l'autorité de contrôle. Le Tableau 2.31 indique les mesures en continu des poussières et des NO_x enregistrées en 2006. La division des périodes de mesure est due à des changements dans la législation nationale. Jusqu'à la fin de l'année 2006, les SO_x étaient mesurés périodiquement et les mesures en continu des SO_x ont démarré au début de l'année 2007.

Paramètre	Unité	Valeur d'émission (moyenne annuelle)
Janvier à octobre 2006		
Poussières	mg/Nm ³	6,1
NOx ¹⁾	mg/Nm ³	376
NOx ²⁾	mg/Nm ³	737
Novembre à décembre 2006		
Poussières	mg/Nm ³	4,1
NOx ³⁾	mg/Nm ³	366
1) Production de chaux légèrement calcinée 2) Production de chaux moyennement et fortement calcinée 3) Production de chaux légèrement, moyennement et fortement calcinée		

Tableau 2.31 : Mesures d'émissions effectuées en continu en 2006 sur un four rotatif allemand utilisant des combustibles solides
[156, Allemagne, 2007, 164, Rheinkalk, 2007]

Concernant encore la législation nationale, outre les mesures en continu, différents paramètres de mesure font également l'objet de mesures périodiques. Le Tableau 2.32 montre les mesures d'émission individuelles (valeurs moyennes journalières).

Paramètre	Unité	Valeurs d'émission (valeurs moyennes journalières)		
		1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour
C total (substances organiques)	mg/Nm ³	1,7	1,7	0,2
HCl	mg/Nm ³	2,0	1,2	0,9
HF	mg/Nm ³	<0,1	<0,2	<0,2
SO ₂	mg/Nm ³	8,9	2,5	5,2
Hg	mg/Nm ³	0,006	0,005	0,004
Σ Cd, Tl et composants	mg/Nm ³	0,003	0,007	0,005
Σ Métaux et composés	mg/Nm ³	<0,009	<0,066	<0,049
Be	mg/Nm ³	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PCDD/F	ng/Nm ³	0,072	0,044	0,025
État de référence, gaz sec, 10,25 % de O ₂				

Tableau 2.32 : Mesures d'émissions individuelles effectuées périodiquement en 2006 sur un four rotatif allemand utilisant des combustibles solides
[164, Rheinkalk, 2007]

2.3.4 Pertes/déchets de procédé

La calcination du calcaire peut produire de la chaux (co-produit) d'une granulométrie et d'un niveau de décarbonation qui ne correspondent pas toujours aux exigences du marché. Cette chaux (co-produit) peut être recueillie directement à la sortie du four au cours des procédures de démarrage et d'arrêt ou par le criblage ou le dépoussiérage des gaz résiduels. Cette chaux (co-produit) représente 1 à 5 % de la production annuelle totale. De faibles quantités de matière partiellement calcinée sont produites lorsque le four est démarré à froid et durant l'arrêt. De tels événements peuvent se produire à des fréquences allant d'une fois tous les 6 mois à une fois tous les 10 ans.

La fraction solide séparée par le lavage du calcaire, par exemple des impuretés naturelles, telles que de la silice, de l'argile et des particules ultrafines, peuvent être utilisées et recyclées :

- pour la remise en culture ou la couverture des terrains contaminés (par exemple acides) ;
- en tant que matière première dans l'industrie du ciment ou
- pour l'amendement des sols en agriculture.

Les poussières collectées par les filtres à manches peuvent être utilisées dans différents types de produits commerciaux [46, Allemagne, 2006]

2.3.5 Utilisation et purification de l'eau

Les matières premières extraites en carrière peuvent contenir de faibles quantités d'argile et de sable. Dans ce cas, le calcaire est lavé à l'eau avant d'entrer dans le four. La demande en eau pour le lavage du calcaire est de 0,5 à 2 m³ par tonne de matière première, selon la nature et la quantité des impuretés. Après utilisation, l'eau de lavage contient de 50 à 200 ml de solides suspendus par litre, correspondant à une teneur en matières solides de 5 à 20 g/l. En général, l'eau de lavage n'est pas chargée d'autres polluants.

L'eau utilisée pour le lavage du calcaire provient habituellement des eaux de surface ou de l'abaissement du niveau des eaux souterraines au cours de l'excavation. D'autres sources courantes d'eau de lavage sont les précipitations et les puits.

L'eau purifiée des deux systèmes est recyclée dans le procédé de lavage. Le taux de recyclage de l'eau est d'environ 85 % ; seuls 15 % de l'eau représentent des pertes de procédé et nécessitent un remplacement par de l'eau douce.

Le traitement dans l'épaississeur et la déshydratation mécanique génèrent des galettes d'une teneur en humidité résiduelle de 10 à 20 % [46, Allemagne, 2006].

2.3.6 Bruit

Les émissions de bruit surviennent tout au long du procédé de fabrication de la chaux, de l'extraction et la préparation des matières premières, en passant par le procédé de production de chaux et le stockage des matériaux, jusqu'à la répartition, ainsi qu'à l'expédition des produits finaux. Par exemple, durant le procédé de production de chaux, le chargement des morceaux de calcaire dans les fours à chaux peut générer des niveaux de bruit et/ou de vibration qu'il faut limiter. Toutefois, les émissions de bruit peuvent provenir en particulier des sources suivantes :

- les équipements lourds,
- les chutes et les trémies,
- les opérations impliquant la fracture, le concassage, le broyage et le criblage de la chaux,
- les ventilateurs extracteurs,
- les souffleries,
- les vibrations des canalisations.

Les usines doivent respecter les normes relatives à la réduction du bruit conformément à la législation nationale.

2.3.7 Odeurs

Des émissions d'odeur peuvent survenir dans les usines à chaux utilisant des fours verticaux à alimentation mixte en raison des émissions d'hydrogène sulfuré (H₂S) générées. En utilisant un mélange combustible de 30 % de coke et de 70 % d'anthracite, des émissions de H₂S variant entre 6 et 9,5 mg/Nm³ ont été relevées. En utilisant exclusivement de l'anthracite, des émissions de H₂S réduites situées entre un niveau non détectable et <1,6 mg/Nm³ ont été signalées.

De plus, l'utilisation de déchets comme matières premières ou combustibles peut conduire à des émissions d'odeurs, en particulier durant différentes étapes de procédé, telles que la préparation et le stockage.

2.3.8 Surveillance

Selon l'Association Européenne de la Chaux (EuLA), pour les fours à chaux verticaux, l'expérience montre que les conditions de procédé sont généralement stables. Le niveau d'émission ne peut changer que si la composition chimique du calcaire et/ou le combustible et les conditions de procédé requises pour assurer une certaine qualité de produit, sont modifiés.

Le lecteur trouvera d'autres informations utiles concernant les prescriptions de surveillance dans le Document de référence sur les principes généraux de surveillance (MON) [151, Commission européenne, 2003].

2.3.8.1 Mesures en continu

Les mesures d'émission confirment effectivement la stabilité des émissions. Pour contrôler le procédé de chauffe du four, plusieurs paramètres de procédé sont contrôlés en continu et démontrent la stabilité du procédé, par exemple :

- la température,
- la teneur en O₂
- le débit d'air,
- la pression.

De plus, certains de ces paramètres de procédé sont représentatifs et sont par conséquent liés aux paramètres d'émission, par exemple l'intensité des ESP et les émissions de poussières. En outre, la prise de mesures en continu peut être adaptée et a été indiquée dans certains cas particuliers pour les paramètres suivants :

- NO_x,
- SO₂,
- poussières,
- CO.

Cependant, si des déchets sont utilisés comme combustibles, un contrôle continu des émissions conformément à la Directive relative à l'incinération des déchets est normalement requis, tel que pour les émissions de poussières et de NO_x, et, dans certains cas, de SO₂ et de COV/COT. Le lecteur trouvera à ce sujet d'autres informations et exigences devant être spécifiées lors de l'utilisation de déchets dans la Directive 2000/76/CE sur l'incinération des déchets. Lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

Il conviendrait également de contrôler les émissions des gros fours rotatifs en raison de la variabilité de certains de leurs paramètres de procédé. De plus, selon les combustibles utilisés, les conditions de procédé et la pertinence des émissions, il peut être nécessaire de procéder à des mesures supplémentaires [46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006].

2.3.8.2 Mesures périodiques

Les mesures périodiques sont pratiquées pour les polluants suivants, sauf s'ils sont contrôlés en continu :

- poussières
- SO₂
- les oxydes d'azote (NO_x).

Selon les combustibles utilisés, en particulier dans le cas de l'utilisation de déchets, les conditions de procédé et la pertinence des émissions, des mesures supplémentaires sont pratiquées pour les polluants suivants :

- l'oxyde de carbone (CO),
- le carbone organique total (COT)
- le chlorure d'hydrogène (HCl),
- le fluorure d'hydrogène (HF),
- les métaux lourds,
- les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF).

Dans certains cas, on contrôle le benzo-a-pyrène (C₂₀H₁₂), (catégorie 2A, probablement cancérogène pour l'homme selon la classification IARC).

2.4 Techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD

Cette section présente les techniques considérées de manière générale comme ayant la capacité de fournir un haut niveau de protection environnementale dans les industries tombant dans la portée du présent document. Des systèmes de management, des techniques intégrées aux procédés et des mesures/techniques curatives sont inclus, mais un certain recoupement existe entre eux lorsqu'on cherche à obtenir des résultats optimaux. Outre ces mesures/techniques, la consommation de calcaire, l'utilisation d'énergie et le choix des combustibles utilisés sont étudiés dans la présente section.

Les procédures de prévention, de contrôle, de minimisation et de recyclage sont prises en compte, ainsi que la réutilisation des matériaux et l'énergie.

Les mesures/techniques peuvent être présentées individuellement ou en combinaisons afin d'atteindre les objectifs de la Directive IPPC. L'Annexe IV de cette Directive énumère un certain nombre de considérations générales à prendre en compte lors de la détermination des MTD et les mesures/techniques de la présente section examineront une ou plusieurs de ces considérations. Dans la mesure du possible, une structure standard est utilisée pour présenter chaque mesure/technique afin de permettre une comparaison des mesures/techniques et une évaluation objective en fonction de la définition des MTD donnée dans la Directive IPPC.

La liste de mesures/techniques présentée dans cette section n'est pas exhaustive, d'autres mesures/techniques également valables dans le cadre de l'IPPC et des MTD peuvent exister ou pourront être mises au point.

La structure classique utilisée pour présenter chaque mesure/technique est indiquée dans le Tableau 2.33. Du fait que les limites entre les éléments mentionnés dans ce tableau peuvent se chevaucher dans une certaine mesure, la structure est maintenue flexible, reflétant le cas particulier spécifique.

Type d'information prise en compte	Type d'information incluse
Description	Description technique de la mesure/technique (y compris les dessins et schémas si nécessaire)
Avantages environnementaux obtenus	Principaux avantages environnementaux (notamment les économies d'énergie, d'eau, de matières premières, ainsi que les augmentations du rendement de production, de l'efficacité énergétique, etc.) apportés par la mesure/technique
Effets croisés	Principaux effets secondaires et inconvénients environnementaux pour les autres milieux provoqués par l'utilisation de la mesure/technique. Détails des effets environnementaux de la mesure/technique comparés à d'autres.
Données d'exploitation	Données relatives aux niveaux de consommation et d'émission d'usines opérationnelles utilisant la mesure/technique (comprenant toutes les conditions de référence et les méthodes de surveillance utilisées). Toutes autres informations pertinentes relatives à la mise en œuvre, à la maintenance et au contrôle de la mesure/technique
Applicabilité	Indication du type d'unités dans lesquelles la mesure/technique peut être appliquée, en prenant en compte, par exemple, l'âge de l'unité (le fait qu'elle soit nouvelle ou existante), la taille de l'unité (faible ou importante), les mesures/techniques déjà installées et le type ou la qualité du produit
Économie	Informations sur les coûts (tant les coûts d'investissement que les coûts opérationnels) et toutes les éventuelles économies (par exemple, consommation de matières première ou d'énergie, frais de déchets) ou recettes, y compris les détails du calcul/estimation de ces coûts/économies ou recettes
Motivation pour la mise en œuvre	Conditions ou exigences locales conduisant ou pouvant stimuler la mise en œuvre. Informations relatives aux motifs autres qu'environnementaux de la mise en œuvre (par exemple, une augmentation de productivité, la sécurité)
Exemples d'unités	Référence à une ou plusieurs unités dans lesquelles la mesure/technique est appliquée et de laquelle des informations ont été collectées et utilisées dans la rédaction de la section
Littérature de référence	Littérature ou autre support de référence (par exemple, des livres, des rapports, des études, des sites web) qui a été utilisé dans la rédaction de la section et contenant plus de détails sur la mesure/technique

Tableau 2.33 : Répartition des informations pour chaque mesure/technique décrite dans cette section

Les trois éléments essentiels, le calcaire, le procédé et le produit, forment la base d'une matrice et dépendent les uns des autres pour fabriquer un produit répondant à différentes exigences de marché. Différentes mesures/techniques et des types de fours particuliers, ainsi que différents types de combustibles sont utilisés. La qualité des matières premières utilisées, c'est-à-dire le calcaire, le CaCO_3 et la dolomie $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ jouent respectivement un rôle spécifique dans le procédé de production et influent de manière essentielle sur la conception du four (notamment le type de mesures/techniques de réduction des émissions) et la qualité finale de la chaux. D'autres facteurs principaux qui influencent le choix d'une configuration de four et d'une technique de four sont le prix des combustibles disponibles et la capacité du four. Ces facteurs influencent également de manière considérable les propriétés de la chaux produite. Par conséquent, au cours des 30 dernières années, différents types de four associés à la combinaison four/combustible optimale pour différentes qualités de chaux, ainsi qu'à l'utilisation combinée de mesures/techniques de réduction développées dans le monde.

Le Tableau 2.34 présente les mesures/techniques qui ont un effet positif (réducteur) sur les émissions liées à la fabrication de la chaux. Les mesures/techniques énumérées ci-dessous sont détaillées dans les sections suivantes.

Les coûts des mesures/techniques de réduction doivent être évalués en fonction du type de four à chaux utilisé, de la taille des installations, de l'efficacité des mesures/techniques et des circonstances de l'application particulière. Dans ce contexte, la Section 2.4.5.3.5 donne des exemples relatifs aux coûts d'investissement, aux coûts de maintenance et aux coûts opérationnels de la réduction des émissions de poussières au moyen de différentes mesures/techniques de réduction.

Type de four	Mesures/techniques	Substances				
		Poussières	NO _x	SO ₂	CO	Autres (par exemple PCDD/F, HCl, HF)
Four rotatif : • Four long rotatif (LRK) • Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	Contrôle et optimisation du procédé	x	x	x	x	x
	Choix du combustible		x	x		x
	Conception du brûleur de four		x			
	Technique d'addition d'absorbant (non appliqué actuellement ¹⁾ dans l'industrie de la chaux)			x		
	Séparateurs centrifuges/cyclones	x				
	ESP	x				
	Filtres à manches	x				
	Séparateurs de poussières par voie humide	x				
	SNCR (applicable actuellement ¹⁾ uniquement à un certain type de PRK) ²⁾		x			
	SCR (actuellement ¹⁾ non applicable dans l'industrie de la chaux)		x			
	Réduction des poussières diffuses	x				
Four vertical : • Four vertical à cycles alternés (PFRK) • Four vertical annulaire (ASK) • Four vertical à alimentation mixte (MFSK) • Autres fours (OK)	Contrôle et optimisation du procédé				x	x
	Séparateurs centrifuges/cyclones	x				
	ESP	x				
	Filtres à manches	x				
	Séparateurs de poussières par voie humide (épurateur en voie humide)	x				
	Réduction des poussières diffuses	x				
	Injection d'eau					x ³⁾
Stations de broyage	ESP	x				
	Filtres à manches	x				
Stations d'hydratation	Filtres à manches	x				
	Séparateurs de poussières par voie humide (épurateur en voie humide)	x				
1) En 2008 2) En 2008, un four à chaux dans l'UE des 27 était équipé d'un système SNCR 3) HCl						

Tableau 2.34 : Vue d'ensemble des mesures/techniques applicables dans l'industrie de la chaux

2.4.1 Consommation de calcaire

Description et avantages environnementaux obtenus

La consommation minimale et une utilisation durable du calcaire dépendent de la maximisation des rendements pour le calcaire extrait en carrière en optimisant l'exploitation (forage et abattage) et les techniques du procédé et la chaux vive commercialisable de la pierre du four. On peut atteindre cet objectif en utilisant des techniques de four optimisées qui peuvent fonctionner avec une plus large gamme de granulométries de calcaire, par exemple des PFRK à chaux fine et/ou fours rotatifs.

Effets croisés

Aucun effet croisé.

Données d'exploitation

Les paramètres opérationnels pour différents types de fours à chaux sont indiqués dans le Tableau 2.15.

Applicabilité

Généralement applicable dans l'industrie de la chaux, mais le traitement des pierres et les techniques de four dépendent de la qualité du calcaire.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Disponibilité limitée de calcaire.

Avantage environnemental dû au prolongement de la durée de vie des carrières (durabilité). Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006]

2.4.2 Réduction de la consommation d'énergie (efficacité énergétique)

Description et avantages environnementaux obtenus

Un système de management de l'énergie destiné à la surveillance de l'utilisation d'énergie des fours est applicable à l'industrie de la chaux.

Si seuls l'efficacité énergétique et les émissions de CO₂ sont prises en compte, les fours verticaux en général et les fours verticaux à cycle alternés (PFRK) en particulier sont les fours les plus efficaces. Cependant, même si la prise en compte de l'énergie et du CO₂ joue un rôle fondamental, les autres spécifications doivent être examinées avant de prendre une décision quant au choix du four (cf. Sections 2.2.7 et 2.3.2) ou de la matière première. Dans certains cas, les spécifications peuvent créer un avantage technique pour les fours rotatifs, en particulier avec les fours rotatifs améliorés.

Le plus souvent, de nouveaux fours remplacent les anciens ; toutefois, certains fours existants ont été modifiés afin de limiter l'utilisation du combustible. Ces modifications vont de transformations mineures à des changements majeurs de configuration du four, selon la faisabilité technique, le coût et les besoins réels, tels que, par exemple :

- l'installation d'échangeurs de chaleur pour les fours longs rotatifs pour récupérer l'excédent calorifique des effluents gazeux ou pour permettre l'utilisation d'une gamme de combustibles plus large ;

- l'utilisation de l'excédent calorifique des fours rotatifs pour sécher le calcaire pour d'autres procédés, tels que le broyage du calcaire ;
- Parfois, lorsque les fours verticaux n'étaient plus économiquement viables, il a été possible de les adapter à des configurations modernes ; par exemple, en convertissant un four vertical simple en four vertical annulaire ou en raccordant deux fours verticaux pour créer un four à cycles alternés. La conversion prolonge la durée de vie des modules onéreux des équipements, tels que la structure du four, le système d'alimentation en pierres et la station de manutention et stockage de la chaux ;
- exceptionnellement, il peut se révéler économique de raccourcir des fours longs rotatifs et de les équiper d'un préchauffeur, réduisant ainsi l'utilisation du combustible ;
- l'utilisation de l'énergie électrique peut être minimisée grâce à l'installation d'équipements à forte efficacité énergétique.

Les mesures/techniques à forte efficacité énergétique énumérées ici ont un effet positif sur l'utilisation d'énergie :

- contrôle du procédé, par exemple l'excès d'air de combustion, débit du combustible,
- maintenance de l'installation, par exemple l'étanchéité, érosion des réfractaires
- granulométrie de la pierre optimisée.

De plus, le Tableau 2.35 énumère des possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique des fours à chaux triées par composants de four.

Composant de four	Description	L RK	P RK	P FRK	A SK	MFSK, OK
Système de combustion	Technique de brûleur à haut rendement et haute flexibilité pour adapter le profil de température aux exigences du produit	X	X	-	-	-
Système de combustion	Contrôle de combustion en ligne et réduction d'excès d'air	X	X	-	-	-
Système de combustion	Contrôle de combustion par analyse des gaz résiduaires	-	-	X	X	X
Système de combustion	Système de combustion à haute flexibilité comprenant d'éventuels mélanges combustibles avec des combustibles issus de déchets	X	X	X	X	X
Refroidisseur	Refroidisseur efficace avec distribution d'air et déchargement de produit homogènes pour minimiser la quantité d'air de refroidissement nécessaire	X	X	X	X	X
Refroidisseur	Dispositif de mesure de niveau de refroidisseur fiable	X	X	-	-	-
Circuit des gaz résiduaires	Système de récupération de chaleur	X	-	-	-	-
Contrôle alimentation	Échantillonnage et analyse réguliers du combustible et des pierres, et adaptation du procédé en conséquence	X	X	X	X	X
Contrôle alimentation	Nouveau criblage des pierres avant alimentation du four pour contrôler la gradation des pierres	X	X	X	X	X
Contrôle alimentation	Dispositifs de pesée/mesure fiables pour contrôler le débit de combustible, de pierres et d'air	X	X	X	X	X
Conception de four ¹⁾	Rapport longueur diamètre optimisé	X	X	X	X	X
Four	Éléments internes réfractaires à l'intérieur de la partie rotative pour favoriser l'échange calorifique et minimiser la ségrégation du produit	X	X	-	-	-
Four	Revêtement isolant efficace pour minimiser les pertes calorifiques de la virole	X	X	X	X	X
Four	Réduction des entrées d'air par l'installation de joints sur la hotte du four et l'alimentation du four	X	X	-	-	-
Four	Nettoyage régulier des canaux	-	-	X	X	X

Chapitre 2

Four et préchauffeur	Réduction des entrées d'air pour contrôler l'excès d'air	-	-	X	X	X
Fonctionnement du four	Boucles de contrôle automatiques pour tirage de hotte, excès d'air, débit de combustible, tonne/rotation de four, ajustements, etc.	X	X	-	-	-
Fonctionnement du four	PLC et système de supervision avec tendances des paramètres clés	X	X	X	X	X
Fonctionnement du four	Conditions de fonctionnement uniformes	X	X	X	X	X
Fonctionnement du four	Analyse des causes d'arrêt et réparations	X	X	X	X	X
Préchauffeur	Optimiser les pertes de charge par rapport à l'échange calorifique	-	X	-	-	-
Suivi qualité	Échantillonnage et analyse réguliers de la chaux, et ajustement du four	X	X	X	X	X
1) Uniquement applicable aux nouveaux fours						

Tableau 2.35 : Options pour améliorer l'efficacité énergétique des fours à chaux
[168, TWG CLM, 2007], [177, EULA, 2008]

Effets croisés

Du fait que l'accès aux ressources naturelles devient de plus en plus difficile, il faut trouver un équilibre à l'échelle locale entre l'utilisation optimale de l'énergie et la meilleure utilisation du dépôt.

Données d'exploitation

Généralement, le combustible et l'énergie sont les éléments les plus coûteux de la calcination de la chaux et des améliorations de l'efficacité énergétique ont été apportées pour minimiser les coûts de production. Dans certains cas en Allemagne, la consommation d'électricité pour le broyage de la chaux a été minimisée en remplaçant les broyeurs pour chaux vive par des broyeurs fonctionnant comme des broyeurs haute pression (par exemple des broyeurs à rouleaux). Il a été signalé que l'utilisation de broyeurs haute pression générerait des économies d'énergie électrique de 2,5 kWh/t_{chauxvive}. De plus, dans un cas spécifique, une réduction de la consommation d'électricité a également été obtenue en remplaçant les épurateurs en voie humide par des filtres à manches. Dans ce cas, on a signalé des économies d'énergie électrique de 2,9 kWh/t_{chauxvive} [46, Allemagne, 2006].

Applicabilité

Applicable, en principe, à tous les types de fours à chaux.

Les fours verticaux ne peuvent habituellement brûler que des pierres de calcaire grossières. Cependant, les fours rotatifs à consommation d'énergie plus élevée peuvent également valoriser de petites fractions et les nouveaux fours verticaux ont tendance à brûler de petits granules à partir de 10 mm. Les granules plus gros pour l'alimentation du four sont davantage utilisés dans les fours verticaux que dans les fours rotatifs.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Ressources naturelles.

Réductions des coûts.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

Le lecteur trouvera des informations utiles à ce sujet dans le Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour l'efficacité énergétique (ENE) [181, Commission européenne, 2008].

2.4.3 Optimisation du contrôle de procédé

Description

L'optimisation est applicable par une automatisation du procédé pour la plupart des étapes de l'ensemble du procédé de production de la chaux. Maintenir les paramètres de contrôle du four proches de leurs valeurs optimales permet de réduire tous les facteurs de consommation et d'émissions intervenant dans le procédé de calcination de la chaux. Entre autres raisons, on peut citer la diminution du nombre d'arrêts de l'équipement et des situations de fonctionnement instable. Des systèmes de management sont applicables pour s'assurer que tous ceux qui sont concernés adoptent des pratiques correctes d'exploitation et de maintenance, et que le respect de celles-ci est surveillé.

Avantages environnementaux obtenus

Les mesures/techniques d'optimisation de contrôle du procédé ont un effet positif sur l'utilisation de l'énergie et sur les émissions.

Effets croisés

Aucun.

Données d'exploitation

Selon la tâche d'optimisation.

Applicabilité

Applicable à toutes les usines à chaux à des degrés divers.

Il est généralement impossible d'atteindre une automatisation totale du procédé en raison de variables incontrôlables, par exemple, la qualité du calcaire.

Économie

Selon la tâche d'optimisation.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006]

2.4.4 Choix des combustibles (y compris des déchets combustibles)

Description

L'industrie de la chaux est grosse consommatrice d'énergie (cf. Section 2.2.4). Selon la composition chimique du combustible et le type de four utilisé, le choix des combustibles adaptés ou d'un mélange de combustibles peut conduire à des réductions d'émissions et à une efficacité de cuisson améliorée, notamment :

- des combustibles à faible teneur en soufre conduisent à une réduction des émissions de SO_2 liées à l'énergie. Toutefois, du fait que le soufre des combustibles est absorbé chimiquement par la chaux, certains combustibles ayant une teneur en soufre plus élevée peuvent être utilisés sans augmenter les émissions de SO_2 ;
- la biomasse contribue à économiser les combustibles fossiles ;
- les combustibles issus de déchets réduisent la quantité de combustibles fossiles utilisés et les émissions de CO_2 associées (cf. Section 2.2.5), tandis que les combustibles fossiles solides contribuent au contraire à des émissions de CO_2 plus élevées.

A l'exception des fours verticaux à alimentation mixte, tous les types de four peuvent fonctionner avec tous les types de combustible. Certains fours fonctionnent avec un seul type de combustible, tandis que la majorité des fours fonctionnent avec un mélange de combustibles. Selon le type de four, il est possible d'utiliser des combustibles gazeux, solides et liquides. Les combustibles solides peuvent être répartis en combustibles en poudre et en morceaux qui peuvent également être utilisés en combinaison selon le type de four.

Jusqu'en 2008, les combustibles le plus couramment utilisés dans l'UE étaient le gaz naturel et les combustibles solides, tels que le lignite, le charbon, le coke de pétrole et le coke. Toutefois, les combustibles liquides, ainsi que les combustibles issus de déchets et/ou la biomasse de haut pouvoir calorifique et de haute réactivité étaient également utilisés.

Le choix de combustibles issus de déchets adaptés pour le procédé et le brûleur (par exemple, l'huile usagée, les solvants usés, la graisse animale, les déchets liquides), ainsi que certaines caractéristiques, certains critères et des qualités constantes (par exemple, le pouvoir calorifique élevé, la réactivité élevée, la faible teneur en soufre, chlore, métaux et cendres, ainsi que la disponibilité quantitative) réduisent la quantité de combustibles fossiles (cf. Section 2.2.5). Afin de garantir les caractéristiques du combustible issu de déchets, un système d'assurance qualité est nécessaire. En particulier, cela comprend des mesures pour l'échantillonnage, la préparation d'échantillons, l'analyse et la surveillance externe. Le lecteur trouvera d'autres informations dans les spécifications techniques du Comité européen de normalisation, telles que celles du CEN/TC 343 sur les « Combustibles solides de récupération ».

Avantages environnementaux obtenus

Le choix de combustibles ou mélanges de combustibles adaptés peut conduire à une réduction des émissions et à une efficacité de cuisson améliorée.

Effets croisés

Des émissions plus élevées peuvent survenir selon la composition chimique du combustible et le type de four.

Il convient de noter qu'en utilisant des déchets, il est possible que des émissions supplémentaires de types différents surviennent.

De plus, une variation du mélange de combustible induit souvent une variation de la consommation d'énergie spécifique par tonne de chaux. Selon les types de combustibles issus de déchets utilisés et leur pouvoir calorifique, la demande en énergie thermique spécifique moyenne annuelle peut augmenter, ainsi qu'observé dans l'industrie du ciment (cf. Section 1.3.3 concernant l'industrie du ciment). Cette observation dans l'industrie du ciment est comparable à l'utilisation des déchets dans l'industrie de la chaux.

Données d'exploitation

Lors d'un changement de mélange de combustibles utilisé, la consommation d'énergie spécifique par tonne de chaux peut varier pour différentes raisons, selon le type de combustible et le pouvoir calorifique des combustibles utilisés. La littérature montre que les combustibles fossiles ont des pouvoirs calorifiques (moyen, net), par exemple, de 26 – 30 MJ/kg pour le charbon caractéristique et de 40 – 42 MJ/kg pour le fioul caractéristique, les déchets solides, tels que les matières plastiques, ont un pouvoir calorifique élevé entre 17 et 40 MJ/kg. Il convient de noter que, pour ces déchets, les pouvoirs calorifiques varient très largement, de 3 à 40 MJ/kg. Cependant, les combustibles ayant un pouvoir calorifique inférieur à 18 MJ/kg ne sont pas adaptés à l'industrie de la chaux en raison de la teneur en cendres et en humidité (cf. exemples fournis dans le Tableau 4.41). Les pouvoirs calorifiques des farines animales (farines de carcasses) utilisées dans les fours à chaux se situent entre 14 et 21,5 MJ/kg, ainsi qu'indiqué.

Applicabilité

Chaque type de four est, en principe, capable de brûler différents types de combustibles, mais nécessite pour ce faire le matériel technique adapté. Cela peut également comprendre la réception et le stockage des combustibles. Les fours doivent également être dotés de lances ou de techniques de combustion spécifiques du combustible. La plupart des usines dans l'UE sont plus ou moins souples quant au combustible selon leur emplacement et les facteurs économiques mentionnés ci-dessus. Cependant, un changement de type de combustible peut nécessiter d'importants investissements.

Il convient de noter qu'en utilisant des déchets liquides, une faible viscosité est nécessaire pour ces combustibles issus de déchets et un préchauffage du combustible est souvent requis (60 à 70 °C). De plus, dans le cas de l'utilisation de graisses animales, ce déchet se solidifie à des températures de 40 °C en raison de sa viscosité et peut obstruer des tuyaux et des raccords. Il est nécessaire de manipuler les graisses animales à des températures supérieures à 40 °C, par exemple en utilisant un chauffage supplémentaire.

Les déchets solides pulvérulents ne peuvent être utilisés que dans les fours rotatifs. De plus, les combustibles issus de déchets pulvérisés peuvent être utilisés dans les fours rotatifs, les fours à cycles alternés et dans des types particuliers de fours verticaux. Toutefois, les combustibles issus de déchets pulvérisés ne sont pas disponibles en 2008 pour une utilisation dans l'industrie de la chaux en raison des coûts élevés de pulvérisation des déchets par concassage.

Le choix des combustibles adaptés dépend du type de four utilisé, des qualités de produit souhaitées, de la disponibilité des combustibles et des possibilités techniques d'injection de ces combustibles dans le four choisi. Leur utilisation est principalement limitée par :

- les propriétés physico-chimiques qui ne répondent pas toujours aux exigences physiques, chimiques ou spécifiques du procédé pertinentes ;
- la disponibilité sur le marché et l'approvisionnement garanti dans le temps ;
- les considérations économiques ;
- le niveau des émissions.

Des informations concernant l'utilisation des combustibles issus de déchets sont présentées dans la Section 2.2.5.

Aspects économiques

Les paramètres économiques les plus importants sont :

- le coût du combustible lui-même, en effet le coût du combustible par tonne de chaux peut représenter de 30 à 60 % du coût de production ;
- la répartition entre le prix du gaz naturel et des combustibles solides, qui peut varier dans le temps ;
- l'impact des coûts des quotas de CO₂ ;
- les coûts d'investissement pour le matériel nécessaire pour l'utilisation d'un combustible particulier, par exemple, le stockage, la manutention, le séchage, le broyage, l'injection et la sécurité.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exigences économiques.

Conditions locales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006], [143, Williams, 2005], [155, Allemagne, 2007], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.5 Émissions de poussières (matière particulaire)

Cette section décrit les mesures/techniques permettant d'éviter les émissions de poussières canalisées (cf. Section 2.3.3.1.1) et diffuses (cf. Section 2.3.3.1.2).

Le lecteur trouvera des informations utiles à ce sujet dans le Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les émissions dues au stockage des matières dangereuses ou en vrac et dans le Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les systèmes communs de traitement/management des eaux usées et des gaz résiduels dans le secteur chimique [58, Commission européenne, 2003], [96, Commission européenne, 2006].

2.4.5.1 Mesures/techniques pour les opérations génératrices de poussières

Description

Il est présenté ici plusieurs mesures/techniques différentes qui peuvent être appliquées individuellement ou en combinaison (cf. Section 2.3.3.1.2) :

- le confinement/encapsulation des opérations génératrices de poussières, telles que le broyage, le criblage et le mélange ;
- les transporteurs et élévateurs couverts, qui sont construits comme des circuits fermés, au cas où les matériaux pulvérulents risqueraient de dégager des poussières ;
- les silos de stockage de capacité adaptée, équipés d'indicateurs de niveaux avec disjoncteurs et de filtres destinés à traiter l'air chargé de poussières déplacé au cours des opérations de remplissage ;
- un procédé de circulation est favorisé pour les systèmes de convoyage pneumatique ;
- la manutention des matériaux dans des circuits fermés en dépression et le dépoussiérage de l'air utilisé à cet effet par un filtre à manches avant qu'il soit renvoyé à l'atmosphère ;
- la réduction des fuites d'air et des points de déversement accidentel, la réalisation complète de l'installation ;
- une maintenance correcte et complète de l'installation ;
- l'utilisation de dispositifs et de systèmes de contrôle automatiques ;
- l'utilisation d'opérations continues contribuant au bon fonctionnement ;
- l'utilisation de tuyaux de remplissage flexibles dotés d'un système d'extraction de poussières pour charger la chaux calcinée, placés au niveau du plancher de chargement du camion.

Avantages environnementaux obtenus

Réduction des émissions de poussières principalement diffuses.

Une réduction du bruit est également possible en confinant les équipements lourds.

Effets croisés

Augmentation de la consommation d'énergie par l'utilisation de systèmes de nettoyage par aspiration. Lors de la maintenance, des déchets supplémentaires peuvent être générés.

Données d'exploitation

Selon la mesure/technique particulière spécifique liée au cas.

Applicabilité

Ces mesures/techniques peuvent, en principe, être mises en œuvre dans l'industrie de la chaux. Dans les opérations de préparation de la matière première, telles que le broyage ou le tamisage, une séparation des poussières est normalement appliquée en raison de la teneur en humidité de la matière première. Pour réduire les émissions de poussières, les matières premières peuvent être humidifiées par pulvérisation supplémentaire d'eau au cours du traitement.

Économie

Selon la mesure/technique particulière spécifique liée au cas.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exigences de santé et sécurité pour le lieu de travail.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006]

2.4.5.2 Mesures/techniques pour les zones de stockage en vrac et les stocks**Description et avantages environnementaux obtenus**

Afin de réduire essentiellement les émissions de poussières diffuses provenant du stockage en vrac, des stocks de matières premières pulvérulentes ou de combustibles à l'air libre, les emplacements de stockage peuvent être confinés par filtrage, murage ou par des murs végétaux (pare-vents artificiels ou naturels pour protection contre le vent des matériaux stockés à ciel ouvert).

Les silos de stockage et le stockage entièrement automatique en milieu fermé des matières premières sont considérés comme la solution la plus efficace au problème des émissions de poussières diffuses liées à la présence de stocks volumineux. Les installations de stockage de ce type sont équipées d'un ou de plusieurs filtres à manches pour empêcher les émissions de poussières diffuses pendant les opérations de chargement et de déchargement (telles que le stockage fermé avec un système de manutention automatique). Les émissions de poussières diffuses au niveau des piles de stockage peuvent être réduites en utilisant une humidification suffisante des points de chargement et de déchargement des stocks, ainsi que des bandes transporteuses à hauteur réglable. S'il est impossible d'éviter les émissions de poussières diffuses aux points de chargement et de déchargement des sites de stockage, celles-ci peuvent être réduites en adaptant la hauteur de déchargement à la hauteur variable du terril, si possible automatiquement, ou en réduisant la vitesse de déchargement.

De plus, les emplacements peuvent être mouillés au moyen de dispositifs de pulvérisation, en particulier dans les zones sèches (si la source ponctuelle de poussières est géographiquement limitée, un circuit de pulvérisation d'eau peut être installé), et peuvent être nettoyés par des camions de nettoyage. Par ailleurs, dans le cas de l'utilisation de mesures/techniques d'humidification ou de pulvérisation, le sol peut être étanchéifié et l'excès d'eau peut être recueilli et, au besoin, être traité et utilisé dans des circuits fermés.

Il est possible d'utiliser des systèmes d'aspiration pour empêcher les émissions de poussières diffuses au cours des opérations d'enlèvement. L'équipement des bâtiments neufs avec des systèmes fixes de nettoyage par aspiration ne pose pas de problèmes. Par contre, il est préférable d'équiper les bâtiments existants de systèmes mobiles et de raccords souples.

Pour réduire les émissions de poussières diffuses dans les zones de circulation des camions, ces zones peuvent être revêtues chaque fois que cela est possible et toutes les surfaces doivent être maintenues dans un bon état de propreté. L'humidification des routes peut réduire les émissions de poussières diffuses, en particulier par temps sec. L'application de bonnes règles de propreté permet de minimiser les émissions de poussières diffuses.

Effets croisés

La consommation d'eau augmente lorsque les emplacements sont maintenus humides. La consommation d'énergie augmente du fait de l'utilisation de systèmes de nettoyage par aspiration. Lors de la maintenance, des déchets supplémentaires peuvent être générés.

Données d'exploitation

Selon la mesure/technique particulière spécifique liée au cas.

Applicabilité

Ces mesures/techniques peuvent, en principe, être mises en œuvre dans l'industrie de la chaux.

Économie

Selon la mesure/technique particulière spécifique liée au cas.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exigences de santé et sécurité pour le lieu de travail.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

2.4.5.3 Réduction des émissions de poussières canalisées

Cette section décrit les techniques qui visent exclusivement le dépoussiérage (cf. Section 2.3.3.1.1). Il existe différentes sources principales d'émissions de poussières dans les usines à chaux, telles que la préparation de la matière première, la calcination du calcaire, l'hydratation de la chaux, le broyage de la chaux et les procédés connexes et annexes. Selon le type de four utilisé pour la fabrication de la chaux, on utilise différentes techniques de dépoussiérage. Les mesures/techniques de dépoussiérage sont fondées sur le filtrage, la séparation électrostatique et l'épuration en voie humide de gaz (nettoyage des gaz résiduels à l'aide d'un filtre). Ces techniques sont liées aux caractéristiques des gaz résiduels suivantes :

- la température,
- le débit,
- l'humidité,
- la concentration de poussières à l'entrée du filtre.

Le Tableau 2.36 présente un résumé des données d'exploitation qui sont disponibles dans le corps de cette section. Ce tableau donne une vue d'ensemble et doit être examiné compte tenu des informations données dans les sections et paragraphes correspondants ci-dessous.

Mesure/ technique	Applicabilité	Données sur les émissions ⁴⁾		Coûts ³⁾	
				Investissement	Exploitation
		mg/Nm ³ ¹⁾	kg/tonne ²⁾	million EUR	EUR/t de chaux
ESP	Tous les systèmes de four, stations de broyage, procédés annexes	<10 – <20	0,015 – 0,1	0,6 – 3,9	>1,5
Filtre à manches	Tous les systèmes de four	<10 – <20	0,015 – 0,15	0,25 – 1,7	>1,5
	Stations de broyage, procédés annexes	<10 – <20	0,015 – 0,05		
Séparateur de poussières par voie humide	Tous les systèmes de four, stations d'hydratation	10 – 30	0,06 – 0,25		
Séparateur centrifuge	Uniquement adapté en tant que préséparateurs : tous les systèmes de four, stations de broyage, procédés annexes	-	-		
Réduction des poussières diffuses	Toutes usines	-	-		
1) Pour les systèmes de four, fait normalement référence à des moyennes journalières, gaz sec, 273 K, 101,3 kPa et 11 % de O ₂ 2) kg/tonne de chaux sur la base de : • 3 000 Nm ³ /t de chaux pour les ASK et les PFRK • 3 700 Nm ³ /t de chaux pour les PRK • 5 000 Nm ³ /t de chaux pour les LRK 3) Fait référence à différentes capacités de four, cf. Figure 2.46 et Tableau 2.37 4) Les données sur les émissions peuvent être consultées dans le paragraphe correspondant de la présente section					

Tableau 2.36 : Vue d'ensemble des techniques de contrôle des émissions de poussières dans le procédé de production de chaux

Les ESP et les filtres à manches ont tous les deux une efficacité de dépoussiérage très élevée en mode de fonctionnement normal de plus de 99 % de rétention de particules, mais tous deux dépendent de la granulométrie. Selon la température des gaz d'exhaure, il faut utiliser différents types de matériaux pour les filtres. Les deux types de systèmes de filtre doivent être soumis à une maintenance correcte (périodique) afin d'assurer une bonne efficacité, laquelle est supérieure à celle des séparateurs de poussières par voie humide. Les séparateurs de poussières par voie humide consomment de l'énergie supplémentaire, ainsi que de l'eau, et produisent des eaux usées qui doivent ensuite être traitées. L'efficacité des ESP peut être affectée par les pics de CO ; cependant, les pics de CO peuvent être minimisés conformément à la Section 4.2.6. Les séparateurs centrifuges sont également utilisés, mais ne sont adaptés qu'en tant que préséparateurs ; toutefois, ils peuvent être plus efficaces avec des charges de polluants plus importantes. Pour la réduction des émissions de poussières diffuses, cf. Sections 2.4.5.1 et 2.4.5.2.

2.4.5.3.1 Filtres électrostatiques (ESP)

Description et avantages environnementaux obtenus

Dans un filtre électrostatique, les gaz résiduels sont passés à travers une chambre dotée de deux électrodes. Une tension élevée (jusqu'à 100 kV) est appliquée à la première électrode qui ionise les gaz résiduels. Les ions générés adhèrent aux particules de poussière dans les gaz résiduels et, en conséquence, ces particules se chargent électriquement. Les forces électrostatiques repoussent les particules de poussière chargées de la première électrode et les attirent vers la seconde, sur laquelle elles se déposent. Les particules de poussière sont ainsi éliminées du courant de gaz résiduels.

Les filtres électrostatiques créent un champ électrique en travers de la trajectoire des matières particulaires en suspension dans la veine d'air. Les particules se chargent négativement et se dirigent vers les plaques collectrices chargées positivement. Celles-ci vibrent ou sont frappées régulièrement, ce qui fait tomber la poussière dans des bacs de récupération placés en dessous. Les ESP se caractérisent par leur aptitude à supporter des températures élevées (jusqu'à environ 400 °C) et de fort taux d'humidité. Leur efficacité peut être affectée par des paramètres tels que le débit des gaz résiduels, l'intensité du champ électrique, la conductivité de la poussière, la concentration en SO₂, la teneur en eau, la forme et la surface des électrodes. Le champ électrique peut en particulier être réduit défavorablement par l'accumulation sur les plaques collectrices de matières formant une couche isolante comme le montre la Figure 2.43.

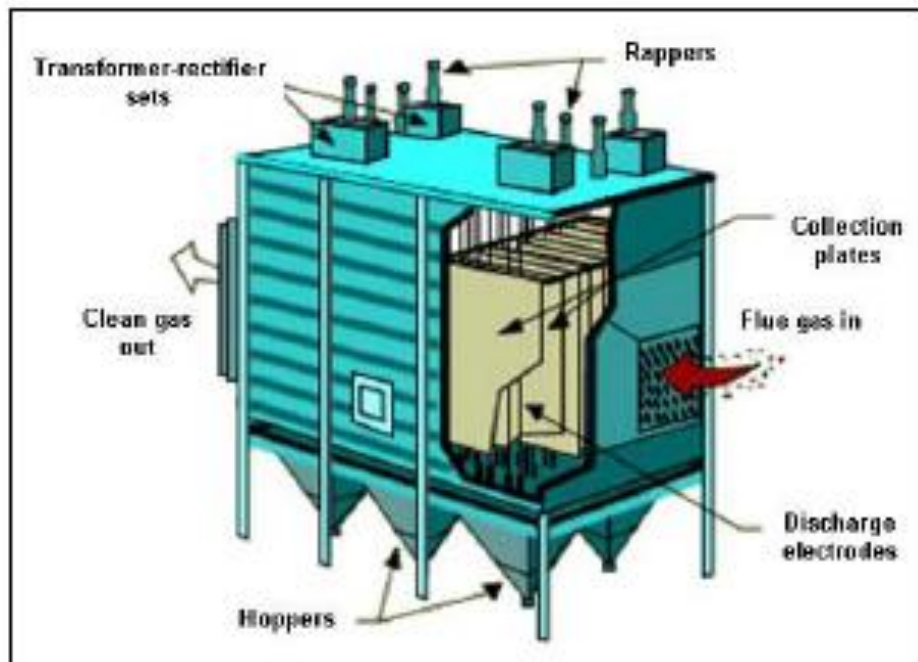


Figure 2.43 : Vue schématique d'un filtre électrostatique (ESP) classique [54, EuLA, 2006].

En raison de risques d'explosion, la concentration de CO de sécurité à l'entrée de l'ESP est habituellement limitée à 1 à 2 %, ce qui est bien inférieur à la limite d'explosion de 10 %. Par conséquent, les pics de CO doivent être évités, les niveaux de CO doivent être surveillés en continu avant le filtre. Le nombre de pics de CO peut être diminué si on a recours à des systèmes de contrôle modernes parallèlement à un équipement de mesure et de contrôle rapide admettant un critère de déclenchement plus élevé. Dans ce contexte, un guide concernant le contrôle des pics de CO peut être consulté dans la Section 4.2.6.

Lorsque cela se justifie, il est possible d'installer des tours de quench avant l'ESP pour améliorer le nettoyage des émissions telles que les PCDD.

Effets croisés

Les risques d'explosion surviennent à des concentrations de CO élevées.

La consommation d'énergie augmente en raison du fonctionnement de l'ESP (mais une plus faible perte de charge comparée à d'autres systèmes de filtre conduit à une consommation d'énergie électrique plus faible des ventilateurs de gaz résiduels). Des déchets supplémentaires sont produits.

Données d'exploitation

Dans des conditions de fonctionnement stables, les filtres électrostatiques peuvent atteindre, de manière sûre, des émissions de poussières situées entre 5 et 20 mg/Nm³ (cf. Section 2.3.3.1.1). En 2005, des exemples issus d'usines à chaux finlandaises ont montré que des émissions de poussières de moins de 5 mg/Nm³ pouvaient être atteintes sur des mesures ponctuelles en utilisant le coke et le charbon comme combustibles dans des fours rotatifs.

L'efficacité d'un ESP existant peut être améliorée par l'addition de chambres (champs électriques) en ligne. Toutefois, cette amélioration n'est réaliste que si le niveau d'émission de poussières réel est élevé et dépend de la disponibilité d'un espace suffisant.

Applicabilité

Les filtres électrostatiques sont adaptés à des températures dépassant le point de rosée et atteignant 400 °C (avec une structure en acier doux). De plus, il est également possible d'utiliser les ESP à des températures proches ou inférieures au point de rosée.

En raison des débits élevés et des charges de poussières relativement importantes, les fours rotatifs sans préchauffeurs, principalement, mais aussi les fours rotatifs avec préchauffeurs, sont équipés d'ESPs. Dans certains cas, ils sont choisis à cause de la température élevée des gaz d'exhaure ; dans d'autres, c'est parce que les fours ont de grosses capacités de production, générant donc d'importants volumes de gaz. Dans le cas de la combinaison avec une tour de quench, d'excellentes performances peuvent être obtenues.

Économie

Les coûts d'investissement des ESP par rapport aux filtres à manches augmentent en fonction de la taille du four et de la capacité de production journalière, comme le montre la Figure 2.46.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Température et débit des gaz résiduels ;

Investissements (situation locale) ;

Frais opérationnels d'exploitation ;

Consommation d'énergie ;

Technique éprouvée.

Exemples d'installations et documentation de référence

Lappeenranta, Nordkalk Oy (Finlande), Rheinkalk GmbH Flandersbach (Allemagne), Hönnetal (Allemagne), usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006], [63, Finlande, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

2.4.5.3.2 Filtres à manches**Description et avantages environnementaux obtenus**

Dans un filtre à manches, le principe de base de la filtration consiste à utiliser une membrane textile qui est perméable au gaz, mais qui retiendra les particules de poussière. Initialement, la poussière se dépose à la fois sur la surface et dans la profondeur du textile. À mesure que la couche de surface augmente, les particules de poussière elles-mêmes deviennent la couche filtrante dominante. À mesure que la couche de poussière s'épaissit, la résistance au flux de gaz augmente (perte de charge).

Un nettoyage régulier de la couche filtrante est donc nécessaire pour contrôler la perte de charge des gaz à travers le filtre. Les méthodes de nettoyage courantes comprennent le contre-courant d'air, le battage mécanique, le nettoyage par vibration et par pulses d'air comprimé (nettoyage sous pression).

Le circuit de nettoyage, le courant d'air et la charge de surface de la couche filtrante sont des éléments clés d'une filtration efficace. Un filtre à manches doit avoir plusieurs compartiments (qui influent sur les coûts d'investissement et sur la taille du filtre – surface et volume) pouvant être isolés en cas de rupture d'une manche ; ils doivent être suffisamment nombreux pour que le filtre conserve son efficacité si un compartiment doit être arrêté pour maintenance par exemple. De plus, chaque compartiment doit être muni d'un « détecteur de manche percée » indiquant le besoin de maintenance lorsque cela arrive.

La poussière sera stockée dans un silo ou « silo à poussière » (faisant partie du compartiment) et extraite par des convoyeurs à vis, des registres et/ou des vannes rotatives comme le montre la Figure 2.44.

Les filtres à manches peuvent fonctionner en surpression, ainsi que dans des conditions de dépression.

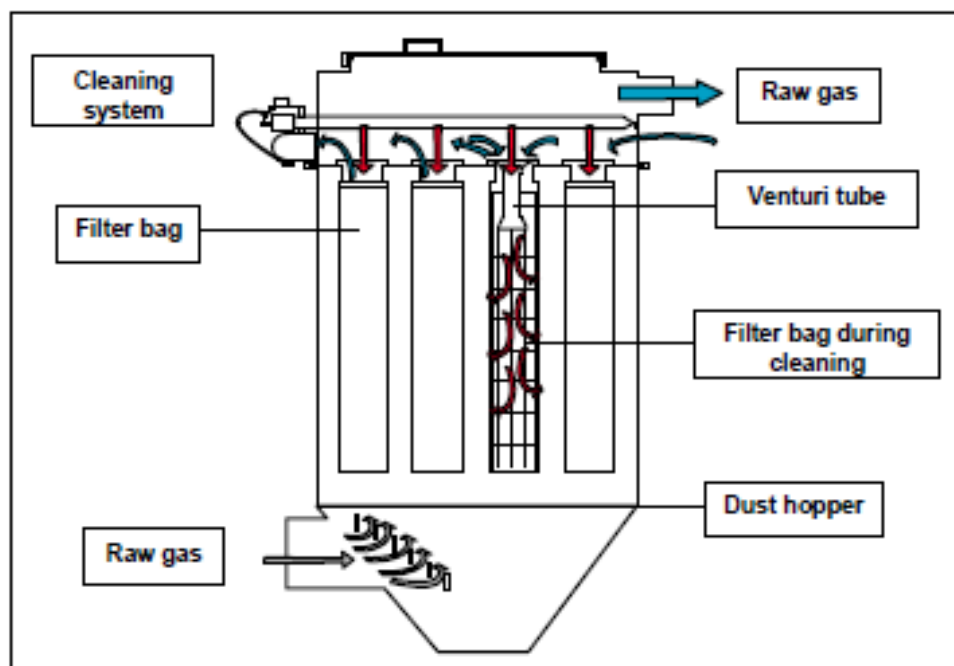


Figure 2.44 : Schéma d'un filtre à manches à nettoyage par jets d'air pulsé
[54, EuLA, 2006]

Selon la température des gaz d'exhaure, différents types de matériaux pour les filtres peuvent être utilisés. Les raisons d'une courte durée de vie des manches peuvent être les suivantes :

- Les conditions de température au démarrage ;
- les conditions de température à l'arrêt ;
- les montées de température ;
- la composition des gaz résiduels ;
- le comportement de la poussière de chaux (colmatage).

Dans l'un des cas, il a été considéré que la dimension insuffisante du filtre était à l'origine de la courte durée de vie des manches. Le problème a été résolu par un agrandissement de celui-ci et il atteint désormais moins de 5 mg/Nm^3 avec une durée de vie garantie de deux ans pour les manches. On a aussi utilisé des manches en matériaux spéciaux et de qualités spéciales, mais eux aussi ont présenté des problèmes de longévité dans certains cas. Sur l'un des sites, il a été jugé que la température d'exploitation périodiquement excessive était la cause de ces problèmes [24, Junker, 2001].

Effets croisés

Augmentation de la consommation d'énergie spécifique en raison de la perte de charge élevée (couche filtrante textile et couche de poussière à la surface).

Augmentation de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ en raison d'un chauffage supplémentaire des gaz résiduels de haute teneur en eau et faible température (<120 °C) afin d'empêcher la corrosion du filtre et le colmatage des manches.

Le fonctionnement des filtres à manches, en particulier avec régénération par pression pulsée, peut provoquer des émissions de bruit.

Dans certains cas, de petits défauts dans les soudures et un début de corrosion (qui sont difficiles à détecter) peuvent créer un bypass et conduisent à des émissions de poussières accrues qui dépassent le niveau observé en fonctionnement normal.

Une surface de filtre insuffisante provoque une vitesse de filtration trop rapide, lorsque l'air de refroidissement passe dans le dispositif.

Des déchets supplémentaires sont produits.

Données d'exploitation

Les filtres à manches fonctionnent généralement à des températures supérieures au point de rosée, atteignant 180 à 200 °C pour un tissu spécial, et jusqu'à 250 °C pour des matériaux tels que la fibre de verre et le téflon. Cependant, ils peuvent être utilisés au point de rosée pour traiter les émissions des stations d'hydratation.

Pour les filtres à manches bien conçus, utilisés et entretenus (dépoussiérage des manches en continu), on obtient des émissions de poussières inférieures à 10 mg/Nm³ (60 % de l'UE des 27) et des émissions de poussières inférieures à 20 mg/Nm³ sont relevées. Dans une usine à chaux de Finlande, les émissions de poussières, mesurées une fois par an, se situaient dans une plage de 0,7 à 1,1 mg/Nm³ (4,3 % de O₂) en 2004 et de 1,7 à 2,2 mg/Nm³ (4,3 % de O₂) en 2005. Ces émissions ont été obtenues dans un four vertical annulaire utilisant des filtres à manches et du combustible lourd et léger pour la combustion. De plus, en Finlande en 2004, un PFRK a atteint des émissions de poussières de 6 mg/Nm³ (court terme, 9,6 % de O₂) en utilisant des filtres à manches et du gaz de coke en tant que combustible (cf. également Tableau 4.37). En 2005, des plages d'émissions de poussières entre 1,7 et 2,2 mg/Nm³ ont été atteintes dans un four vertical annulaire en utilisant un filtre à manches (mesures simples).

L'efficacité et le chargement des manches des filtres à manches sont en général contrôlés en mesurant la perte de charge entre le gaz brut et le gaz propre. Les unités équipées de filtres à manches atteignent une rétention de particules élevée, habituellement supérieure à 98 et atteignant 99,9 % selon la taille de particule et peuvent être utilisées dans tous les types de four (cf. Section 4.3.2.3).

Applicabilité

Les filtres à manches pour le dépoussiérage des effluents gazeux peuvent, en principe, être appliqués à l'industrie de la chaux pour tous les types de four à chaux et sont largement utilisés pour le dépoussiérage. Ils sont bien adaptés pour les fours, les stations de broyage et de concassage pour la chaux vive et le calcaire ; pour les stations d'hydratation ; le transport de matériaux ; et les installations de stockage et de déchargement. Une combinaison avec des préfiltres à cyclone est souvent utile.

Le fonctionnement des filtres à manches est limité par les conditions des gaz résiduels telles que la température, l'humidité, la charge de poussières et la composition chimique. Il existe différents tissus disponibles résistants à l'usure mécanique, thermique et chimique, qui répondent à ces conditions.

Les températures d'exploitation peuvent atteindre 250 °C pour les gaz résiduels des fours utilisant des matériaux thermorésistants. Les températures supérieures nécessitent un refroidissement des gaz par trempe avec de l'eau ou de l'air.

Les gaz résiduels à forte teneur en eau et faible température (<120 °C) doivent être chauffés afin d'empêcher la corrosion du filtre et le colmatage des manches. Cela nécessite l'installation d'un système de chauffage supplémentaire avant le filtre. Le corps du filtre est souvent isolé et les pièces critiques sont chauffées et/ou constituées d'acier inoxydable.

La grande vitesse des gaz résiduels réduira l'efficacité du nettoyage des manches. En conséquence, la pression de l'air de nettoyage doit être augmentée pour que les manches restent propres, ce qui raccourcit leur durée de vie. Une vitesse de filtration de 0,9 à 1,2 m/min a été recommandée.

Il est nécessaire d'avoir un contrôle total du courant laminaire dans le filtre afin d'éviter que la manche du filtre et la structure en acier subissent des dommages. Cela n'est pas simulé par les modèles, mais doit être trouvé par l'expérience en exploitation, par exemple sur la manière de positionner les souffles. Cela dépend du type de matériaux utilisés pour le filtre, ainsi que de la répartition du débit de gaz dans le filtre. Il est également important de fonctionner au-dessus du point de rosée, car dans le cas contraire, la structure en acier sera attaquée par la corrosion. Dans certains cas, lorsque des problèmes (importants) de corrosion surviennent, certaines parties du filtre doivent être construites en acier inoxydable.

Économie

Les coûts d'investissement des filtres à manches augmentent en fonction de la taille du four et de la capacité journalière, comme le montre la Figure 2.46 (cf. Section 2.4.5.3.5). Les coûts de maintenance et d'énergie sont indiqués sur la Figure 2.47 et la Figure 2.48 (cf. Section 2.4.5.3.5).

Dans les usines à chaux autrichiennes, les coûts d'investissement pour l'installation d'un filtre à manches ont représenté entre 350 000 et 500 000 euros, sans le filtre lui-même et sans les périphéries. Les coûts d'exploitation sont d'environ 0,5 à 1,0 euro par tonne [66, Autriche, 2006].

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales ;
Température et débit des gaz résiduels ;
Frais d'investissement (situation locale) ;
Frais opérationnels d'exploitation ;
Consommation d'énergie ;
Technique éprouvée.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27, usine de Tytyri en Finlande.
[24, Junker, 2001] [45, Schorcht, 2006], [54, EuLA, 2006], [63, Finlande, 2006], [66, Autriche, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.5.3.3 Séparateurs de poussières par voie humide

Description et avantages environnementaux obtenus

Avec les séparateurs de poussières par voie humide, la poussière est éliminée des courants d'effluents gazeux en amenant ces derniers au contact d'un liquide de lavage (habituellement de l'eau), de sorte que les particules de poussières soient retenues dans le liquide et soient éliminées par rinçage. Les séparateurs de poussières par voie humide peuvent être classés en différents types selon leur conception et leurs principes de fonctionnement (par exemple, de type Venturi), mais les types les plus couramment utilisés pour les fours à chaux sont les épurateurs en voie humide étagés/en cascades, tels que représentés sur la Figure 2.45.

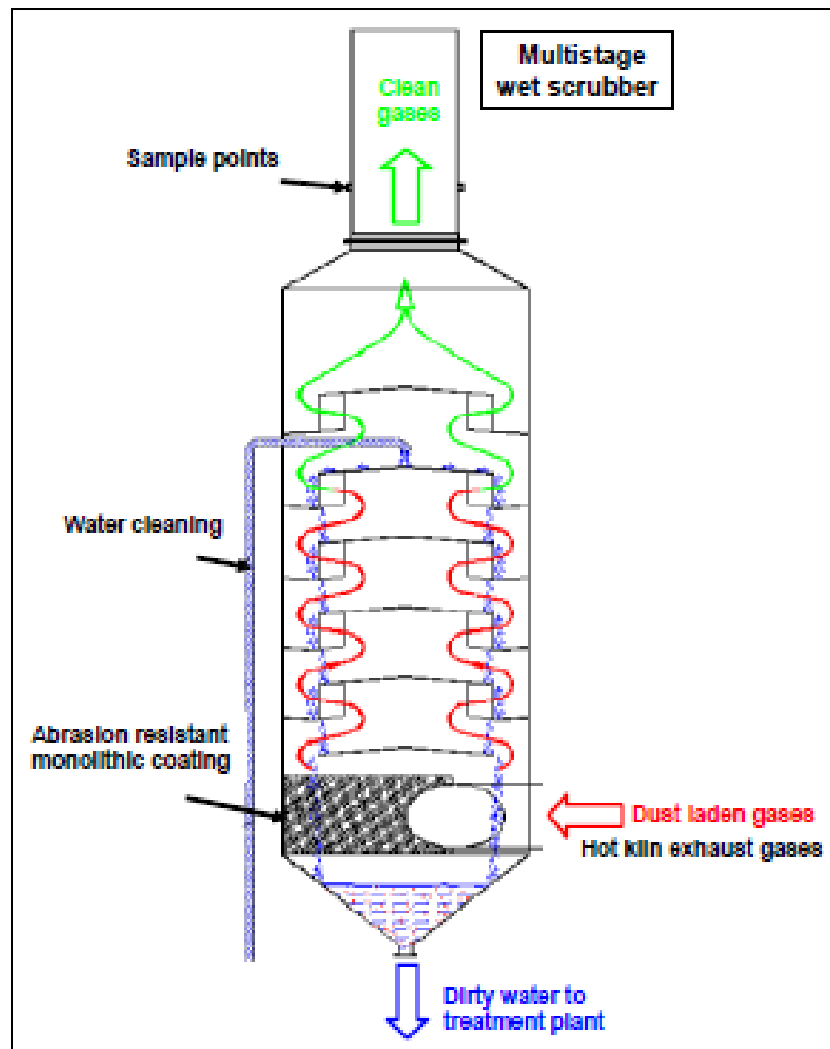


Figure 2.45 : Vue schématique d'un exemple d'épurateur en voie humide de gaz d'exhauste à plusieurs étages
[54, EuLA, 2006]

Les gaz bruts du four passent à travers l'épurateur en voie humide en cascades/étagés avant d'être libérés dans l'atmosphère. L'eau est pompée vers l'unité, puis tombe en cascades à travers les différentes sections où la poussière est entraînée et est finalement évacuée vers la station de traitement des eaux. Les boues produites par l'épurateur en voie humide d'un four peuvent être vendues comme produit neutralisant ou éliminées après les avoir débarrassées de leur eau. L'eau est généralement recyclée.

Il existe un certain nombre de types d'épurateurs en voie humide différents disponibles pour le dépolluage. Les principaux types qui ont été utilisés dans les fours à chaux sont les épurateurs en voie humide en cascades/étagés, les épurateurs en voie humide dynamiques et les épurateurs en voie humide venturi. La majorité des épurateurs en voie humide utilisés dans les fours à chaux sont des épurateurs en voie humide en cascades/étagés ainsi que représenté sur la Figure 2.45. Il est possible qu'afin d'obtenir des chargements de gaz propres plus faibles, les unités doivent être surdimensionnées pour cette tâche, présenter des sections de cascade supplémentaires ou avoir une faible charge de poussières d'entrée du fait des pierres lavées.

En utilisant l'épurateur venturi, le gaz est passé par une canalisation où la vitesse peut atteindre 60 à 120 m/s. L'eau, ajoutée en aval de la canalisation, est éclatée en fines gouttelettes par les forces pneumatiques, se mélangeant ainsi intimement avec le gaz. Les particules de poussières, capturées par les gouttelettes, deviennent alors plus lourdes et sont facilement récupérées dans un séparateur par entraînement (généralement à cyclones) raccordé à l'épurateur venturi.

La matière collectée se présente sous la forme de boue de sorte qu'il n'y a aucune émission de poussières diffuses lors de sa manutention. Sous une alimentation en eau constante, la performance de l'épurateur par voie humide restera constante et ne nécessite le remplacement d'aucune pièce consommable.

Effets croisés

La consommation d'eau sera accrue.

La teneur en eau des gaz propres sera plus élevée.

Au niveau de la cheminée du four, un panache peut apparaître en raison de sa forte teneur en eau selon les conditions atmosphériques et l'humidité relative.

Des eaux usées supplémentaires peuvent être produites.

Le nettoyage du liquide de lavage et des eaux usées de procédé, la manutention, l'utilisation et l'élimination des boues doivent également être pris en compte.

De l'énergie supplémentaire peut être utilisée pour le traitement des eaux usées.

Une émission de bruit peut survenir.

Il est possible qu'afin d'obtenir des chargements de gaz propres plus faibles, les unités doivent être surdimensionnées, présenter des sections de cascade supplémentaires ou avoir une faible charge de poussières d'entrée du fait des pierres lavées.

Des frais d'investissement et de maintenance supplémentaires peuvent être engendrés.

Données d'exploitation

En utilisant de nouvelles générations d'épurateurs en voie humide, les niveaux d'émission après réduction varient de 10 à 30 mg/Nm³, ce qui correspond à environ 0,008 à 0,024 kg/tonne de chaux hydratée. Au Royaume-Uni en 2007, les épurateurs en voie humide les plus modernes ont donné des résultats de 11 mg/Nm³, 17 mg/Nm³ et 18 mg/Nm³. Cependant, des émissions de poussières atteignant 60 mg/Nm³ ont également été relevées (exprimées dans des conditions humides) [168, TWG CLM, 2007], [177, EULA, 2008].

Lorsqu'ils sont utilisés efficacement, les épurateurs en voie humide en cascades/étagés peuvent atteindre des concentrations de gaz propres inférieures à 30 mg/Nm³; cependant, dans la plupart des cas, les émissions de poussières sont supérieures à 30 mg/Nm³. La Figure 2.35 (cf. Section 2.3.3.1.1) montre que seuls environ 30 % des épurateurs en voie humide ont atteint des niveaux d'émission inférieurs à 30 mg/Nm³, environ 12 % ont atteint des niveaux inférieurs à 20 mg/Nm³ et aucun n'a atteint des niveaux inférieurs à 10 mg/Nm³. Toutefois, la plage la plus faible est atteinte par une utilisation efficace des épurateurs en voie humide en cascades/étagés et/ou au moyen de nouvelles générations d'épurateurs en voie humide.

Comparé aux ESP et aux filtres à manches, le niveau d'émission que les épurateurs en voie humide peuvent atteindre peut être sensiblement plus élevé.

La consommation d'eau caractéristique d'un épurateur en voie humide en cascades/étagé est d'environ 100 l/t de chaux.

Applicabilité

Les épurateurs en voie humide sont choisis lorsque la température des gaz d'exhaure est proche ou inférieure au point de rosée. Ils peuvent également être choisis lorsque l'espace est limité.

Les épurateurs en voie humide sont parfois utilisés à des températures de gaz plus élevées; dans ce cas, l'eau refroidit les gaz et réduit leur volume.

Économie

Concernant les coûts d'exploitation, le nettoyage du liquide de lavage et des eaux usées de procédé doit être pris en compte.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Shapfell Limeworks, Royaume-Uni.

[54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [177, EULA, 2008], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.5.3.4 Séparateurs centrifuges/cyclones**Description et avantages environnementaux obtenus**

Dans un séparateur centrifuge/cyclone, les particules de poussières à éliminer d'un courant d'effluents gazeux sont expulsées vers la paroi extérieure de l'unité sous l'effet de la force centrifuge et sont ensuite éliminées par une ouverture au fond de l'unité. La force centrifuge peut être générée en soumettant le flux de gaz à un mouvement en spirale vers le bas dans un récipient cylindrique (séparateurs cycloniques) ou au moyen d'un rotor installé dans l'unité (séparateurs centrifuges mécaniques). Cependant, ils ne sont adaptés qu'en tant que préséparateurs en raison de leur efficacité d'élimination des particules limitée, mais soulagent les ESP et les filtres à manches d'une forte charge de poussières et réduisent les problèmes d'abrasion.

Effets croisés

Le fonctionnement des séparateurs centrifuges est une source de bruit importante.

Données d'exploitation

De manière caractéristique, les cyclones éliminent environ 90 % des poussières des fours à chaux. En tant que préséparateurs/séparateurs de produit, ils ne peuvent atteindre, de manière caractéristique, que des valeurs d'émission de poussières inférieures à 150 mg/Nm³.

Les séparateurs centrifuges fonctionnent plus efficacement à des charges de polluants plus élevées à la condition que le dispositif ne s'obstrue pas.

Applicabilité

Les cyclones sont relativement peu onéreux et simples d'utilisation, mais les particules de faible diamètre ne sont pas capturées efficacement. L'application des séparateurs centrifuges/cyclones peut être limitée lorsque la granulométrie est trop faible. En raison de leur efficacité d'élimination de particules limitée de manière inhérente, ils ne sont adaptés qu'en tant que préséparateurs et sont principalement utilisés pour le prénettoyage des gaz d'exhaure des stations de broyage, des fours et d'autres procédés.

Économie

Les cyclones sont relativement peu onéreux comparés aux ESP et aux filtres à manches. Pour les filtres à manches et les ESP, les frais d'investissement (qui dépendent de la taille du four et de la capacité journalière) sont indiqués sur la Figure 2.46 et les frais de maintenance et d'énergie sont indiqués sur la Figure 2.47 et la Figure 2.48 (cf. Section 2.4.5.3.5).

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Économies de matières premières.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[16, EuLA, 2001], [54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.5.3.5 Exemples de données de coût pour les différentes techniques de nettoyage des gaz résiduels

Certains exemples de données de coût concernant la réduction des émissions de poussières au moyen de différentes techniques de réduction sont présentés dans le Tableau 2.37.

Il existe trois techniques de dépoussiérage principales utilisées pour les fours à chaux :

- les filtres à manches ;
- les filtres électrostatiques (ESP) ;
- les épurateurs en voie humide.

Les coûts d'investissement sont affectés par la taille du filtre et les conditions d'exploitation. Les températures et les composants des gaz peuvent nécessiter plusieurs installations supplémentaires, notamment :

- une isolation ;
- un chauffage/refroidissement ;
- une protection contre la corrosion et l'usure.

Par conséquent, les coûts d'investissement varient sensiblement. Les principaux facteurs de coût sont les investissements, la maintenance et l'énergie.

Les coûts d'investissement des ESP par rapport aux filtres à manches augmentent en fonction de la taille du four et de la capacité de production journalière, comme le montre la Figure 2.46.

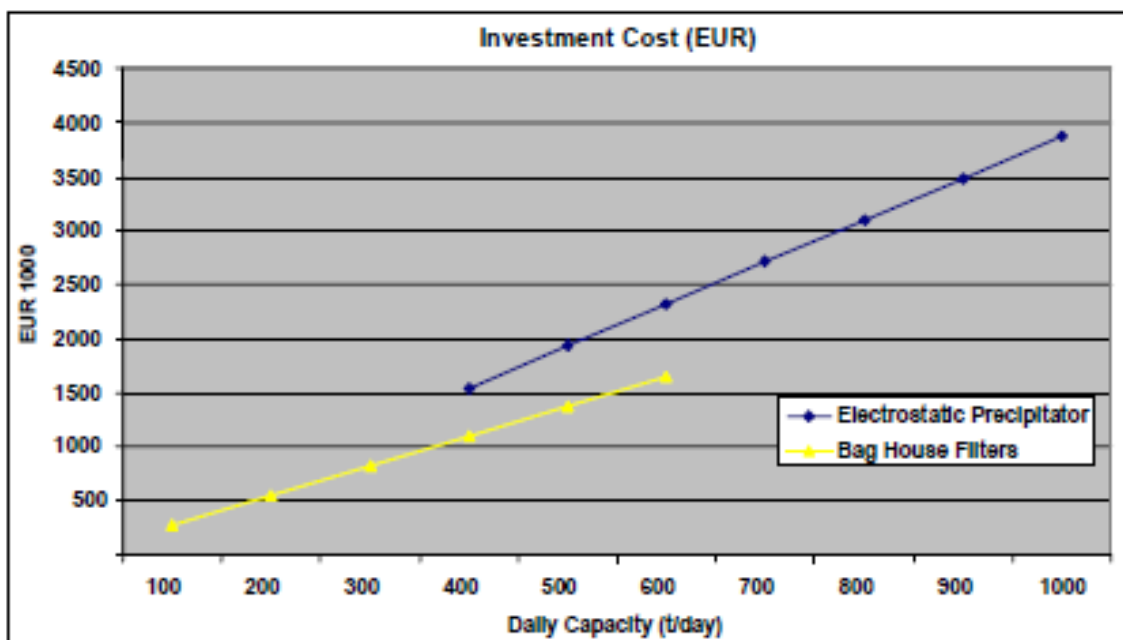


Figure 2.46 : Coûts d'investissement en fonction de la capacité du four pour les filtres électrostatiques (ESP) et les filtres à manches – UE des 27 [54, EuLA, 2006]

Les coûts d'investissement pour l'équipement varient de EUR 300 000 à 400 000 selon la capacité du four et les influences spécifiques du site. On observe une augmentation des coûts de maintenance et d'énergie à mesure que le niveau d'émission diminue, comme le montre la Figure 2.47 et la Figure 2.48.

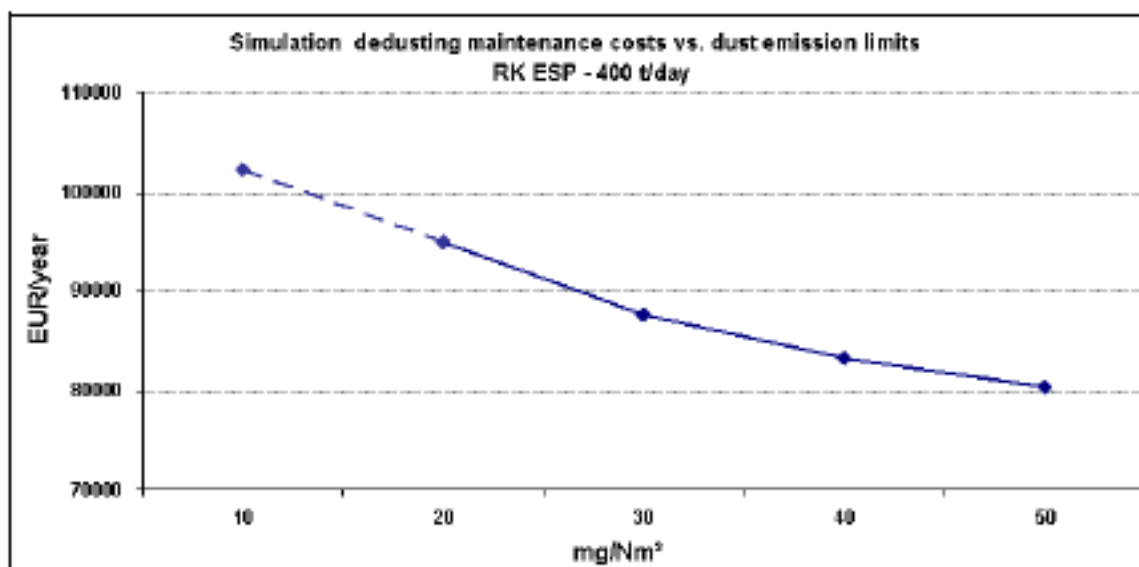


Figure 2.47 : Simulation des coûts de dépoussiérage en fonction des limites d'émission de poussières pour un four rotatif (RK) équipé d'un ESP – UE des 27
[54, EuLA, 2006]

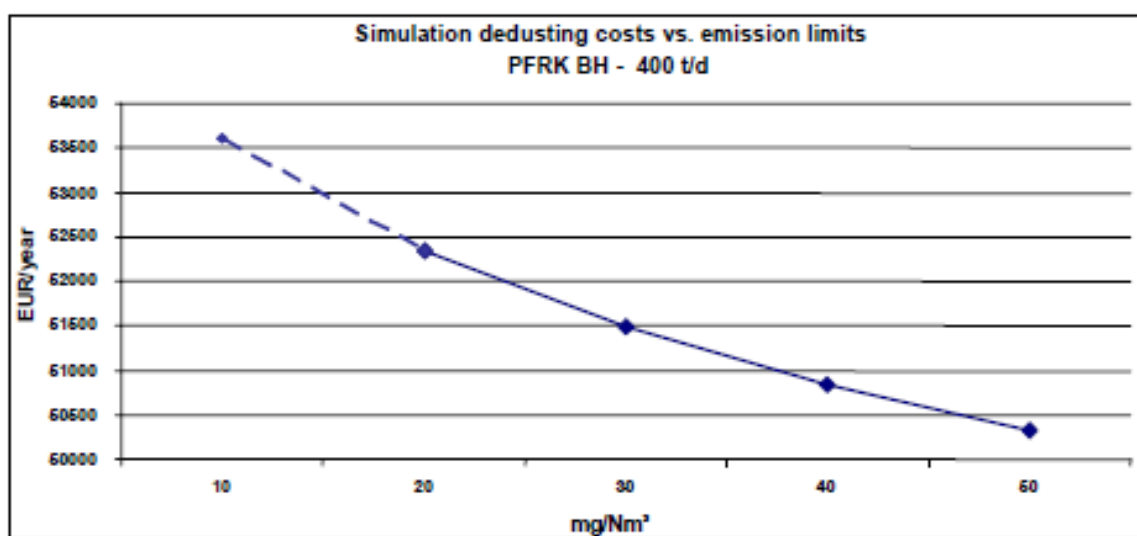


Figure 2.48 : Simulation des coûts de maintenance pour le dépoussiérage en fonction des limites d'émission de poussières pour un four à cycles alternés (PFRK) équipé de filtres à manches – UE des 27
[54, EuLA, 2006]

En 2007 en Italie, une étude a été menée sur 33 PFRK italiens et les coûts de dépoussiérage, qui dépendent des plages d'émission de poussières des PFRK, ont été examinés. Cette étude a montré une corrélation parabolique entre les coûts de dépoussiérage et la concentration des émissions de poussières. Le rapport des coûts est d'environ 2 pour les plages d'émissions de poussières situées entre 20 et 50 mg/Nm³, ainsi que pour les plages d'émissions de poussières situées entre 10 et 20 mg/Nm³, comme le montre la Figure 2.49.

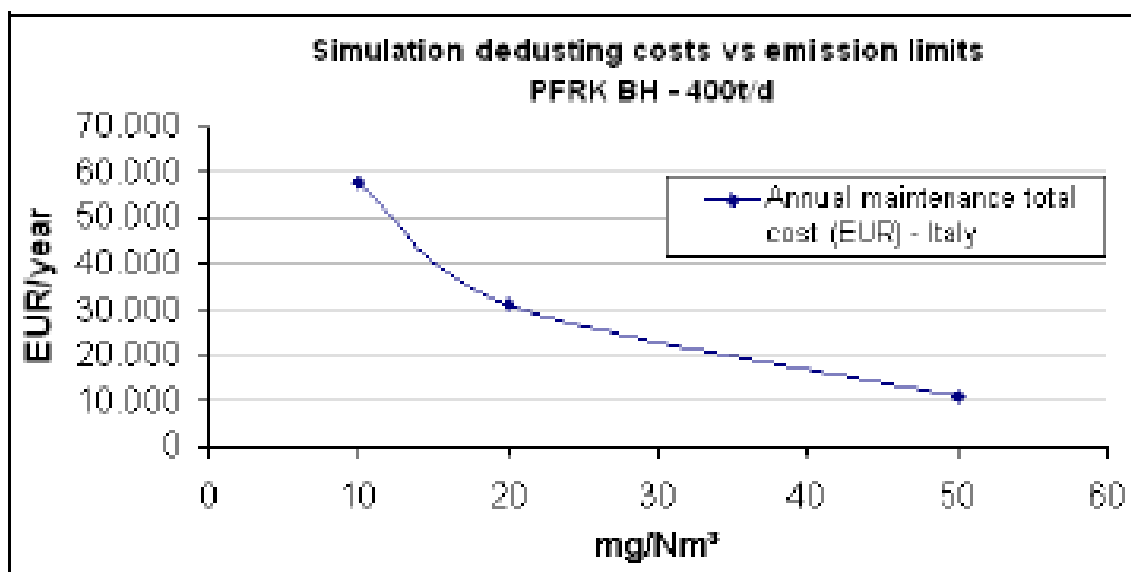


Figure 2.49 : Simulation des coûts de maintenance pour le dépoussiérage en fonction des plages d'émission de poussières pour des fours à cycles alternés (PFRK) équipés de filtres à manches en Italie en 2007

[168, TWG CLM, 2007], [169, Italie, 2007], [177, EULA, 2008]

Le Tableau 2.37 ci-dessous présente des exemples de calculs de coût pour les techniques de réduction de poussières d'une usine à chaux française de référence. Les techniques de réduction de poussières des ESP et des filtres à manches, qui sont celles qui ont été étudiées, ont été prises en compte. Les coûts d'exploitation variables comprennent les coûts d'électricité, les coûts de main-d'œuvre et les coûts d'élimination des poussières et sont mentionnés dans ce tableau. De plus, des données relatives aux épurateurs en voie humide sont incluses.

Investissements et coûts des techniques de réduction de poussières				
Paramètre	Unité	Technique de réduction		
		ESP ⁰⁾	Filtre à manches ⁰⁾	Épurateur en voie humide
Description de l'installation de référence				
Capacité	t de chaux/j	140	140	
Capacité	t/an			50 000
Facteur d'utilisation	h/an	7 680	7 680	
Débit de gaz d'exhaure	Nm ³ /h ¹⁾	23 333	23 333	
Coûts d'investissement	k EUR	600	700	6 – 18
Coûts annualisés d'immobilisation du capital	k EUR			
Taux d'intérêt	%/100/an	4	4	
Durée de vie de l'équipement de contrôle	an	10	10	
Total	k EUR	73,97	86,30	
Total	k EUR/tonne de chaux	1,65E-03	1,93E-03	
Coûts d'exploitation fixes	%/an ²⁾	4	4	
Total	k EUR	24	28	
Total	k EUR/tonne de chaux	5,36E-04	6,25E-04	1,0 – 5,0E-04 (0,1 – 0,5 EUR/tonne de chaux)
Coûts d'exploitation fixes	k EUR/tonne de chaux	8,06E-04	9,03E-04	
Coûts par tonne de chaux	k EUR/tonne de chaux	2,99E-03	3,45E-03	
Coûts par tonne de PM ³⁾ réduite	k EUR/t de PM réduite			
Émissions avant réduction	t de PM/t de chaux	0,015	0,015	
Émissions après réduction	t de PM/t de chaux	0,0002	0,0002	
Total	k EUR/t de PM réduite	0,202	0,233	
Détermination des coûts d'exploitation variables				
Coûts d'électricité ⁴⁾				
Demande en électricité supplémentaire (λ ^e) ⁵⁾	kWh/t de chaux	6,86 40 kW	8,57 50 kW	
Prix de l'électricité (c ^e)	EUR/kWh	0,0569	0,0569	
Total	k EUR/tonne de chaux	3,90E-04	4,88E-04	
Coûts de main-d'œuvre ⁶⁾				
Demande de main-d'œuvre (λ ^l)	année-personne/t de chaux	1,12E-05	1,12E-05	
Salaires (c ^l)	k EUR/année-personne	37,234	37,234	
Total	k EUR/tonne de chaux	4,16E-04	4,16E-04	
Coûts d'élimination des poussières ⁷⁾				
Total	k EUR/tonne de chaux	0	0	
Total des coûts d'exploitation variables	k EUR/tonne de chaux	8,06E-04	9,03E-04	
K EUR = mille euros ⁰⁾ données 2000 1) 10 % de O ₂ et gaz sec 2) D'investissement 3) Répartition 50 % de ESP et 50 % de filtres à manches ; utilisation de la moyenne entre ESP et filtres à manches 4) Coûts d'électricité = λ ^e • c ^e /10 ³ (k EUR/t) 5) Demande d'électricité supplémentaire = nouvelle consommation totale – ancienne consommation totale 6) Coûts de main-d'œuvre = λ ^l • c ^l (k EUR/t) 7) Coûts d'élimination des poussières = λ ^d • c ^d • e _{non-traité} • η/10 ³ (k EUR/t) E _{non-traité} : facteur d'émission avant réduction d'un polluant (t de polluant/t) λ ^d : demande de mise en décharge de poussières (t/t de polluant éliminé) c ^d : coût de l'élimination spécifique des poussières (EUR/t) η : efficacité d'élimination (=1 - e _{ftraité} /e _{non-traité})				

Tableau 2.37 : Investissements et coûts des techniques de réduction de poussières

Le Tableau 2.38 ci-dessous présente la proportion des coûts, en fonction du calcul des coûts du Tableau 2.37, et particulièrement pour les différents coûts inclus dans les coûts d'exploitation.

Proportion des coûts inclus dans les coûts d'exploitation variables			
Type de coûts	Unité	Mesure/technique de réduction	
		ESP	Filtre à manches
Coûts d'électricité	%	48,42	53,99
Coûts de main-d'œuvre	%	51,58	46,01
Coûts d'élimination des poussières	%	0,00	0,00
Total des coûts d'exploitation variables	%	100,00	100,00

Tableau 2.38 : Parts des différents types de coûts inclus dans les coûts d'exploitation des mesures/techniques de réduction
[61, France, 2006]

En Autriche, les coûts d'installation d'un filtre à manches se situaient entre EUR 350 000 et 500 000. Les coûts des périphéries ne sont pas inclus dans ces coûts d'installation [66, Autriche, 2006].

2.4.6 Composés gazeux

2.4.6.1 Réduction des émissions de NO_x

Les émissions de NO_x les plus élevées sont observées pour les fours rotatifs. Par conséquent, la priorité est donnée au contrôle des émissions de NO_x des fours rotatifs (cf. Section 2.3.3.2).

Les possibilités de réduction des émissions de NO_x peuvent être réparties comme suit :

- mesures/techniques primaires visant à réduire la formation de NO_x et
- mesures/techniques secondaires visant à détruire les oxydes d'azote en les réduisant en N₂.

Les mesures/techniques primaires comprennent en particulier :

- le choix du combustible (limitation de la teneur en azote du combustible)
- l'optimisation du procédé (mise en forme de flamme et profil de température)
- la configuration du brûleur (brûleur bas NO_x)
- l'étagement de l'air.

Ces mesures/techniques sont les plus rentables, mais leur efficacité est limitée en particulier par la conception de la chambre de combustion des fours rotatifs et par les niveaux de température requis pour maintenir la qualité de la chaux.

Les mesures/techniques secondaires peuvent être réparties comme suit :

- réduction sélective non catalytique (SNCR) et
- réduction sélective catalytique (SCR).

Ces deux mesures/techniques utilisent des composés azotés qui réagissent avec les oxydes d'azote en les réduisant pour former du N₂. Les procédés catalytiques impliquent habituellement des coûts d'investissement élevés.

Le Tableau 2.39 présente les mesures/techniques de réduction des NO_x qui peuvent être applicables à certains fours à chaux.

Mesure/technique	Applicabilité	Efficacité de réduction %	Données sur les émissions ⁴⁾⁵⁾		Coûts ³⁾	
			mg/Nm ^{3,1)}	kg/tonne ²⁾	Investissement	Exploitation
					EUR million	EUR/t de chaux
Optimisation du procédé	PFRK, ASK, MFSK, OSK		<100 – <350 ^{9) 10)}	0,3 – 1,05		
	LRK, PRK		<200 – <500 ^{9) 10)}	0,74 – 2,5		
Étagement de l'air (en 2007, non appliqué à l'industrie de la chaux dans l'UE des 27)	LRK, PRK	-				
Brûleurs bas- NO _x	LRK, PRK	0 – 20			Dans la plage de techniques de brûleur conventionnelles	Dans la plage de techniques de brûleur conventionnelles
SNCR ¹¹⁾	PRK (grille Lepol)	30 – 80	<500 ¹⁰⁾	<2,5	0,5 – 1,2	0,1 – 1,7 ⁷⁾
SCR (en 2007, non appliqué à l'industrie de la chaux dans l'UE des 27)	LRK, PRK	6)	-	-	8)	8)

1) Pour les systèmes de four, fait normalement référence à des moyennes journalières, gaz sec, 273 K, 101,3 kPa et 11 % de O₂

2) kg/tonne de chaux sur la base de :

- 3 000 Nm³/t de chaux pour les ASK et les PFRK
- 3 700 Nm³/t de chaux pour les PRK
- 5 000 Nm³/t de chaux pour les LRK

3) Fait référence à différentes capacités de four, cf. Figure 2.46 et Tableau 2.37

4) État de référence, 11 % d'oxygène

5) Les données sur les émissions peuvent être consultées dans le paragraphe correspondant de la présente section

6) Selon le catalyseur utilisé, cf. Section 2.4.6.1.5

7) Estimations financières fondées sur les essais préliminaires correspondant à une capacité de four de 1000 t/jour et des émissions initiales atteignant 1 500 mg de NO_x/Nm³

8) Semblable à l'industrie du ciment (cf. Tableau 1.34 dans la Section 1.4.5.1, la Section 1.4.8.2 et la Section 2.4.6.1.5), mais pour un volume spécifique plus élevé dans les fours à chaux, les coûts d'investissement devraient être plus importants dans l'industrie de la chaux que dans l'industrie du ciment

9) Le niveau peut être plus élevé selon les spécifications du produit, cf. Section 2.3.3.2 et Figure 2.36

10) Dépend du niveau de NO_x initial

11) En 2007, la SNCR n'a été applicable qu'aux fours à grille Lepol ; un four à chaux (grille Lepol) a été équipé de la SNCR

Tableau 2.39 : Vue d'ensemble des mesures/techniques de réduction de NO_x dans l'industrie de la chaux

De plus, la Figure 2.36 (Section 2.3.3.2) montre que les émissions de NO_x dans les fours verticaux sont en général plus faibles que dans les fours rotatifs en raison de la dépendance par rapport à la température qui provient de la production de différents types de chaux au moyen de différents types de fours à chaux. Comme cela est également indiqué sur la Figure 2.36, environ 68 % des émissions de NO_x des fours rotatifs sont inférieures à 500 mg/Nm³ (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure) et environ 60 % des émissions de NO_x des fours verticaux sont inférieures à 100 mg/Nm³. De plus, environ 80 % des PFRK, des MFSK et des OSK et environ 50 % des ASK atteignent des valeurs d'émission de NO_x <100 mg/Nm³ mesurées en valeurs moyennes sur une demi-heure (cf. Section 2.3.3.2).

2.4.6.1.1 Optimisation du procédé

Description

L'optimisation du procédé, telle que la stabilisation et l'optimisation des conditions de fonctionnement de l'unité et/ou l'homogénéisation des alimentations en combustible et en matières premières, peut être appliquée à la réduction des émissions de NO_x . Les paramètres significatifs pour l'optimisation du contrôle du procédé dans un four à chaux pouvant avoir un effet positif sur les émissions de NO_x en étant optimisés sont :

- la vitesse de chauffage ;
- le niveau de température de chauffe ;
- l'excès d'air ;
- la température de l'air secondaire ;
- la pression des jets d'air ;
- la finesse du charbon pulvérisé ;
- la teneur en matières volatiles du combustible ;
- la position, la longueur et la température de la flamme.

Avantages environnementaux obtenus

Réduction des émissions et de l'utilisation de l'énergie.

Effets croisés

Aucun effet croisé relevé.

Données d'exploitation

Comme cela est indiqué sur la Figure 2.36, environ 68 % des émissions de NO_x des fours rotatifs sont inférieures à 500 mg/Nm^3 (mesures ponctuelles en valeurs moyennes sur une demi-heure) et environ 60 % des émissions de NO_x des fours verticaux sont inférieures à 100 mg/Nm^3 . De plus, environ 80 % des PFRK, des MFSK et des OSK et environ 50 % des ASK atteignent des valeurs d'émission de $\text{NO}_x < 100 \text{ mg/Nm}^3$ mesurées en valeurs moyennes sur une demi-heure (cf. Section 2.3.3.2).

Applicabilité et aspects économiques

L'optimisation du procédé et du contrôle du procédé peut être appliquée à la fabrication de la chaux, mais il convient de noter que, dans la pratique, les courbes de chauffage du procédé de cuisson dans l'industrie de la chaux sont optimisées en fonction de la qualité du produit et de la consommation d'énergie. Par conséquent, les courbes de chauffage ne peuvent être modifiées que si les propriétés techniques du produit final le permettent et il convient de prendre en compte les coûts supplémentaires lors de la modification des courbes de chauffage pour des raisons d'émission.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

2.4.6.1.2 Étagement de l'air

Description et avantages environnementaux obtenus

L'étagement de l'air peut, en principe, être appliqué aux fours à chaux rotatifs. Une zone réductrice est créée en réduisant l'alimentation en oxygène dans les zones de réaction primaires. Les hautes températures régnant dans cette zone sont particulièrement favorables à la réaction qui reconvertit les NO_x en élément azote. Dans les zones de combustion postérieures, l'alimentation en air et en oxygène est augmentée afin d'oxyder les gaz formés. Un mélange air/gaz efficace dans la zone de chauffe est nécessaire pour s'assurer que le CO et les NO_x soient maintenus à de faibles niveaux.

Effets croisés

Aucune information supplémentaire n'est disponible.

Données d'exploitation

En 2007, l'étagement de l'air n'avait pas encore été soumis à l'essai dans l'industrie de la chaux dans l'UE.

Applicabilité

En 2007, l'étagement de l'air n'avait jamais été appliqué dans le secteur de la chaux dans l'UE des 27 ; toutefois, des essais ont montré qu'il était applicable, en principe, aux fours rotatifs, mais pas à ceux produisant de la chaux fortement calcinée. L'étagement de l'air n'est pas applicable aux fours verticaux.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

En 2008, il n'existait aucun exemple d'usine à chaux dans l'UE des 27. [54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.6.1.3 Brûleurs bas NO_x

Description et avantages environnementaux obtenus

Les émissions d'oxydes d'azote dépendent principalement de la qualité de la chaux produite et de la conception du four et sont générées par le procédé de chauffe à des températures supérieures à 1 300 °C. Ces émissions de NO_x peuvent être minimisées par la mise en œuvre de brûleurs bas NO_x spéciaux. Ces brûleurs sont utiles pour réduire la température de la flamme et donc pour réduire les NO_x thermiques et (dans une certaine mesure) les NO_x dérivés du combustible. La réduction des NO_x est obtenue en fournissant de l'air de rinçage pour abaisser la température de la flamme ou au moyen de brûleurs à régime pulsé.

L'air de combustion parvenant à un brûleur dans le four, appelé « l'air primaire », est divisé en deux flux, « l'air tourbillonnaire (de swirl) » et « l'air axial ». L'air axial s'écoule de manière pratiquement parallèle à l'axe du brûleur, tandis que l'air tourbillonnaire a une composante axiale et une composante tangentielle. Tant l'air tourbillonnaire que l'air axial sont nécessaires à la forme de la flamme et assurent la stabilité de la flamme.

Les brûleurs bas NO_x sont conçus pour réduire la part d'air primaire, ce qui conduit à une réduction de la formation de NO_x , tandis que les brûleurs courants à plusieurs conduites fonctionnent avec une proportion d'air primaire de 10 à 18 % de l'air de combustion total. La part plus élevée de l'air primaire donne une flamme courte et intense par le mélange précoce de l'air secondaire chaud et du combustible.

Cela génère des températures de flamme élevées et entraîne une importante formation de NO_x , ce qui peut être évité en utilisant des brûleurs bas NO_x .

Pour utiliser différents types de déchets, il est important de très bien adapter la technique de brûleur au combustible incinéré, en particulier dans le cas de changements de combustible ou de l'utilisation de combustibles issus de déchets liquides.

Effets croisés

Aucun.

Données d'exploitation

Pour un *four vertical annulaire*, une expérience positive a été obtenue avec des brûleurs (débit de combustible de 30 à 50 kg/h) atomisant le combustible par injection d'air à haute pression (6 bar). De plus, le débit d'air de combustion et la forme de la flamme sont optimisés. En 2005 et 2006, des niveaux d'émissions de $\text{NO}_x < 200 \text{ mg/Nm}^3$ (état standard, 10 % d'oxygène) ont été mesurés. Du fait que la teneur en azote et en eau des combustibles peut influencer sur le niveau des émissions de NO_x , il convient de noter que du fioul lourd a été utilisé comme combustible [46, Allemagne, 2006], [157, Allemagne, 2007].

Applicabilité

Les brûleurs bas NO_x ont été adaptés aux fours rotatifs et peuvent également être appliqués aux fours verticaux annulaires pour certaines conditions spécifiques (niveau d'air primaire élevé). Le transfert direct de la technique du brûleur bas NO_x des fours à ciment aux fours à chaux n'est pas direct. Dans les fours à ciment, la température de la flamme est plus élevée et les brûleurs bas NO_x ont été mis au point pour réduire les niveaux initiaux élevés de « NO_x thermiques ». Dans la plupart des fours à chaux, les niveaux de NO_x sont plus faibles et les « NO_x thermiques » sont probablement moins importants.

La technique de brûleur doit être adaptée aux combustibles utilisés, à savoir les combustibles fossiles conventionnels ou les combustibles issus de déchets. Les PFRK ont une combustion sans flamme ; les brûleurs bas NO_x ne sont donc pas applicables à ce type de four.

Aspects économiques

Les coûts d'investissement des brûleurs bas NO_x se situent dans la plage des coûts pour les techniques de brûleurs conventionnelles.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usine à chaux allemande (four vertical annulaire).

[38, Royaume-Uni, 1996], [46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006], [157, Allemagne, 2007]

2.4.6.1.4 Réduction sélective non catalytique (SNCR)

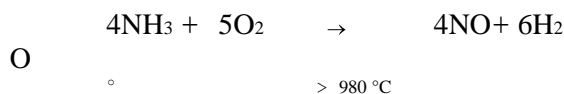
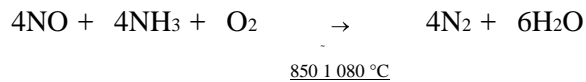
Description et avantages environnementaux obtenus

Dans le procédé de réduction sélective non catalytique (SNCR), les oxydes d'azote (NO et NO_2) des gaz résiduels sont éliminés par réduction sélective non catalytique et convertis en azote et en eau par injection dans le four d'un agent réducteur qui réagit avec les oxydes d'azote. L'ammoniac et l'urée sont utilisés typiquement comme agent réducteur. Les réactions se produisent à des températures situées entre 850 et 1 020 °C, la plage optimale étant située de manière typique entre 900 et 920 °C.

Un bon mélange des gaz résiduels et de l'agent réducteur, une température d'injection optimisée et un temps de séjour suffisant dans la fenêtre de température optimale sont nécessaires. Du fait que ces conditions ne sont pas toujours faciles à atteindre durant les procédés techniques pour la production de chaux, il est nécessaire d'utiliser un excès d'agent réducteur afin d'assurer une efficacité de réduction suffisante.

Toutefois, des rapports NH_3 : NO trop élevés peuvent conduire à des émissions d'ammoniac non souhaitées, appelées « fuites d'ammoniac ». Du fait que les gaz résiduels des fours à chaux ne sont habituellement pas utilisés (pour le séchage des matériaux), il est impossible de capturer ou d'adsorber davantage l'ammoniac en aval. La fuite d'ammoniac peut donc se produire plus facilement dans les fours à chaux que dans les autres procédés industriels.

Les principales réactions du procédé SNCR et la plage de températures pour l'injection de NH_3 sont les suivantes :



La température est un paramètre important. Les réactions indiquées ci-dessus représentent les réactions principales parmi une multitude d'autres réactions concurrentes. La première réaction montre la réduction souhaitée des oxydes d'azote en azote. La seconde décrit la réaction indésirable de l'oxydation de l'ammoniac. Habituellement, cette réaction survient à une température élevée et à une teneur importante en oxygène au niveau du site d'injection. De l'urée liquide peut être injectée à la place de l'ammoniac. L'avantage de l'urée est qu'elle n'est pas dangereuse et est par conséquent bien plus simple à manipuler.

Effets croisés

Des rapports NH_3 : NO trop élevés peuvent conduire à des émissions d'ammoniac (fuites d'ammoniac).

Selon les zones d'injection limitées dans les fours à chaux, une plus grande consommation d'agent réducteur devient nécessaire pour obtenir les niveaux de réduction souhaités. Cela augmente encore le risque de fuite d'ammoniac.

Données d'exploitation

Depuis le mois de juillet 2006, dans l'industrie de la chaux en Allemagne, un essai de réduction sélective non catalytique (SNCR) est mené pour la première fois dans une unité en utilisant des combustibles fossiles et issus de déchets. Une solution d'urée (45 %), 24,5 % d'hydroxyde d'ammonium et des eaux usées contenant de l'ammoniac peuvent être utilisés en tant qu'agent réducteur et leur qualité est contrôlée pour éviter les substances non désirées. L'agent réducteur est injecté dans le préchauffeur à grille (grille Lepol). Le choix de la zone d'injection (buses) est important pour l'efficacité et représente le critère significatif pour la meilleure ventilation des gaz, notamment entre l'entrée du four et la grille. La température de réaction se situe dans la plage de 1 080 à 1 150 °C. Les relations entre la température, la fuite de NH_3 et la réduction des NO_x sont présentées sur la Figure 2.50.

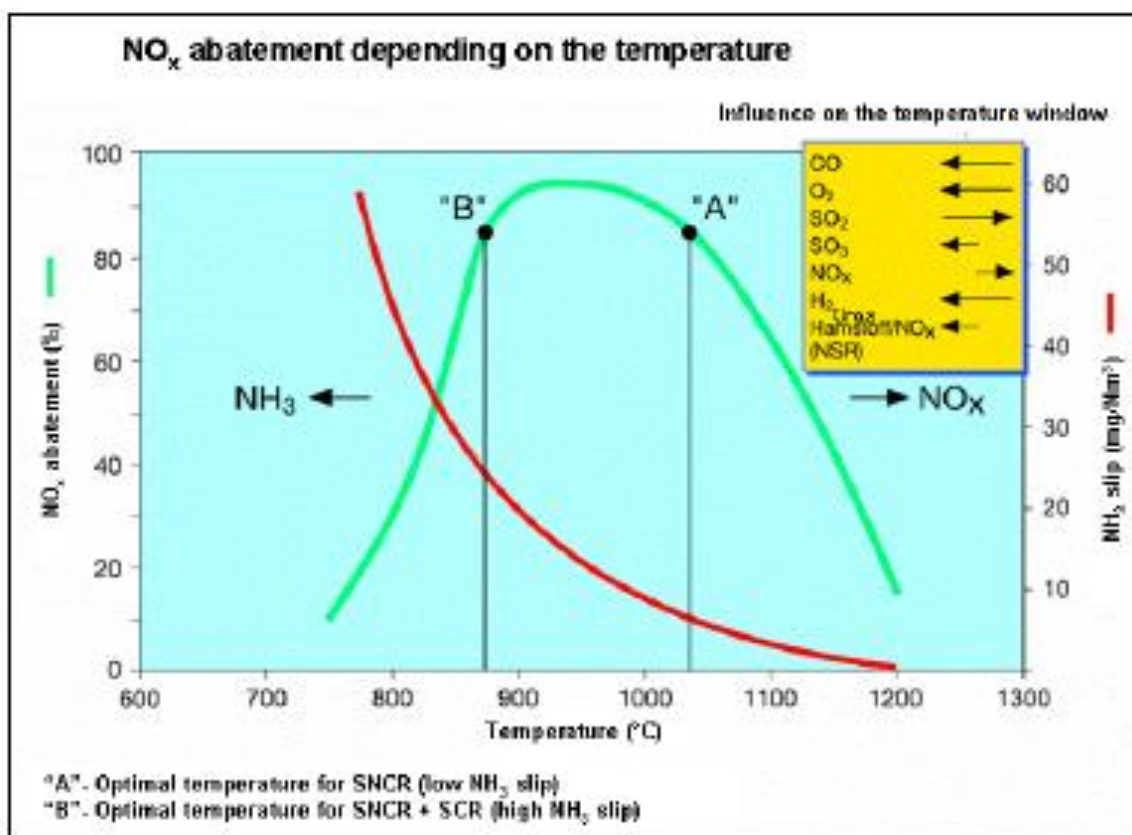


Figure 2.50 : Réduction des NO_x en fonction de la température
[152, Allemagne, 2007]

Les données d'exploitation théoriques pour le procédé SNCR utilisé dans l'industrie de la chaux, telles que la fenêtre de température et l'efficacité de réduction, sont présentées dans le Tableau 2.40.

Procédé	Catalyseur	Fenêtre de température pour la réaction de DeNO _x (°C)	Efficacité de réduction des NO _x (%)
SNCR	Aucun convertisseur catalytique NH ₃ ou (NH ₂) ₂ CO (urée) injecté directement dans la chambre de combustion	850 – 1 150	30 – 80

Tableau 2.40 : Données d'exploitation théoriques pour le procédé SNCR
[93, EuLA, 2006], [152, Allemagne, 2007]

Dans un exemple d'usine à Flandersbach en Allemagne, il a été possible d'obtenir des efficacités de réduction de 50 à 70 %, permettant ainsi de maintenir le niveau des émissions de NO_x inférieur à 500 mg de NO_x/Nm³ en moyenne journalière (état de référence, 10 % de O₂). Des taux de réduction plus élevés sont, en principe, possibles, mais ils conduisent immédiatement à d'énormes fuites d'ammoniac. Les mesures effectuées dans différentes conditions de procédé et d'injection ont révélé que les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) restaient toujours inférieures à 10 mg/Nm³ [93, EuLA, 2006], [152, Allemagne, 2007].

Applicabilité

Dans la fabrication de la chaux, la SNCR est applicable aux fours rotatifs avec préchauffeur (grille Lepol).

Pour les fours verticaux (qui représentent plus de 90 % du nombre total de fours dans l'UE des 27), en 2007, il n'était pas encore faisable techniquement de procéder à un traitement SNCR, car la température des gaz résiduels était bien inférieure à 200 °C.

Dans les fours longs rotatifs, l'application de la technique SNCR n'est pas pratique, car la zone présentant la fenêtre de température optimale est située dans la partie rotative du four. En 2007, l'accès à cette partie du four était impossible et seules des mesures/techniques primaires étaient possibles.

Dans les fours rotatifs avec préchauffeur, en théorie, les conditions de procédé permettent l'application de la technique SNCR, mais seulement dans certaines zones spécifiques où les températures se situent dans la plage idéale de 950 à 1 050 °C (ces conditions ne sont pas remplies par tous les PRK, uniquement par les fours à grille Lepol). Par conséquent, les possibilités d'adaptation et d'optimisation de la zone d'injection (de façon à injecter l'agent réducteur aux bonnes températures et aux bonnes concentrations en oxygène) sont plutôt limitées. De plus, un temps de séjour minimal des gaz résiduels dans cette fenêtre de températures est nécessaire pour :

- évaporer l'agent réducteur (urée ou ammoniac) ;
- le répartir de manière aussi homogène que possible dans toute la section ;
- permettre à l'agent réducteur de réagir avec les oxydes d'azote.

Dans la pratique, ces deux conditions ne sont pas nécessairement satisfaites dans les fours rotatifs avec préchauffeur. En effet, pour ceux équipés de préchauffeurs verticaux, le temps de séjour des gaz résiduels dans la fenêtre de température idéale risque d'être trop court pour permettre la réaction complète avec les oxydes d'azote dans toute la section. Pour les fours rotatifs équipés de préchauffeurs à grille, les conditions sont plus facilement remplies. Cependant, l'expérience montre également que l'efficacité de la SNCR peut être bien plus faible que prévu, comme indiqué dans l'exemple suivant pour l'Allemagne, où des essais de DeNO_x ont été menés sur un four avec préchauffeur qui était essentiellement identique aux fours allemands mentionnés plus haut (cf. données d'exploitation). La quantité d'urée injectée au-dessus de la grille Lepol a dû être limitée à un rapport molaire de $\text{NH}_2 : \text{NO}_2$ de 1:2 afin de limiter les émissions massives d'ammoniac et de sels d'ammonium au niveau de la cheminée. En fait, le test a été arrêté immédiatement après l'apparition d'un panache blanc à la sortie de la cheminée. Le contrôle en continu des émissions de NO_x a montré une légère diminution des émissions de NO_x durant l'injection d'urée d'environ 400 à approximativement 300 mg/Nm^3 . Les émissions d'ammoniac provenant du four sans injection d'urée se situaient entre 3 et 8 mg/Nm^3 pour une valeur mesurée habituellement sur les fours rotatifs de moins de 0,7 mg/Nm^3 . Toutefois, pour appliquer la SNCR aux fours rotatifs avec préchauffeur équipés d'une grille Lepol, des phases d'essai approfondies et des adaptations sont nécessaires et doivent être mises en œuvre au préalable.

Économie

Pour l'exemple de l'unité de Flandersbach en Allemagne, les coûts d'investissement ont été semblables à ceux mentionnés par l'industrie du ciment, à savoir entre EUR 0,5 million et 1,2 million (cf. Section 1.4.8.2). Dans cette usine, l'équipement n'a fonctionné que pendant une courte période (quelques semaines) en 2007 et il est actuellement difficile d'évaluer avec précision les coûts d'exploitation. Les estimations financières fondées sur les essais préliminaires montrent que les coûts d'exploitation pourraient être semblables à ceux relevés par l'industrie du ciment, à savoir 0,1 à 1,7 EUR par tonne de chaux pour une capacité de four de 1 000 t/jour et des émissions de NO_x initiales atteignant 1 500 mg/Nm^3 .

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usine à chaux de Flandersbach en Allemagne.

[46, Allemagne, 2006] [54, EuLA, 2006], [57, Commission européenne, 2005], [93, EuLA, 2006], [152, Allemagne, 2007], [168, TWG CLM, 2007]

2.4.6.1.5 Réduction sélective catalytique (SCR)

Description et avantages environnementaux obtenus

La technique de réduction sélective catalytique (SCR) fonctionne dans une plage de températures située entre 300 et 400 °C. Le NO et le NO₂ sont réduits en N₂ en utilisant du NH₃ et un catalyseur.

Indépendamment du type d'agent réducteur utilisé, le procédé SCR requiert un bon mélange des gaz résiduels et de l'agent, une température d'injection optimisée et un temps de séjour suffisant dans la fenêtre des températures optimales. L'utilisation d'un agent réducteur assure une efficacité de réduction suffisante. En général, les SCR peuvent être mises en œuvre dans des conditions pratiquement stœchiométriques tout en permettant encore d'atteindre des efficacités de réduction élevées. Les gaz résiduels des fours à chaux ne sont habituellement pas utilisés (pour le séchage des matériaux). Il est impossible de capturer ou d'adsorber davantage l'ammoniac en aval. Cf. également Section 1.4.5.1.8.

Effets croisés

L'utilisation de catalyseurs augmente les coûts d'exploitation et ceux-ci doivent être recyclés ou éliminés.

En cas de concentrations de poussières élevées, la demande en énergie électrique peut augmenter du fait du système de dépoussiérage interne du réacteur SCR et des pertes de charge supplémentaires.

Les systèmes de traitement des gaz résiduels faiblement poussiéreux nécessitent de réchauffer les gaz d'exhaure, ce qui peut entraîner des coûts d'énergie supplémentaires et des pertes de charge.

Données d'exploitation

Le Tableau 2.41 présente les données d'exploitation théoriques, telles que les plages de températures et les taux de réduction nécessaires à l'utilisation de cette technique de réduction des NO_x dans l'industrie de la chaux.

Procédé	Catalyseur	Fenêtre de température pour la réaction de DeNO _x (°C)	Efficacité de réduction des NO _x (%)
SCR	Métal oxydé sur support céramiques	280 – 450	70 – >90
	Tamis moléculaires	380 – 480	70 – 90

Tableau 2.41 : Plages de température théoriques et taux de réduction nécessaires au procédé SCR [93, EuLA, 2006]

Applicabilité

La réduction sélective catalytique peut, en principe, être applicable aux fours à chaux rotatifs afin de réduire les émissions de NO_x. Toutefois en 2007, l'industrie de la chaux en Europe n'avait aucune expérience de cette technique de réduction des NO_x, car la SCR n'était pas encore utilisée.

Concernant l'utilisation de la SCR dans l'industrie de la chaux, plusieurs paramètres doivent être étudiés, notamment :

- la charge de poussières élevée ;
- le volume de gaz spécifique élevé ;
- la question des métaux alcalins ;
- les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance.

Économie

Les données de coût pour la SCR utilisée dans l'industrie du ciment sont présentées dans la Section 1.4.5.1.8 et la Section 1.4.8.2.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

En 2008, il n'existait pas d'exemple d'usine à chaux disponible dans l'UE des 27. [54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007]

2.4.6.2 Réduction des émissions de SO₂

Description et avantages environnementaux obtenus

Les émissions de SO₂, principalement des fours rotatifs, dépendent de la teneur en soufre du combustible, de la conception du four et de la teneur en soufre nécessaire pour la chaux produite. Les émissions de SO₂ peuvent donc être limitées par le choix de combustibles ayant une faible teneur en soufre, de même que par la production de chaux utilisant des combustibles à teneurs plus élevées en soufre.

Des techniques d'addition d'absorbant sont disponibles pour la réduction des émissions de SO₂, telles que les adsorbants à lit à garnissage de type cascade, les systèmes d'adsorbants modulaires et le lavage à sec des gaz résiduels avec un filtre (filtre à manches ou filtre électrostatique). Le recours à des absorbants pour réduire les émissions de SO₂ est courant dans d'autres secteurs ; toutefois, il n'a pas encore été appliqué aux fours à chaux rotatifs. Pour l'utilisation dans les fours rotatifs, les techniques suivantes peuvent être prises en compte :

- utilisation de calcaire fin : sur un four rectiligne rotatif alimenté par de la dolomie, on a observé qu'il pouvait se produire des réductions significatives dans les émissions de SO₂ si on chargeait des pierres qui contenaient de grandes quantités de pierres à chaux fines ou qui avaient tendance à se désagréger à la chaleur. Les pierres à chaux fines calcinées sont entraînées par les gaz d'exhaure et enlèvent le SO₂ sur le trajet du dépoussiéreur et à l'intérieur de celui-ci ;
- injection de chaux dans l'air de combustion : une technique brevetée (EP 0 734 755 A1) décrit la réduction des émissions de SO₂ provenant de fours rotatifs par injection de chaux vive ou hydratée très fine dans l'air acheminé dans la hotte de combustion du four ;
- injection d'un absorbant dans les gaz d'exhaure : il existe une technique reconnue pour réduire les concentrations de SO₂ dans les émissions gazeuses :
 - injecter un absorbant (par exemple de la chaux hydratée ou du bicarbonate de sodium) dans le flux gazeux
 - et
 - assurer au gaz un temps de séjour suffisant entre le point d'injection et le séparateur de poussières (de préférence, un filtre à manches) afin d'obtenir une absorption efficace.

En 2007, aucune mesure/technique de réduction n'était installée dans les usines européennes. Cependant, dans certains cas, l'injection de chaux hydratée est utilisée pour réduire les émissions de SO₂ [54, EuLA, 2006].

Le lecteur trouvera des informations utiles concernant les unités d'absorption dans le Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour les systèmes communs de traitement/management des eaux usées et des gaz résiduels dans le secteur chimique [58, Commission européenne, 2003].

Effets croisés

Aucune donnée disponible.

Données d'exploitation

Les résultats des mesures d'essai montrent qu'à l'exception de quelques fours longs rotatifs, dont moins de 26 sont situés dans l'UE des 27, la majorité des fours à chaux (PFRK, ASK, MFSK, OSK, PRK) atteignent des valeurs inférieures à 50 mg/Nm³, du fait de la propension naturelle de la chaux à capturer le soufre (cf. Section 2.3.3.3). De plus, en utilisant les déchets comme combustible, la majorité des fours à chaux peuvent atteindre des niveaux inférieurs à 50 mg/Nm³.

Applicabilité

Les techniques d'addition d'absorbant pour la réduction des émissions de SO₂ peuvent, en principe, être appliquées à l'industrie de la chaux. Toutefois en 2007, elles n'étaient pas appliquées.

Les mesures/techniques décrites ci-dessus méritent sans doute une étude approfondie de façon à pouvoir les adapter à une utilisation pour des fours à chaux rotatifs.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.6.3 Réduction des émissions de CO**Description**

Le choix, chaque fois que possible, de matières premières à faible teneur en matières organiques réduit également les émissions de CO. Toutefois, le choix des matières premières dépend du type de four utilisé et/ou du type de chaux produite, par exemple, la production de chaux hydraulique.

Gestion des pics de CO

Lors de niveaux de CO élevés dans les gaz résiduels, les ESP devront être arrêtés pour des raisons de sécurité.

La technique de gestion des pics de CO développée pour les fours à ciment équipés de filtres électrostatiques (ESP) peut être applicable, dans certains cas, aux fours à chaux rotatifs dotés d'ESP. Cependant, le niveau d'émission de poussières (kg/tonne de produit) après la désactivation de l'ESP est généralement bien plus faible pour les fours à chaux que pour les fours à ciment, étant donné la taille relativement grosse du calcaire et de l'absence de recyclage des poussières.

Le lecteur trouvera d'autres informations concernant le contrôle des pics de CO ainsi qu'un guide dans la Section 1.4.5.3 et la Section 4.2.6.

Avantages environnementaux obtenus

Réduction des pics de CO, du CO et des émissions de poussières.

Effets croisés

Les pics de CO peuvent conduire à des explosions dans les ESP.

Données d'exploitation

Des émissions de CO dans la plage de $<100 - <500 \text{ mg/Nm}^3$ (résultats d'essais ponctuels) ont été relevées dans des PFRK, des LRK, des PRK, des OSK (cf. Tableau 2.39 de la Section 2.3.3.4.2). Pour les ASK et les MFSK, des niveaux d'émission de CO plus élevés seront nécessaires pour des raisons techniques.

Dans le cas particulier de la production de chaux hydraulique, la teneur en carbone organique de la matière première se situe de manière caractéristique dans la plage de 0,8 à 5 %.

Applicabilité

La gestion des pics de CO peut, en principe, être appliquée aux fours rotatifs.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006], [83, CEMBUREAU, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.6.4 Réduction des émissions de carbone organique total (COT)

Description et avantages environnementaux obtenus

De manière caractéristique, les émissions de COV sont mesurées comme le carbone organique total (COT) et sont souvent liées aux émissions de CO, provenant d'une combustion incomplète du combustible. Du fait que l'opérateur a tendance à limiter les émissions de CO des fours, les émissions de COV restent généralement faibles. L'optimisation du procédé, telle que la stabilisation et l'optimisation des conditions de fonctionnement de l'usine, du procédé de chauffe et/ou l'homogénéisation des alimentations en combustible et en matières premières, peut être appliquée au maintien des émissions de COT à un niveau faible.

Effets croisés

Aucun.

Données d'exploitation

Dans un nombre très limité de cas où la matière première de calcaire contient de la matière organique jusqu'à une teneur de 0,1 %, on peut trouver des émissions continues de composés organiques volatils.

Pour les ASK, les LRK et les PRK, les émissions de COV ne surviennent que durant de courtes périodes au démarrage ou dans des conditions anormales, conduisant ainsi à des émissions inférieures à 10 mg/Nm^3 (eqC). Pour les PFRK, le procédé comprend des changements de conditions de combustion cycliques toutes les 10 à 12 minutes. Par conséquent, les niveaux d'émission de COV sont légèrement supérieurs à ceux observés pour les autres types de four.

Les matières premières utilisées pour la production de chaux hydraulique ont une teneur élevée en matière organique, de manière caractéristique dans une plage de 0,8 à 5 % (exprimée en COT), ce qui conduit à des émissions de COT plus élevées que celles pour la production de chaux conventionnelle.

Applicabilité

Ces mesures/techniques sont, en principe, applicables aux fours à chaux.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemple d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[129, EuLA, 2006], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.6.5 Réduction du chlorure d'hydrogène (HCl) et du fluorure d'hydrogène (HF)

Description et avantages environnementaux obtenus

L'utilisation de combustibles contenant de faibles niveaux de chlore et de fluor peut en réduire les émissions. La plupart du chlore présent dans les matières premières et les combustibles est capturé par la chaux vive.

Dans les fours verticaux, le contact entre les gaz du four et la chaux/dolomie assure une absorption efficace du HCl. Cependant, les émissions de HCl par les fours verticaux dépendent principalement des composés chlorés présents dans le calcaire. Lors de la calcination de calcaire sec, les émissions de HCl ont tendance à être plus élevées. Dans certains cas, les émissions de HCl peuvent être réduites en injectant de l'eau dans les gaz résiduels.

Effets croisés

Aucun.

Données d'exploitation

La teneur en chlore est plus élevée dans la dolomie (100 à environ 1 000 ppm) que dans le calcaire (10 à 150 ppm).

Pour l'utilisation de déchets en tant que combustibles, des émissions de HCl de 10 mg/Nm³ et des émissions de HF de 1 mg/Nm³ ont été relevées (cf. Tableau 2.27 de la Section 2.3.3.7).

Applicabilité

Ces mesures/techniques sont, en principe, applicables à l'industrie de la chaux.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Conditions locales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[46, Allemagne, 2006], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.7 Réduction des émissions de polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et de polychlorodibenzofuranes (PCDF)

Description et avantages environnementaux obtenus

Les matières premières ou les combustibles qui contiennent des chlorures sont susceptibles de provoquer la formation de PCDD et de PCDF dans les zones de procédé où la température se situe dans une plage de 300 à 450 °C.

Si les déchets sont utilisés comme combustible, la teneur en chlore dans les combustibles, ainsi que les émissions, peuvent augmenter.

D'après la littérature pertinente sur la production de chaux, les règles clés suivantes concernant la formation de PCDD/F sont connues :

- limiter le temps de séjour des gaz résiduels dans les zones où la température varie de 300 à 450 °C ;
- limiter la teneur en oxygène dans ces mêmes zones ;
- limiter l'apport en cuivre par le combustible du fait de ses propriétés catalytiques dans la synthèse des PCDD/F.

Sur la base de ces règles, il a pu être envisagé un plan d'action selon le schéma de principe présenté sur la Figure 2.51 et la Figure 2.52.

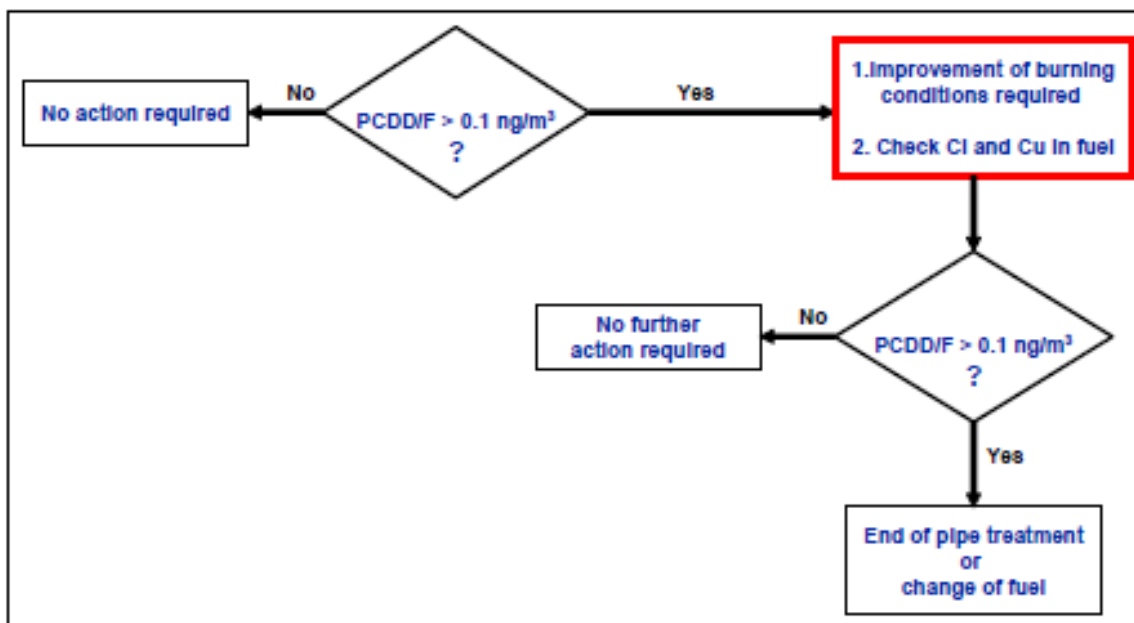


Figure 2.51 : Schéma de principe pour les émissions de PCDD/F dans les fours à chaux verticaux [54, EuLA, 2006]

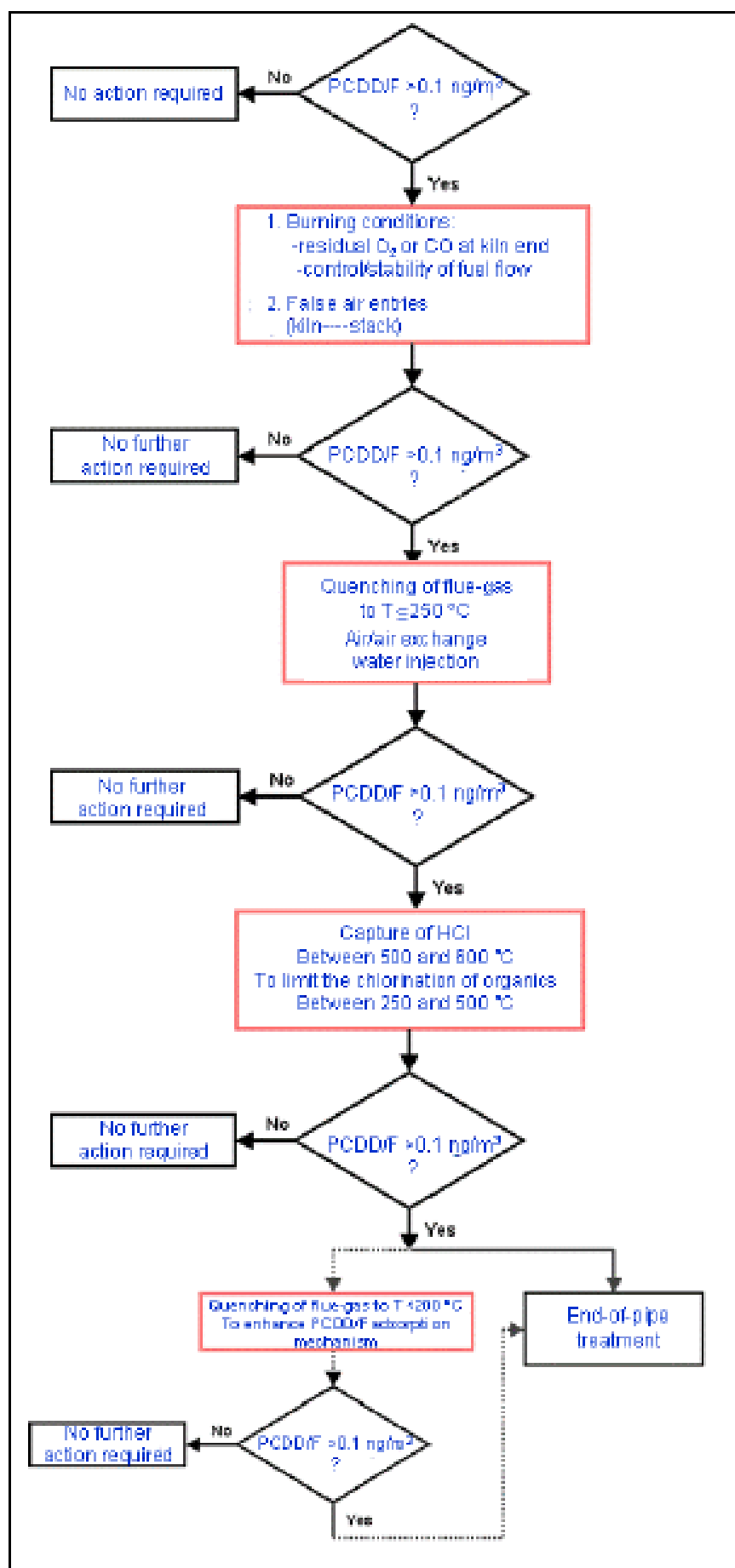


Figure 2.52 : Schéma de principe pour les émissions de PCDD/F dans les fours rotatifs (LRK, PRK) [54, EuLA, 2006]

Effets croisés

L'utilisation de déchets peut influencer sur la teneur en chlore des combustibles et les émissions peuvent augmenter.

Données d'exploitation

Des données d'émissions de PCDD/F situées entre 0,005 et 0,07 ng I-TEQ/Nm³ ont été relevées pour différents types de fours à chaux (cf. Section 2.3.3.6). Pour autant que cela a été observé d'après les données fournies, les émissions de PCDD moyennes mesurées pour tous les types de fours à chaux dans l'UE des 27 sont inférieures à 0,1 ng de I-TEQ/Nm³. Cette valeur d'émission est pertinente lorsqu'on utilise des déchets comme combustibles pour le procédé. Lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

Cependant, des études sont en cours afin d'améliorer la compréhension de la formation des PCDD dans les fours à chaux pour s'assurer que dans l'avenir, les émissions resteront toujours inférieures à 0,1 ng de I-TEQ/Nm³ lors de l'utilisation de combustibles ayant une teneur élevée en chlore.

Applicabilité

Ces mesures/techniques peuvent, en principe, être appliquées aux fours à chaux. Les combustibles issus de déchets sont analysés avant leur utilisation.

Économie

Aucune donnée disponible.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[54, EuLA, 2006], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.8 Réduction des émissions de métaux

Description et avantages environnementaux obtenus

Il convient d'éviter d'alimenter le four avec des combustibles ayant une forte teneur en métaux. De plus, l'utilisation de matières ayant une forte teneur en métaux volatils, tels que Hg et Tl, doit être contrôlée en particulier.

Un choix prudent et une garantie des caractéristiques des substances pénétrant dans le four peuvent réduire les émissions, par exemple au moyen d'un système d'assurance qualité permettant de garantir les caractéristiques des combustibles issus de déchets utilisés (cf. Section 2.4.4). De plus, une attention particulière doit être portée au mercure. En raison de sa volatilité, des niveaux d'émissions de mercure plus élevés significatifs peuvent survenir. Par conséquent, l'apport de mercure à travers les combustibles issus de déchets doit être contrôlé et, au besoin, limité (cf. Section 2.3.3.10).

Un dépoussiérage efficace réduit les émissions de métaux, car les métaux émis (sauf une partie du mercure) sont, dans une large mesure, fixés dans les poussières. De plus, il est possible de les adsorber à l'aide de charbon actif.

Effets croisés

Les dispositifs de dépoussiérage augmentent la consommation en énergie électrique du fait d'une perte de charge plus élevée.

Données d'exploitation

Ainsi qu'indiqué dans le Tableau 2.28 (cf. Section 2.3.3.9), les valeurs d'émissions de métaux se situent dans une plage de 0,01 à 0,1 mg/Nm³. Pour le plomb et le zinc, dans des cas spécifiques d'émissions de poussières plus élevées, on peut observer des valeurs atteignant jusqu'à 0,40 mg/Nm³.

Concernant l'utilisation des déchets, il a été observé que les émissions de mercure mesurées étaient inférieures à 0,03 mg/Nm³ en valeur moyenne journalière ou 0,05 mg/Nm³ en valeur moyenne sur une demi-heure. Pour le cadmium et le thallium considérés conjointement, il a été observé que les émissions mesurées étaient inférieures à 0,05 mg/Nm³ en valeur moyenne sur une demi-heure et pour la somme de l'arsenic, du cobalt, du chrome, du cuivre, du manganèse, du plomb, de l'antimoine, de l'étain et du vanadium, il a été observé que les émissions mesurées étaient inférieures à 0,5 mg/Nm³ en valeur moyenne sur une demi-heure (teneur en oxygène de 10 %) (cf. Section 2.3.3.10.1) [46, Allemagne, 2006].

Applicabilité

Cette mesure/technique peut être appliquée à l'industrie de la chaux.

Économie

Un dépoussiérage efficace peut éviter des coûts élevés pour les filtres à charbon actif.

Un système d'assurance qualité nécessaire pour garantir les caractéristiques des matières fournies au four peut entraîner des coûts supplémentaires.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux dans l'UE des 27.

[46, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006], [54, EuLA, 2006], [168, TWG CLM, 2007], [182, TWG CLM, 2008]

2.4.9 Pertes/déchets de procédé**2.4.9.1 Considérations générales concernant la réutilisation des pertes/déchets de procédé solides en tant que matière première**

Cette section traite des possibilités de réduction des déchets solides générés au cours des différentes étapes des procédés de fabrication de la chaux.

Les poussières collectées lors du chargement, déchargement, transport, manutention mécanique et traitement des matières premières peuvent normalement être réutilisées en tant que matière première. Par exemple, lors du stockage des matières premières, les poussières des filtres peuvent être recyclées directement dans le procédé de production ou dans le silo lorsqu'un dépoussiérage local par un filtre en haut de silo est utilisé.

Les poussières séparées collectées par les filtres à manches des installations de broyage, des stations de criblage/tamissage, des stations de concassage, des stations d'hydratation ou lors du chargement sont de la chaux calcinée qui peut être mélangée au produit ou sont réutilisées dans les usines à ciment, en particulier lorsque les usines à ciment et à chaux sont situées sur un même site [66, Autriche, 2006].

Les poussières provenant d'un système de nettoyage des gaz résiduels ne peuvent être réutilisées que dans certains cas, car ces poussières peuvent contenir des polluants, tels que de fortes concentrations de soufre, de fluor et de métaux, en particulier lorsque des déchets sont co-incinérés. Dans la plupart des cas, les poussières collectées sont principalement constituées de carbonate de calcium avec des quantités variables d'oxyde de calcium, de cendres de combustible et d'argile. Les utilisations des poussières collectées vont de l'intégration dans des produits commerciaux (par exemple, chaux de construction, chaux pour la stabilisation du sol, chaux hydratée et granulées) à la mise en décharge.

La suspension récupérée produite durant le nettoyage des gaz résiduels au moyen d'épurateurs en voie humide est décantée, la liqueur est généralement recyclée et les solides humides sont, la plupart du temps, mis en décharge. Par conséquent, une conduite séparée des différents courants d'effluents gazeux facilite l'utilisation optimale des pertes de procédé sous forme de poussières. Le gypse généré durant le nettoyage des gaz résiduels ne peut pas être réutilisé dans le procédé de production de chaux, mais est utilisé dans l'industrie du ciment en tant que régulateur de durcissement.

Les matières qui ne peuvent pas être recyclées en interne quittent l'usine pour être utilisées dans d'autres secteurs ou être fournies à des installations externes de recyclage ou d'élimination des déchets.

2.4.10 Bruit

Description et avantages environnementaux obtenus

Cette section traite des possibilités de réduction du bruit produit au cours des différentes étapes des procédés de fabrication de la chaux. La réduction du bruit est particulièrement importante, car les usines à chaux sont souvent situées à proximité de zones résidentielles.

Une réduction des émissions de bruit peut souvent être obtenue en appliquant des mesures/techniques directement à la source du bruit. Les sources de bruit sont, par exemple, l'extraction et le traitement du calcaire, ainsi que la production de chaux, ainsi qu'inévitablement dans la production de chaux, les unités de concassage, les unités de broyage et de préparation, les fours à chaux eux-mêmes, les systèmes d'alimentation des fours, les bandes transporteuses, les unités de filtrage, les circuits de refroidissement des fours, etc.

Différentes mesures/techniques de réduction des émissions sonores peuvent être appliquées aux usines à chaux afin de réduire les niveaux sonores pour la protection du voisinage. La combinaison de mesures/techniques la plus efficace doit être déterminée individuellement pour chaque usine ou site de production.

Les mesures techniques/techniques suivantes sont appliquées à l'industrie de la chaux :

- un choix approprié pour l'emplacement des opérations bruyantes ;
- le confinement des opérations bruyantes, par exemple l'alimentation du four, le déchargement de la chaux, l'expédition du produit ;
- l'installation de barrières antibruit et la construction de murs de protection antibruit, par exemple au niveau de l'installation de chargement des tombereaux ;
- l'utilisation d'un revêtement interne et externe constitué d'un matériau résistant pour les chutes ;
- l'insonorisation des bâtiments destinés à abriter des opérations impliquant des équipements de transformation de matières ;
- l'isolation sonore des bâtiments abritant des machines ;
- l'isolation sonore des percées de mur, par exemple par l'installation d'un canal au point d'entrée d'une bande transporteuse ;
- l'installation d'absorbeurs de bruit aux sorties d'air, par exemple la sortie d'air propre des unités de dépoussiérage ;

- la réduction des débits dans les canalisations ;
- l'isolation sonore des canalisations ;
- des silencieux installés en sortie des cheminées d'exhaure ;
- le revêtement des canalisations et enfin des souffleries situées dans les bâtiments insonorisés ;
- la disposition découplée des sources de bruit et des composants potentiellement résonants, par exemple des compresseurs et des canalisations.

Les usines existantes ou anciennes sont améliorées pour se conformer aux exigences de la législation nationale et les configurations anciennes peuvent poser des difficultés telles que le manque d'espace pour poser des revêtements, l'évaluation de l'accès pour la maintenance, etc.

Si les mesures/techniques de protection contre le bruit mentionnées ci-dessus ne peuvent pas être appliquées et si un transfert des unités bruyantes à l'intérieur d'un bâtiment est impossible, par exemple en raison des dimensions des fours et de leurs installations, des mesures/techniques secondaires de protection contre le bruit, notamment la construction de bâtiments ou la plantation d'arbres et de buissons entre la zone protégée et l'activité bruyante, par exemple le four ou la zone de stockage, doivent être mises en œuvre. Les portes et les fenêtres des zones couvertes doivent être maintenues fermées durant les opérations bruyantes.

Plans de réduction du bruit

Une pratique pour réduire les émissions de bruit des usines à chaux consiste à élaborer un plan de réduction du bruit pour l'ensemble du site en prenant en compte toutes les sources de bruit du site de production, les coûts de la réduction du bruit, les exigences légales, ainsi que les préoccupations du voisinage.

Le plan de réduction du bruit le plus efficace ne comprend pas nécessairement des mesures/techniques de réduction du bruit au niveau de l'unité la plus bruyante, car les niveaux sonores diminuent sensiblement lorsqu'on s'éloigne de la source. En conséquence, une combinaison de mesures/techniques au niveau des sources de bruit proches des zones affectées peut être plus efficace. Dans certains cas, des mesures/techniques organisationnelles, telles que la réduction des activités nocturnes, peuvent suffire à réduire les nuisances subies par le voisinage et à se conformer aux exigences légales.

L'élaboration d'un plan de réduction du bruit comprend habituellement les étapes suivantes :

- l'établissement de la liste de toutes les principales sources de bruit et la détermination de leurs niveaux de pression acoustique ;
- la détermination des zones affectées, par exemple les zones d'habitation ;
- le calcul informatique de la propagation du bruit (sur la base d'une modélisation tridimensionnelle du site et de ses environs) ;
- le classement des sources de bruit en fonction de leur importance pour les zones affectées individuelles (séparément pour le jour et la nuit) ;
- l'évaluation des mesures/techniques de réduction du bruit en fonction de leur pertinence en termes de niveau de bruit dans les zones affectées et des coûts estimés ;
- l'identification de la combinaison de mesures/techniques la plus rentable qui garantit le respect des exigences légales, ainsi que l'acceptation du voisinage [46, Allemagne, 2006].

Effets croisés

Des coûts d'investissement et de maintenance supplémentaires peuvent être générés du fait des mesures/techniques de protection contre le bruit.

Données d'exploitation

Aucune donnée disponible.

Applicabilité

Les mesures/techniques de réduction du bruit peuvent, en principe, être applicables à l'industrie du ciment (cf. Section 2.3.6).

Économie

Des coûts d'investissement supplémentaires peuvent être générés du fait des mesures/techniques de protection contre le bruit.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines à chaux en Allemagne, usines à chaux dans l'UE des 27. [46, Allemagne, 2006]

2.4.11 Considérations générales à propos des odeurs

Des odeurs peuvent survenir dans les usines à chaux utilisant des fours verticaux à alimentation mixte en raison des émissions d'hydrogène sulfuré (H_2S) générées. Cela dépend de la partie des formes réduites ou élémentaires du soufre qui peut conduire à des émissions de H_2S . L'utilisation d'un dispositif de postcombustion régénératif pour réduire le H_2S dans le courant de gaz résiduels peut être efficace. En 2008 en Europe, seule une usine à chaux était équipée d'un dispositif de postcombustion thermique pour réduire les émissions de H_2S ; cependant, celui-ci n'a été utilisé que pendant 6 mois. Aucun autre dispositif de postcombustion régénératif n'est opérationnel dans l'industrie de la chaux en Europe.

La réduction de la teneur en soufre dans les combustibles peut permettre de réduire les émissions d'odeur.

Les odeurs peuvent également être provoquées par des déchets utilisés comme combustibles. Les sites de stockage des déchets peuvent être couverts ou des systèmes de stockage des déchets peuvent être utilisés.

2.4.12 Outils de management environnemental

Les outils de management environnemental sont décrits dans le chapitre relatif au ciment de la Section 1.4.12 du présent document.

2.5 Meilleures techniques disponibles pour l'industrie de la chaux

Pour bien comprendre cette section et son contenu, le lecteur est invité à se reporter à la préface du présent document et notamment à sa cinquième section intitulée : « Compréhension et utilisation du présent document ». Les mesures/techniques et les niveaux, ou plages de niveaux, d'émission et/ou de consommation y afférents exposés dans la présente section ont été évalués au moyen d'un procédé itératif comportant les étapes suivantes :

- identification des principaux problèmes environnementaux du secteur ; pour la fabrication de la chaux, il s'agit de l'utilisation de l'énergie, y compris l'utilisation des déchets en tant que combustible, et des émissions dans l'air ;
- examen des mesures/techniques les plus pertinentes à la résolution de ces problèmes clefs ;
- identification des meilleurs niveaux de performance dans le domaine de l'environnement, sur la base des données disponibles dans l'Union européenne et dans le monde ;
- examen des conditions dans lesquelles ces niveaux de performance ont été atteints (comme les coûts, les effets croisés, les motivations pour la mise en œuvre de ces mesures/techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émission et/ou de consommation qui leur sont associés pour ce secteur, au sens général, conformément à l'article 2, paragraphe 12 et à l'annexe IV de la Directive.

L'avis des experts du Bureau européen IPPC et celui du groupe de travail technique concerné ont joué un rôle déterminant dans chacune de ces phases et dans la présentation de l'information dans le présent document.

Sur la base de cette évaluation, le présent chapitre expose les meilleures techniques disponibles et, dans la mesure du possible, les niveaux de consommation et d'émission qui leur sont associés, considérés comme adaptés à ce secteur dans son ensemble. Dans bien des cas, ceux-ci reflètent les performances actuelles de certaines installations de ce secteur. Lorsque des niveaux d'émission ou de consommation « associés à l'utilisation des MTD » sont présentés, cela signifie que ces niveaux représentent les performances environnementales prévisibles en cas d'application des mesures/techniques décrites dans le secteur considéré, compte tenu des coûts et des avantages inhérents à la définition des MTD. Toutefois, ce ne sont pas des valeurs limites de consommation ou d'émission et elles ne doivent en aucun cas être considérées comme telles. Certaines techniques peuvent, dans certains cas, permettre d'atteindre de meilleurs résultats en matière de niveaux de consommation ou d'émission mais, en raison des coûts induits ou des considérations d'effets croisés qu'elles impliquent, elles ne peuvent pas être considérées comme des MTD pour le secteur dans son ensemble. Cependant, on peut considérer, dans certains cas spécifiques où il existe des motivations particulières, qu'il est justifié d'atteindre ces niveaux.

Les niveaux d'émission et de consommation associés à l'utilisation des MTD doivent toujours être envisagés en association avec des conditions de référence bien précises (périodes de calcul des moyennes, par exemple).

Il faut distinguer la notion de « niveaux associés à l'utilisation des MTD » expliquée ci-dessus de la notion de « niveau pouvant être atteint » qui apparaît ailleurs dans le présent document. Lorsqu'il est question d'un niveau « pouvant être atteint » au moyen d'une mesure/technique ou d'une combinaison de mesures/techniques données, cela signifie que l'on peut prévoir, en utilisant ce type de mesures/techniques, d'atteindre ce niveau sur une période de temps substantielle dans un procédé ou une installation bénéficiant de bonnes conditions d'entretien et d'exploitation.

Lorsqu'elles étaient disponibles, les données relatives aux coûts ont été indiquées à la Section 2.4 précédente, en même temps que la description des mesures/techniques. Elles permettent d'avoir une idée approximative des coûts. Cependant, le coût réel de l'utilisation d'une mesure/technique dépendra étroitement de la situation en matière de taxes, de redevances, de subventions, par exemple, et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Ces facteurs spécifiques à chaque site ne peuvent pas être évalués de manière exhaustive dans le présent document. En l'absence de données relatives aux coûts, les conclusions sur la viabilité économique des mesures/techniques sont établies à partir des observations faites sur les installations existantes.

Les MTD (y compris les niveaux d'émission et de consommation y afférents) présentées dans cette section sont des « MTD au sens général » (c'est-à-dire considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble). Elles sont destinées à servir de point de référence pour évaluer les performances actuelles d'une installation existante ou un projet de nouvelle installation. Elles aideront ainsi à définir des conditions adaptées « fondées sur les MTD » pour l'installation ou à établir des prescriptions générales prévues à l'article 9, paragraphe 8 de la directive IPPC. Il est prévu que les nouvelles installations peuvent être conçues de manière à obtenir des performances d'un niveau équivalent, voire meilleur, que les niveaux généraux associés aux MTD présentés dans cette section. Il est également considéré que des installations existantes pourraient aller vers les niveaux associés à l'utilisation de MTD présentés dans cette section, voire les dépasser, sous réserve de l'applicabilité technique et économique des mesures/techniques dans chaque cas.

Bien que les documents de référence sur les MTD ne fixent pas de normes à caractère réglementaire, ils sont destinés à fournir des orientations à l'usage de l'industrie, des Etats membres et du public en ce qui concerne les niveaux d'émission et de consommation pouvant être atteints au moyen des mesures/techniques spécifiées. Les conditions d'autorisation appropriées à chaque cas particulier devront être déterminées compte tenu des objectifs de la directive IPPC et des considérations locales.

Les « Meilleures Techniques Disponibles » pour une installation spécifique consisteront en général à utiliser une MTD individuelle ou une combinaison des MTD énumérées dans la présente section.

Lorsque des mesures/techniques identifiées individuellement comme des MTD peuvent être utilisées en combinaisons, il conviendra de prendre en compte les effets de telles combinaisons lors de l'établissement de conclusions sur les conditions d'autorisation fondées sur les MTD pour chaque cas.

Recommandation pour aider des utilisateurs/lecteurs du présent document :

Il est fortement recommandé de lire la présente Section 2.5 en lien avec la Section 2.4, car les considérations relatives à l'applicabilité des mesures/techniques mentionnées dans la Section 2.4 doivent être prises en compte. Afin d'aider le lecteur, des références à la Section 2.4 ont été incluses dans la Section 2.5.

Les niveaux d'émission indiqués dans la présente section sont exprimés en moyennes journalières et dans des conditions standards, sauf pour les unités d'hydratation pour lesquelles les conditions sont en l'état d'émission. Les définitions suivantes concernant les conditions standard s'appliquent pour les débits et concentrations des effluents gazeux des fours et sont également indiquées dans le Glossaire :

m ³ /h	débit : sauf mention contraire dans la présente section, les débits correspondent à 11 % en volume d'oxygène et à l'état standard
mg/Nm ³	concentration : sauf mention contraire dans la présente section, les concentrations des substances ou mélanges de substances gazeuses correspondent aux gaz résiduels à 11 % en volume d'oxygène et à l'état standard
état standard	se réfère à une température de 273 K, une pression de 1 013 hPa et à un gaz sec

Ainsi que décrit dans la Préface, le présent document ne propose pas de valeurs limites d'émission. Les meilleures techniques disponibles et les plages de niveaux d'émission et de consommation présentées associées aux meilleures techniques disponibles (MTD-plages NEA) concernent des installations équipées de fours de dimensions différentes, dont le fonctionnement est différent, par exemple continu ou discontinu, et qui fonctionnent pendant des nombres d'heures différents par an. Dans le présent document, les considérations locales particulières ne peuvent pas être totalement prises en compte. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de facteurs locaux inhérents au site, tels que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions locales de l'environnement. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent de faire des compromis entre différents types d'impacts sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales.

Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes évoqués, il ne pourra les traiter tous de manière exhaustive. Les mesures/techniques et niveaux indiqués dans la présente Section 2.5 ne seront donc pas forcément appropriés pour toutes les installations. Par ailleurs, l'obligation de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement, y compris la réduction de la pollution à longue distance ou transfrontière, suppose que les conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base de considérations purement locales. C'est pourquoi il est de la plus haute importance que toutes les informations présentées dans le présent document soient pleinement prises en compte.

2.5.1 Système de management environnemental (SME)

Un certain nombre de techniques de management environnemental sont déterminées comme étant des MTD. La portée (par exemple le niveau de détail) et la nature du SME (par exemple normalisé ou non normalisé) seront en général liées à la nature, l'échelle et la complexité de l'installation et à l'ensemble des impacts qu'elle pourra avoir sur l'environnement.

29. Les MTD consistent à appliquer et à adhérer à un Système de management environnemental (SME) qui intègre, selon les conditions locales, les caractéristiques suivantes (cf. Section 1.4.12 du chapitre relatif au ciment) :

- (a) engagement de la direction générale (celui-ci est considéré comme une condition préalable à une application réussie d'autres éléments du SME) ;
- (b) définition d'une politique environnementale qui comprenne l'amélioration continue de l'installation par la direction générale ;
- (c) planification et établissement des procédures, des cibles et des objectifs nécessaires , parallèlement à la planification budgétaire et aux investissements ;
- (d) mise en œuvre des procédures en portant une attention particulière à :
 - structure et responsabilité ;
 - formation, sensibilisation et compétence
 - communication,
 - implication des employés,
 - documentation,

- contrôle de procédé efficace,
 - programme de maintenance,
 - préparation et réponses face aux situations d'urgence,
 - garantie de la mise en conformité avec la législation environnementale.
- (e) vérification des performances et prise de mesures correctives en portant une attention particulière à la surveillance et aux mesures (cf. également le Document de référence sur les principes généraux de surveillance [151, Commission européenne, 2003]) ;
- mesures correctives et préventives,
 - maintenance d'enregistrements,
 - audit interne indépendant (lorsque cela est possible) afin de déterminer si le système de management environnemental se conforme aux dispositions prévues et a été mis en application et maintenu correctement ;
- (f) revue par la direction générale du SME et du maintien de ses qualités de pertinence, d'adéquation et d'efficacité.

Trois autres caractéristiques sont indiquées ci-dessous ; toutefois si elles possèdent des avantages, un SME peut représenter une MTD sans elles :

- examen et validation du système de management et de la procédure d'audit par un organisme de certification accrédité ou par un vérificateur de SME externe ;
- préparation et publication (et éventuellement validation externe) d'une déclaration environnementale régulière décrivant tous les aspects environnementaux significatifs de l'installation, et permettant une comparaison année par année par rapport aux cibles et objectifs environnementaux, ainsi que par rapport à des références dans le secteur, tel qu'approprié ;
- application et adhésion à un système volontaire internationalement reconnu tel que EMAS et EN ISO 14001 : 2004. Cette phase volontaire permettrait de donner plus de crédibilité au SME. L'EMAS, qui comprend toutes les caractéristiques mentionnées ci-dessus, donne en particulier une plus grande crédibilité. Cependant, les systèmes non normalisés peuvent, en principe, être tout aussi efficaces sous réserve qu'ils soient conçus et mis en application correctement.

Pour l'industrie de la chaux en particulier, il est également important de prendre en compte les caractéristiques potentielles suivantes du SME :

- l'impact environnemental de l'éventuel démantèlement de l'unité au moment de la conception d'une nouvelle unité ;
- le développement de technologies plus propres et le suivi des développements ;
- lorsque cela est possible, l'application régulière de références sectorielles, notamment concernant l'efficacité énergétique et les activités de conservation de l'énergie, le choix des matières entrantes, les émissions dans l'air, les déversements dans l'eau, la consommation d'eau et la génération de déchets.

2.5.2 Mesures/techniques primaires générales

30. Les MTD consistent à obtenir un fonctionnement stable et régulier du four proche des valeurs de consigne pour les paramètres du procédé qui soit bénéfique pour toutes les émissions des fours tout comme pour l'utilisation de l'énergie par les mesures/techniques suivantes :

- (a) optimisation du contrôle de procédé incluant un système de contrôle automatique par ordinateur (systèmes experts) ;
- (b) utilisation de systèmes modernes et gravimétriques d'alimentation en combustibles solides.

31. Les MTD consistent à procéder à une sélection et un contrôle rigoureux des substances introduites dans le four permettant de réduire et/ou d'éviter les émissions.
32. Les MTD consistent à procéder régulièrement à une surveillance et à des mesures des paramètres de procédé et des émissions, telles que :
- (a) mesures en continu de paramètres de procédé démontrant la stabilité de celui-ci, tels que la température, la teneur en O₂, la pression, le débit et les émissions de CO ;
 - (b) la surveillance et la stabilisation des paramètres de procédé critiques, à savoir l'alimentation en combustible, le dosage régulier et l'excès d'oxygène ;
 - (c) mesures en continu ou périodiques (à titre d'indication : au moins une fois par mois et lors des émissions les plus élevées prévues) des émissions de poussières, de NO_x, de SO_x, de HCl et de HF et des fuites en NH₃ lorsqu'une SNCR est appliquée ;
 - (d) mesures périodiques des émissions de PCDD/F, de métaux (cf. Section 2.4.8 et MTD 52 dans la Section 2.5.9) et de COT.

Dans ce contexte, lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

2.5.3 Consommation d'énergie

Des considérations générales concernant la consommation d'énergie peuvent être trouvées aux Sections 2.3.2, 2.4.2 et 2.4.3.

33. Les MTD consistent à réduire/minimiser la consommation d'énergie thermique en appliquant une combinaison des mesures/techniques suivantes :

- (a) application de systèmes de four améliorés et optimisés et d'un fonctionnement stable et régulier proche des valeurs de consigne pour les paramètres du procédé au moyen de :
 - I. optimisation du contrôle du procédé,
 - II. récupération de chaleur des gaz d'exhaure, si cela est applicable,
 - III. systèmes modernes d'alimentation par gravité des combustibles solides.

Dans ce contexte, cf. Section 2.4.2 qui présente plusieurs mesures/techniques différentes pouvant être appliquées aux systèmes de four, individuellement ou en combinaison.

- (b) utilisation de combustibles ayant des caractéristiques qui ont un effet positif sur la consommation d'énergie thermique. En cas de remplacement des combustibles fossiles par des combustibles issus de déchets, les fours à chaux et les brûleurs doivent être adaptés et optimisés pour le brûlage des déchets (cf. Section 2.4.4).
- (c) limitation de l'excès d'air.

Dans ce contexte, il convient de se reporter également au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour l'efficacité énergétique [181, Commission européenne, 2008].

Les niveaux de consommation d'énergie thermique suivants sont associés aux MTD :

Type de four	Consommation d'énergie thermique ¹⁾ GJ/t
Four long rotatif (LRK)	6,0– 9,2
Four rotatif avec préchauffeur (PRK)	5,1– 7,8
Four vertical à cycles alternés (régénératifs) (PFRK)	3,2– 4,2
Four vertical annulaire (ASK)	3,3– 4,9
Four vertical à alimentation mixte (MFSK)	3,4– 4,7
Autres fours (OK)	3,5– 7,0
1) La consommation d'énergie dépend du type de produit, de la qualité du produit, des conditions de procédé et des matières premières	

Tableau 2.42 : Niveaux de consommation d'énergie thermique associés aux MTD dans l'industrie de la chaux et de la dolomie

Dans ce contexte, il convient de se reporter au Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour l'efficacité énergétique [181, Commission européenne, 2008].

34. Les MTD consistent à minimiser la consommation d'énergie électrique en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) utilisation de systèmes de management de la puissance,
- (b) utilisation d'une granulométrie du calcaire optimisée,
- (c) utilisation d'installations de broyage et d'autres équipements électriques à forte efficacité énergétique (cf. Section 2.4.2).

2.5.4 Consommation de calcaire

Des considérations générales concernant la consommation de calcaire peuvent être consultées aux Sections 2.2.3, 2.2.3.2, 2.3.1 et 2.4.1.

35. Les MTD consistent à minimiser la consommation de calcaire en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) procéder à une exploitation de carrière et à un concassage spécifiques et maîtriser l'utilisation du calcaire (qualité, granulométrie) ;
- (b) sélectionner des fours utilisant des techniques de four optimisées et fonctionnant avec une large plage de granulométries de calcaire pour une utilisation optimale du calcaire extrait.

2.5.5 Choix des combustibles

Des considérations générales concernant l'utilisation des combustibles peuvent être consultées aux Sections 2.3.2.1 et 2.4.4.

36. Les MTD consistent à procéder à une sélection et un suivi rigoureux des combustibles introduits dans le four, notamment en choisissant des combustibles ayant de faibles teneurs en soufre (pour les fours rotatifs en particulier), en azote et en chlore afin d'éviter/de réduire les émissions.

2.5.5.1 Utilisation des déchets combustibles

Des considérations générales concernant l'utilisation et le choix des combustibles issus de déchets peuvent être consultées aux Sections 2.2.5 et 2.4.4. Dans ce contexte, lors de l'utilisation de combustibles issus de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

2.5.5.1.1 Contrôle de la qualité des déchets

37. Les MTD consistent à :

- (a) appliquer des systèmes d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des déchets et analyser tout déchet devant être utilisé comme combustible dans un four à chaux pour en garantir :**
 - I. une qualité constante,
 - II. les critères physiques, tels que la formation d'émissions, la granulométrie, la réactivité, l'aptitude à la cuisson, le pouvoir calorifique,
 - III. les critères chimiques, tels que la teneur en chlore, soufre, alcalis et phosphate et en métaux pertinents,
- (b) contrôler le nombre de paramètres pertinents pour tout déchet devant être utilisé comme combustible dans un four à chaux, tels que la teneur totale en halogène, les métaux pertinents (par exemple, le total de chrome, plomb, cadmium, mercure, thallium) et le soufre.**

2.5.5.1.2 Alimentation du four en déchets

38. Les MTD consistent à :

- (a) utiliser des brûleurs appropriés pour une alimentation en déchets adaptés en fonction de la conception du four et du fonctionnement du four ;**
- (b) faire fonctionner le four de sorte que les gaz résultant de la co-incinération de déchets sont portés de manière contrôlée et homogène et même dans les conditions les plus défavorables à une température de 850 °C pendant 2 secondes ;**
- (c) porter la température à 1 100 °C si des déchets dangereux ayant une teneur en substances organiques halogénées supérieure à 1 %, exprimée en chlore, sont co-incinérés ;**
- (d) réaliser une alimentation en déchets de manière continue et constante ;**
- (e) arrêter la co-incinération de déchets pour les opérations telles que les démarrages et/ou arrêts lorsque les températures et les temps de séjour adaptés ne peuvent pas être atteints, ainsi que mentionné en b) - c) ci-dessus.**

2.5.5.1.3 Management de la sécurité pour l'utilisation de déchets dangereux

39. Les MTD consistent à appliquer un management de la sécurité pour la manutention, par exemple le stockage, et/ou l'alimentation des déchets dangereux (cf. Section 2.4.4).

2.5.6 Émissions de poussières

2.5.6.1 Émissions de poussières diffuses

Des considérations générales concernant les émissions de poussières diffuses peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.1.2, 2.4.5.1 et 2.4.5.2.

40. Les MTD consistent à minimiser/éviter les émissions de poussières diffuses en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) mesures/techniques pour les opérations génératrices de poussières. Dans ce contexte, cf. Section 2.4.5.1 qui présente plusieurs mesures/techniques différentes pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison ;
- (b) mesures/techniques relatives aux zones de stockage en vrac. Dans ce contexte, cf. Section 2.4.5.2 qui présente plusieurs mesures/techniques différentes pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison.

2.5.6.2 Émissions de poussières canalisées provenant d'opérations génératrices de poussières

Cette section présente les MTD pour les émissions de poussières issues d'opérations génératrices de poussières autres que celles provenant des procédés de chauffe du four. Des considérations générales concernant les émissions de poussières canalisées peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.1.1 et 2.4.5.3.

41. Les MTD consistent à appliquer un système de management de la maintenance qui couvre en particulier les performances des filtres pour ces sources. En prenant ce système de management en compte, les MTD consistent à réduire les émissions de poussières canalisées issues d'opérations génératrices de poussières (cf. Section 2.4.5.3) à un niveau inférieur à 10 mg/Nm³ (MTD-NEA) en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) en appliquant des filtres à manches ou à <10 – 20 mg/Nm³ (MTD-NEA), en moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles pendant au moins une demi-heure) en appliquant des laveurs humides.

Les laveurs humides sont principalement utilisés pour les stations d'hydratation de la chaux. Il convient de noter que pour les petites sources (<10 000 Nm³/h), une approche prioritaire doit être prise en compte.

Dans ce contexte, cf. Section 2.4.5.3 qui présente plusieurs mesures/techniques différentes pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison.

2.5.6.3 Émissions de poussières provenant des procédés de chauffe des fours

Cette section présente les MTD pour les émissions de poussières provenant des procédés de chauffe du four. Des considérations générales concernant les émissions de poussières canalisées peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.1.1 et 2.4.5.3.

- 42. Les MTD consistent à réduire les émissions de poussières (matière particulaire) issues des gaz résiduels des procédés de chauffe du four en appliquant un nettoyage des gaz d'exhaure au moyen d'un filtre (cf. Section 2.4.5.3). En appliquant des filtres à manches, les MTD-NEA sont inférieurs à 10 mg/Nm³, en valeur moyenne journalière. En appliquant des ESP ou d'autres filtres, les MTD-NEA sont inférieurs à 20 mg/Nm³, en valeur moyenne journalière.**

Dans des cas exceptionnels où la résistivité des poussières est élevée, les MTD-NEA pourraient être plus élevés et atteindre 30 mg/Nm³, en valeur moyenne journalière.

Dans ce contexte, lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

2.5.7 Composés gazeux

2.5.7.1 Mesures/techniques primaires générales de réduction des composés gazeux

Des considérations générales concernant les émissions de composés gazeux peuvent être consultées à la Section 2.4.6.

- 43. Les MTD consistent à réduire les émissions de composés gazeux (à savoir NO_x, SO_x, HCl, CO, COT/COV, métaux) issues des gaz résiduels des procédés de chauffe du four en appliquant les mesures/techniques primaires suivantes individuellement ou en combinaison :**

- (a) sélection et suivi rigoureux des matières introduites dans le four,
- (b) réduction des précurseurs de polluant dans les combustibles et, si possible, dans les matières premières, à savoir
 - I. sélection, lorsqu'ils sont disponibles, de combustibles ayant de faibles teneurs en soufre (fours rotatifs en particulier), azote et chlore (cf. Sections 2.4.4 et 2.4.6.2),
 - II. sélection, si possible, de matières premières ayant de faibles teneurs en matière organique (cf. Section 2.4.6.3),
 - III. sélection de combustibles issus de déchets adaptés au procédé et au brûleur (cf. Section 2.2.5, 2.4.4 et 2.5.5.1),
- (c) utilisation de mesures/techniques d'optimisation de procédé pour assurer une absorption efficace du dioxyde de soufre, c'est-à-dire un contact efficace entre les gaz du four et la chaux vive (cf. Sections 2.3.3.3 et 2.4.3).

Dans ce contexte, lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

2.5.7.2 Émissions de NO_x

Des considérations générales concernant les émissions de NO_x peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.2 et 2.4.6.1.

44. Les MTD consistent à réduire les émissions de NO_x issues des gaz résiduaire des procédés de chauffe du four en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison (cf. Section 2.4.6.1) :

- (a) mesures/techniques primaires, telles que :
 - I. sélection appropriée du combustible et limitation de sa teneur en azote (cf. Sections 2.4.4 et 2.4.6.1.4),
 - II. optimisation du procédé (mise en forme de flamme et profil de température, cf. Section 2.4.6.1), 1)
 - III. conception du brûleur (brûleur bas NO_x, cf. Section 2.4.6.1.3),
 - IV. étagement de l'air applicable aux PRK (cf. Section 2.4.6.1.2),
- (b) SNCR applicable aux fours rotatifs Lepol (cf. Section 2.4.6.1.4).

Les niveaux d'émissions de NO_x suivants sont des MTD-NEA :

Type de four	Unité	MTD-NEA (valeur moyenne journalière, exprimée en NO ₂)
PFRK, ASK, MFSK, OSK	mg/Nm ³	100 – <350 ^{1) 3)}
LRK, PRK	mg/Nm ³	<200 – <500 ^{1) 2)}
1) Les plages hautes concernent la production de dolomie et de chaux fortement calcinée 2) Pour les LRK et PRK verticaux produisant de la chaux fortement calcinée, la valeur supérieure atteint 800 mg/Nm ³ 3) Lorsque les mesures/techniques primaires indiquées en a) I. ci-dessus ne sont pas suffisantes et lorsqu'il n'existe pas de mesures/techniques secondaires disponibles pour réduire les émissions de NO _x à 350 mg/Nm ³ , la valeur supérieure et de 500 mg/Nm ³ , en particulier pour la chaux fortement calcinée		

Tableau 2.43 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour les NO_x provenant des gaz résiduaire des procédés de chauffe du four dans l'industrie de la chaux

45. Lorsque la SNCR est applicable, les MTD consistent à :

- (a) appliquer une efficacité de réduction adaptée et suffisante, ainsi qu'un procédé de fonctionnement stable ;
- (b) appliquer un bon rapport stœchiométrique et une bonne répartition de l'ammoniac afin d'obtenir la meilleure efficacité de réduction des NO_x et de réduire la fuite en ammoniac ;
- (c) maintenir les émissions de NH₃ dans les gaz résiduaire aussi faibles que possible, mais en dessous de 30¹⁾ mg/Nm³, en valeur moyenne journalière. La corrélation entre l'efficacité de réduction des NO_x et la fuite en NH₃ doit être considérée (cf. Section 2.4.6.1.4 et Figure 2.50).

¹⁾Ces MTD-NEA concernent les expériences menées sur une installation de production de chaux (quatre fours).

2.5.7.3 Émissions de SO_x

Des considérations générales concernant les émissions de SO_x peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.3 et 2.4.6.2.

46. Les MTD consistent à réduire les émissions de SO_x issues des gaz résiduaire des procédés de chauffe du four en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison (cf. Section 2.4.6.2) :

- (a) utilisation de mesures/techniques d'optimisation de procédé pour assurer une absorption efficace du dioxyde de soufre, c'est-à-dire un contact efficace entre les gaz du four et la chaux vive (cf. Sections 2.3.3.3 et 2.4.3),
- (b) s'ils sont disponibles, sélection de combustibles ayant une faible teneur en soufre pour une utilisation dans des fours longs rotatifs (LRK),
- (c) utilisation de techniques d'addition d'absorbant (par exemple addition d'absorbant, nettoyage de gaz résiduaires à sec au moyen d'un filtre, laveur humide, charbon actif).

Les niveaux d'émissions de SO_x suivants sont des MTD-NEA :

Type de four	Unité	MTD-NEA ¹⁾ (valeur moyenne journalière, SO _x exprimé en SO ₂)
PFRK, ASK, MFSK, OSK, PRK	mg/Nm ³	<50 – <200
LRK	mg/Nm ³	<50 – <400
1) Le niveau dépend du niveau initial de SO _x dans les gaz d'exhaure et de la mesure/technique de réduction utilisée		

Tableau 2.44 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour les SO_x provenant des gaz résiduaires des procédés de chauffage du four dans l'industrie de la chaux

2.5.7.4 Émissions de CO et pics de CO

2.5.7.4.1 Émissions de CO

Des considérations générales concernant les émissions de CO peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.4, 2.3.3.4.2 et 2.4.6.3.

47. Les MTD consistent à réduire les émissions de CO en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) sélection de matières premières ayant une faible teneur en matière organique, si possible (cf. Section 2.4.6.3),
- (b) utilisation de mesures/techniques d'optimisation de procédé pour obtenir une combustion stable et complète (cf. Section 2.4.6.3).

Dans ce contexte, il convient de consulter également les MTD 30, 31 et 32 sur les mesures/techniques primaires générales à la Section 2.5.2.

Les niveaux d'émissions de CO suivants sont des MTD-NEA :

Type de four	Unité	MTD-NEA ¹⁾ (valeur moyenne journalière)
PFRK, OSK, LRK, PRK	mg/Nm ³	<500
1) Il peut être plus élevé selon les matières premières utilisées et/ou le type de chaux produite, par exemple chaux hydraulique		

Tableau 2.45 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour le CO provenant des gaz résiduaires des procédés de chauffe du four

2.5.7.4.2 Réduction des pics de CO

Des considérations générales concernant les pics de CO peuvent être consultées à la Section 2.4.6.3 et dans le chapitre relatif au ciment à la Section 1.4.5.3.

48. En cas d'utilisation de filtres électrostatiques (ESP), les MTD consistent à minimiser la fréquence des pics de CO en appliquant les mesures/techniques suivantes (cf. Section 2.4.6.3) :

- (a) réduire le temps d'arrêt de l'ESP. Dans ce contexte, cf. Section 2.4.6.3 et Section 1.4.5.3 qui présentent plusieurs mesures/techniques différentes pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison ;
- (b) prendre des mesures automatiques en continu du CO ;
- (c) utiliser un appareil de mesure et de contrôle rapide comprenant un système de surveillance du CO avec un temps de réponse court, proche de la source de CO.

Dans ce contexte, cf. Section 4.2.6 qui présente une recommandation concernant le contrôle des pics de CO.

2.5.7.5 Émissions de carbone organique total (COT)

Des considérations générales concernant les émissions de COT peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.5 et 2.4.6.4.

49. Les MTD consistent à réduire les émissions de COT issues des gaz résiduaux des procédés de chauffe du four en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) appliquer les mesures/techniques primaires générales (cf. également MTD 30 – 32 à la Section 2.5.2) ;
- (b) éviter d'alimenter le four avec des matières premières ayant une forte teneur en composés organiques volatils (sauf pour la production de chaux hydraulique).

Les niveaux d'émissions de COT suivants sont des MTD-NEA :

Type de four	Unité	MTD-NEA (moyenne sur la période d'échantillonnage)
LRK ¹⁾ , PRK ¹⁾	mg/Nm ³	<10
ASK ¹⁾ , MFSK ^{1) 2)} , PFRK ²⁾	mg/Nm ³	<30
1) Le niveau peut être plus élevé selon les matières premières utilisées et/ou le type de chaux produite, par exemple chaux hydraulique		
2) Dans des cas exceptionnels, le niveau peut être plus élevé		

Tableau 2.46 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour les COT issus des gaz résiduaux des procédés de chauffe du four

Dans ce contexte, lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

2.5.7.6 Émissions de chlorure d'hydrogène (HCl) et de fluorure d'hydrogène (HF)

Des considérations générales concernant les émissions de HCl et de HF peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.7 et 2.4.6.5.

50. En cas d'utilisation de déchets, les MTD consistent à réduire les émissions de HCl et les émissions de HF en appliquant les mesures/techniques primaires suivantes :

- (a) utilisation de combustibles ayant une faible teneur en chlore et en fluor (cf. également Section 2.4.6.5),
- (b) limiter la teneur en chlore et en fluor de tout déchet devant être utilisé comme combustible dans un four à chaux (cf. Sections 2.4.4 et 2.4.6.5).

Les MTD-NEA pour le HCl sont $<10 \text{ mg/Nm}^3$, en valeur moyenne journalière ou en valeur moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure) et les MTD-NEA pour le HF sont $<1 \text{ mg/Nm}^3$, en valeur moyenne journalière ou en valeur moyenne sur la période d'échantillonnage (mesures ponctuelles, pendant au moins une demi-heure).

Dans ce contexte, lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

2.5.8 Émissions de PCDD/F

Des considérations générales concernant les émissions de PCDD/F peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.6 et 2.4.7.

51. Les MTD consistent à éviter ou réduire les émissions de PCDD/F en appliquant les mesures/techniques primaires suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) sélectionner des combustibles à faible teneur en chlore,
- (b) limiter l'apport en cuivre par le combustible,
- (c) minimiser le temps de séjour des gaz résiduels et la teneur en oxygène dans les zones où les températures varient entre 300 et 450 °C.

Les MTD-NEA sont $<0,05 - 0,1 \text{ ng de PCDD/F I-TEQ/Nm}^3$, en moyenne sur la période d'échantillonnage (6 – 8 heures).

Dans ce contexte, cf. Section 2.4.7 qui présente différentes mesures/techniques pour les fours à chaux verticaux et rotatifs pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison. De plus, dans ce contexte, lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

2.5.9 Émissions de métaux

Des considérations générales concernant les émissions de métaux peuvent être consultées aux Sections 2.3.3.9, 2.3.3.10, 2.4.8.

52. Les MTD consistent à minimiser les émissions de métaux issues des gaz résiduaux des procédés de chauffe du four en appliquant les mesures/techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) sélectionner des combustibles à faible teneur en métaux ;
- (b) utiliser un système d'assurance qualité pour garantir les caractéristiques des combustibles issus de déchets utilisés (cf. Section 2.2.5.4 et 2.4.8) ;
- (c) limiter la teneur des métaux pertinents, en particulier le mercure, dans les matériaux ;
- (d) utiliser des mesures/techniques de dépoussiérage efficaces.

Dans ce contexte, cf. Section 2.4.5.3 qui présente différentes mesures/techniques de dépoussiérage pouvant être appliquées individuellement ou en combinaison.

Lors de l'utilisation de déchets, les niveaux d'émissions de métaux suivants sont des MTD-NEA :

Métaux	Unité	MTD-NEA (moyenne sur la période d'échantillonnage)
Hg	mg/Nm ³	<0,05
Σ (Cd, Tl)	mg/Nm ³	<0,05
Σ (As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	mg/Nm ³	<0,5
De faibles niveaux ont été reportés (cf. Sections 2.3.3.9, 2.3.3.10.1 et 4.3.4) lors de l'application des mesures/techniques mentionnées dans la MTD 52 a – d ci-dessus		

Tableau 2.47 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour les métaux provenant des gaz résiduaux des procédés de chauffe du four

Dans ce contexte, lors de la co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000]. Toujours dans ce contexte, il convient de se reporter également à la MTD 37 (Section 2.5.5.1.1) et la MTD 38 (Section 2.5.5.1.2).

2.5.10 Pertes/déchets de procédé

Des considérations générales concernant les pertes/déchets de procédé peuvent être consultées aux Sections 2.3.4 et 2.4.9.

53. Les MTD consistent à :

- (a) réutiliser les poussières/matières particulières collectées dans le procédé lorsque cela est possible ;
- (b) utiliser les poussières, la chaux hydratée et la chaux vive hors spécifications dans des produits commerciaux sélectionnés.

2.5.11 Bruit

Des considérations générales concernant le bruit peuvent être consultées aux Sections 2.3.6 et 2.4.10.

54. Les MTD consistent à réduire/minimiser les émissions de bruit durant les procédés de fabrication de la chaux en appliquant une combinaison des mesures/techniques suivantes (cf. Section 2.4.10) :

- (a) choix approprié pour l'emplacement des opérations bruyantes ;
- (b) capotage des opérations/unités bruyantes ;
- (c) utilisation d'une isolation contre les vibrations des unités ;
- (d) utilisation d'un revêtement interne et externe constitué d'un matériau résistant pour les chutes ;
- (e) insonorisation des bâtiments destinés à abriter des opérations impliquant des équipements de transformation de matières ;
- (f) installation de barrières antibruit et construction de murs de protection antibruit, par exemple construction de bâtiments ou de barrières naturelles, notamment plantation d'arbres et de buissons entre la zone protégée et l'activité bruyante ;
- (g) utilisation d'une isolation sonore des bâtiments abritant des machines ;
- (h) utilisation d'une isolation sonore des percées de mur, par exemple par l'installation d'un canal au point d'entrée d'une bande transporteuse ;
- (i) installation d'absorbeurs de bruit aux sorties d'air, par exemple la sortie d'air propre des unités de dépoussiérage ;
- (j) réduction des débits dans les canalisations ;
- (k) isolation sonore des canalisations ;
- (l) utilisation de silencieux installés en sortie des cheminées d'évacuation ;
- (m) revêtement des canalisations et enfin des souffleries situées dans les bâtiments insonorisés ;
- (n) application d'une disposition découplée des sources de bruit et des composants potentiellement résonants, par exemple des compresseurs et des canalisations.
- (o) fermeture des portes et fenêtres des zones couvertes.

2.6 Techniques émergentes dans le secteur de la chaux

2.6.1 Calcination en lit fluidisé

La calcination de fines de calcaire en lit fluidisé s'est pratiquée très longtemps sur une échelle relativement réduite. Elle présente plusieurs avantages potentiels, notamment :

- l'utilisation des excédents de calcaire fin ;
- de faibles émissions de NO_x et
- de faibles émissions de SO_2 , avec des combustibles à haute teneur en soufre.

Cependant, la technique se caractérise par une utilisation de chaleur spécifique qui n'est pas particulièrement faible, les produits en grains fins ne conviennent pas à de nombreuses applications et le niveau des résidus de carbonate de calcium est plutôt élevé. Les problèmes initiaux liés à l'utilisation de la technique avec des fours d'une capacité de production dépassant 150 tonnes par jour semblent avoir été résolus.

La Figure 2.53 présente le schéma d'un four à lit fluidisé. Le calcaire fin est chargé dans la cuve d'un préchauffeur utilisant l'air chauffé par les gaz d'exhaure du four via un échangeur de chaleur. Le calcaire préchauffé pénètre ensuite dans la première cuve à lit fluidisé, où la température est augmentée et où le calcaire commence à être calciné. Pendant la calcination du calcaire, la chaux vive la plus légère franchit le déversoir et passe dans la cuve à lit fluidisé suivante, où la calcination est achevée. La chaux vive traverse ensuite le refroidisseur, où elle est refroidie par l'air ambiant.

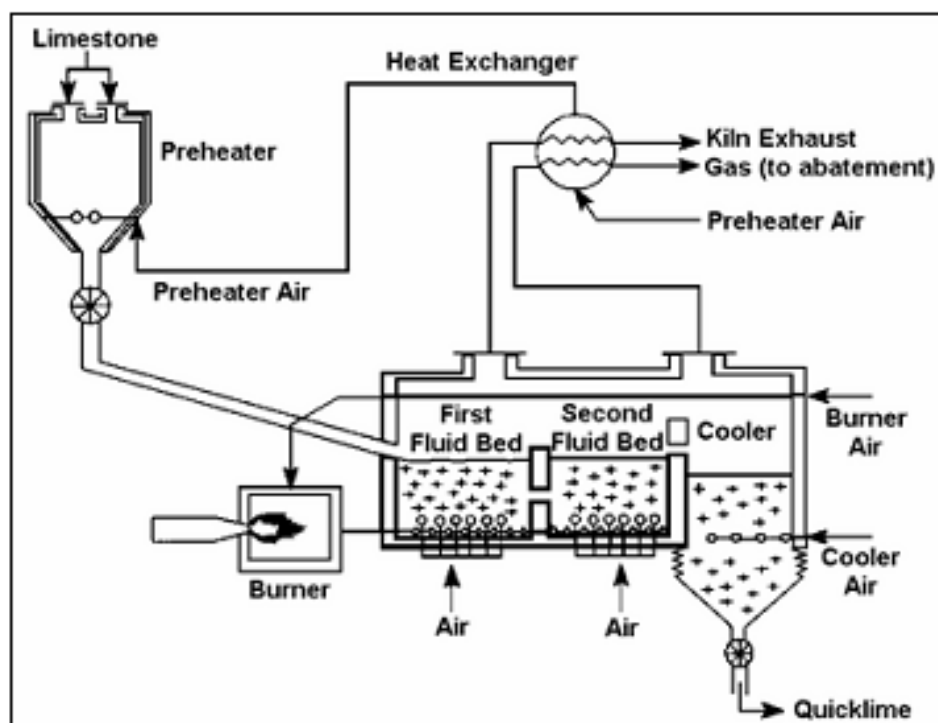


Figure 2.53 : Four à lit fluidisé

[37, Royaume-Uni, 1996]

Si la technologie en lit fluidisé permet des rejets polluants moins importants que d'autres technologies de four à chaux, cela n'a pas été correctement prouvé et elle ne peut produire que de la chaux fine très réactive.

2.6.2 Four à calcination rapide avec préchauffeur

La technique de chargement d'un calcaire fin par l'intermédiaire d'un préchauffeur dans un four à calcination rapide a été mise au point dans l'industrie du ciment. Toutefois, elle ne convient qu'à une gamme limitée de qualités de calcaire et n'a été appliquée que dans très peu d'installations. Deux fours relevant de cette technique fonctionnent en Australie. Dans l'un, le produit en sortie du four à calcination rapide traverse un four court rotatif. La section rotative est conçue pour contrôler le pourcentage de CaCO_3 et la réactivité de la chaux en fonction des spécifications du client.

La technique est particulièrement adaptée aux pierres à chaux « sableuses », puisque le four à calcination rapide accepte en entrée une granulométrie comprise entre 0 et 2 mm. Elle est connue pour être lourde en coûts d'investissement, ce qui est susceptible de limiter son utilisation à des niveaux de production relativement importants (de l'ordre de 500 tonnes par jour).

2.6.3 Filtres en céramique

En 2008, on n'utilisait pas de filtres en céramique sur les fours à chaux. Cependant, ceux-ci sont capables de récupérer efficacement la poussière présente dans des gaz à très hautes températures ; il est donc possible que, dans des installations comme les fours rotatifs produisant de la dolomie surcuite, le dépoussiérage des gaz à haute température permette la viabilité de certains systèmes de récupération de chaleur.

2.6.4 Postcombustion des gaz résiduaux des fours verticaux à alimentation mixte

Pour le traitement des gaz résiduaux des fours verticaux à alimentation mixtes, deux techniques principales peuvent être prises en compte :

- le système d'oxydation thermique récupérative :

Le principal avantage de cette technique est sa sensibilité relativement faible aux concentrations de poussières atteignant 30 mg/Nm^3 . De plus, les sels d'ammonium qui conduisent à des problèmes de colmatage et de corrosion ne peuvent pas se former en raison de la température élevée régnant dans le système d'oxydation. Toutefois, même dans les meilleures conditions de fonctionnement, cette technique nécessite un apport supplémentaire significatif d'énergie (jusqu'à $0,85 \text{ GJ/t}$ de production). En 2008, il n'existait pas d'expérience relative à l'efficacité de la réduction des polluants et aux coûts d'exploitation de cet équipement dans l'industrie de la chaux.

- le système d'oxydation thermique régénérative :

Des essais pilotes utilisant un système d'oxydation régénérative de faibles dimensions ont été menés dans plusieurs usines équipées de fours verticaux à alimentation mixte brûlant différents combustibles solides. Le système d'oxydation a été installé entre le filtre à manches et la cheminée dans un flux partiel de gaz résiduaire (courant de gaz résiduaire : $Q < 1\,500 \text{ Nm}^3/\text{h}$), séparé du courant de gaz résiduaire principal, comme le montre la Figure 2.54.

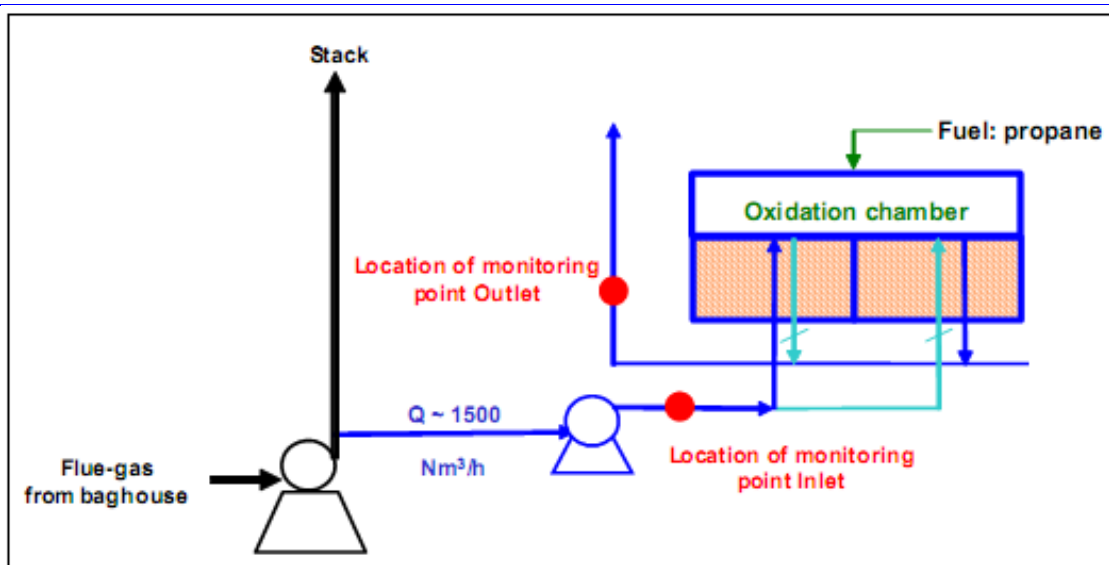


Figure 2.54 : Exemple de schéma de principe d'une technique de postcombustion
[54, EuLA, 2006]

Les compositions des gaz résiduaux à l'entrée et à la sortie du système d'oxydation ont été surveillées étroitement pendant plusieurs heures. Les principaux résultats de ces essais sont résumés et indiqués dans le Tableau 2.37.

	Substance	Concentration d'entrée moyenne (sec) (mg/Nm ³)	Concentration de sortie moyenne (sec) (mg/Nm ³)
Cas 1	CO	4 900	35
	COT	32	0,1
	H ₂ S	<0,8	<0,7
Cas 2	CO	14 650	95
	COT	120	0,4
	H ₂ S	2	<0,8
Cas 3	CO	6 270	51
	COT	338	1,3
	H ₂ S	1,4	<1,2
Cas 4	CO	10 810	95
	COT	37	0,2
	H ₂ S	/	/
Cas 5	CO	14 230	128
	COT	34	0,3
	H ₂ S	20	<0,9
Cas 6	CO	14 450	115
	COT	53	0,5
	H ₂ S	33	<0,5

Tableau 2.48 : Composition des gaz résiduaux surveillée pendant plusieurs heures
[54, EuLA, 2006]

D'après ces essais, on peut conclure que, s'il est bien conçu, le système d'oxydation peut fonctionner dans des conditions autothermiques (c'est-à-dire sans apport de chaleur supplémentaire) si la concentration en CO dépasse une plage de 1,5 à 2 % dans les gaz résiduaux avant le traitement. Dans ce cas, une efficacité de réduction généralement de 98 % peut être obtenue pour le monoxyde de carbone, le COT et l'hydrogène sulfuré. La concentration des émissions de CO dans les gaz propres est toujours $<100 \text{ mg/Nm}^3$ [142, EnvNGO/Tebert, 2007]. Cependant, et contrairement au système récupératif, cet équipement nécessite de très faibles concentrations de poussières dans les gaz résiduaux (en générale inférieures à 5 mg/Nm^3). Si les températures à la sortie sont trop basses (par exemple inférieures à 200°C), des sels d'ammonium peuvent se former. Une corrosion des tuyaux et/ou des émissions de poussières incontrôlées sont possibles. Les essais ont également montré que si les niveaux de CO dépassaient une plage de 2 à 3 %, trop d'énergie était générée dans le système d'oxydation du fait de l'oxydation des polluants. Cela peut conduire à de graves problèmes pendant le fonctionnement quotidien de l'équipement.

La décision relative au choix de la technique qu'il conviendrait d'utiliser doit donc se fonder sur la liste de critères suivante (non exhaustive) :

- caractéristiques des gaz résiduaux (par exemple débit, teneurs en oxygène, monoxyde de carbone et COT, température),
- variabilité de ces paramètres dans le temps,
- caractéristiques du système de dépoussiérage.

Par conséquent, la meilleure solution dépend des conditions locales [54, EuLA, 2006].

2.7 Conclusions et recommandations

Déroulement des travaux

La réunion de lancement pour la révision du document BREF ciment et chaux s'est tenue en septembre 2005. Le TWG a accepté d'étendre la portée de ce document et d'ajouter un secteur industriel supplémentaire relatif à la production d'oxyde de magnésium (MgO/magnésie) en voie sèche au document BREF ciment et chaux. Après la période de collecte des informations et des données, une deuxième réunion du TWG (groupe de travail technique) s'est tenue en février 2007 afin de vérifier et de convenir des informations et données à utiliser pour la révision du document BREF. De plus, le TWG a demandé une exception procédurale pour le processus de révision de ce document afin de diviser les discussions concernant les Sections 1 – 4 et les sections MTD pour les trois chapitres relatifs au ciment, à la chaux et à l'oxyde de magnésium.

Sur la base de la requête du TWG et en prenant en compte le programme de base pour la révision des documents BREF (décembre 2005), l'IEF a accepté de diviser les discussions concernant les Sections 1 – 4 et les sections MTD pour les trois chapitres relatifs au ciment, à la chaux et à l'oxyde de magnésium.

Le premier projet couvrant les Sections 1 – 4 et 6 révisées des trois chapitres ciment, chaux et oxyde de magnésium a été publié pour consultation en septembre 2007. La deuxième partie du premier projet couvrant les sections relatives aux techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD (Sections 1.4, 2.4 et 3.4) et les sections MTD (Sections 1.5, 2.5 et 3.5) des trois chapitres a été publiée pour consultation en mai 2008. La réunion finale du TWG s'est tenue en septembre 2008.

Le projet concernant la première révision de ce document BREF, qui était le premier pour la révision de la première série des BREF, a suscité, dans son ensemble, un très grand intérêt. Lors de la réunion plénière finale, le TWG comprenait plus de 110 membres.

Sur la base du programme de base pour la révision des BREF (décembre 2005), la révision du document BREF ciment et chaux n'a pas impliqué une refonte complète du premier document adopté en décembre 2001, mais a mis à jour les informations existantes et inclus des informations supplémentaires ; qui ont été révisées (par exemple concernant les techniques), car elles auraient pu avoir un impact sur les conclusions de MTD. L'échange d'informations et la collecte des données se sont fondés sur les souhaits du TWG et sur les conclusions convenues lors de la deuxième réunion du TWG (janvier 2007). Le document d'orientation relatif à la collecte des données convenu par l'IEF en avril 2008 n'a pas été utilisé pour ce processus.

Sources d'information, élaboration de ce chapitre chaux et lacunes

Le chapitre chaux révisé se fonde sur 35 documents fournissant des informations provenant à la fois de l'industrie et des États membres. Les rapports ont été soumis par l'EuLA, l'association industrielle représentant la majorité des fabricants de chaux en Europe et les États membres suivants : Allemagne, Autriche, France, Finlande, Portugal, Italie, Espagne, Hongrie et République tchèque. Ces rapports peuvent être considérés comme les fondements du chapitre chaux révisé du présent document.

Des informations utiles supplémentaires ont été obtenues en visitant des sites de fabrication de chaux en Autriche, en Allemagne et en Finlande.

Sur la base des informations et données fournies et des commentaires reçus après les périodes de consultation, ce chapitre chaux a été révisé en mettant à jour les informations et les données. Par ailleurs, des sections supplémentaires ont été élaborées, par exemple des sections relatives à l'utilisation de déchets en tant que combustibles et/ou matières premières, ainsi qu'à leur consommation durant le procédé de fabrication de la chaux, aux types de fours à chaux et à leur conception et leurs techniques, des sections supplémentaires concernant plusieurs types d'émissions dans l'air, les impacts sur le comportement d'émission en utilisant des déchets, des exemples de données de coûts pour différentes mesures/techniques de traitement des gaz résiduels et des outils de management environnemental.

Malgré un grand nombre d'informations très utiles et de nombreux commentaires concernant plusieurs questions différentes, certains problèmes de données et certaines des conséquences correspondantes pour ce chapitre sur la chaux doivent être signalés :

- il existe un manque d'information sur la consommation d'énergie, ainsi qu'un manque de données sur les meilleures performances en fonction des types de fours et des différents types de produits ; toutefois la consommation d'énergie a été intégrée dans les conclusions des MTD ;
- il existe un manque d'informations concernant le contrôle des émissions et les fréquences des contrôles utilisées, par exemple concernant les mesures périodiques ;
- pour la réduction des émissions de NO_x, des mesures/techniques primaires sont utilisées. De plus en 2008, la SNCR n'a été appliquée qu'aux fours Lepol (une installation avec quatre fours). Cette SNCR est en phase d'essai et en exploitation depuis 2 ans au total. Concernant l'utilisation de la SNCR dans l'industrie de la chaux, il existe un manque d'informations et de données issues d'expériences à long terme, et relatives notamment à l'efficacité de réduction, ainsi qu'aux données de meilleures performances d'émissions de NO_x, aux fuites de NH₃. En 2008, aucune information n'était disponible quant à la possibilité d'appliquer, sauf pour les fours Lepol, la SNCR pour la réduction des NO_x à d'autres types de fours rotatifs utilisés pour la production de chaux ;
- pour les émissions de CO, il existe un manque d'informations concernant le type des autres fours verticaux (OSK) dont les émissions dépassent actuellement les MTD-NEA. Pour certains de ces types de fours verticaux, il peut être impossible du fait de leurs caractéristiques techniques spécifiques d'atteindre les MTD-NEA convenus pour le CO. Ces caractéristiques techniques pourraient être prises en compte par des autorités compétentes lors de la fixation des conditions d'autorisation conformément à l'article 9, paragraphe 4 de la directive IPPC 2008/1/EC ;
- il existe un manque d'informations concernant la fréquence et la durée des pics de CO lorsque des ESP sont appliqués, de sorte que la conclusion correspondante des MTD se fonde sur une approche qualitative ;
- dans une certaine mesure, il existe un manque d'informations sur la question des émissions de métaux et sur le lien entre les émissions de métaux (mercure) et les opportunités techniques utiles qui sont disponibles et pourraient être utilisées pour les réduire ;
- concernant les fours verticaux à alimentation mixte (MFSK), il existe un manque d'informations concernant les émissions et la réduction de COT. De plus, on a relevé de fortes émissions de CO, d'environ 2 500 mg/Nm³, générées par les MFSK qui sont influencées et déterminées par plusieurs facteurs (par exemple, la réaction de Boudouard, cf. Figure 2.40). La prévention peut être difficile, voire, dans une certaine mesure, impossible. La technique émergente de la postcombustion des gaz résiduels pourrait être utilisée, toutefois, elle doit encore faire l'objet de recherches et de développements ;
- la technique émergente de la calcination en lit fluidisé pour la fabrication de la chaux est décrite (cf. Section 2.6.1) ; toutefois, le TWG n'a fourni aucune information quant à la manière dont cette technique pouvait être/peut être développée davantage.

Niveau de consensus lors de la réunion finale du TWG

Les conclusions des travaux concernant le chapitre de la chaux ont été acceptées lors de la réunion finale du TWG en septembre 2008. Les principaux objets de discussion lors de cette réunion ont été les conclusions sur les MTD. Les propositions de MTD pour l'industrie de la chaux ont été examinées au cas par cas.

Au cours de cette réunion finale du TWG, un haut niveau de consensus a été atteint sur les MTD (Meilleures Techniques Disponibles) pour l'industrie de la chaux et aucune opinion divergente n'a été relevée. Par conséquent, ainsi que cela a été observé rétrospectivement pendant toute la période d'échange d'informations, le processus d'échange d'informations peut être considéré comme réussi.

Recommandations pour les travaux à venir

L'échange d'informations et son résultat pour l'industrie de fabrication de la chaux, à savoir le chapitre relatif à la chaux du présent document, correspondent à une importante avancée vers la prévention et la réduction intégrées des pollutions pour la fabrication de la chaux. Les travaux à venir sur les questions suivantes pourraient poursuivre le processus :

- collecte de données en prenant en compte les directives présentées dans le document d'orientation de l'IEF publié en avril 2008 pour permettre une évaluation des performances de certaines techniques à l'échelle de l'unité, en particulier des MTD potentielles ;
- collecte d'informations concernant la relation entre le type de procédé, les déchets utilisés (type, quantités) et les émissions ;
- collecte de données de coûts (par exemple, coûts d'investissement, d'exploitation) concernant toutes les techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD ;
- collecte de données de coûts en fonction de l'efficacité des techniques de réduction ;
- collecte d'informations et de données concernant les options permettant de minimiser la consommation d'énergie ou d'augmenter l'efficacité énergétique ;
- collecte d'informations sur la consommation d'énergie, ainsi que de données sur les meilleures performances en fonction des types de fours utilisés et des différents types de produits fabriqués ;
- collecte d'informations concernant la surveillance des émissions et les fréquences de mesure, par exemple étude du contrôle périodique des émissions de façon que les autorités puissent vérifier les obligations/conditions d'autorisation ;
- étude de la révision du Document de référence sur les Principes généraux de surveillance ;
- collecte d'informations et de données concernant l'utilisation des déchets (par exemple, composition, critères à l'entrée) ;
- collecte d'informations et de données concernant l'utilisation de la SNCR dans l'industrie de la chaux pour la réduction des émissions de NO_x, par exemple l'efficacité de réduction, les fuites de NH₃ ;
- collecte de données supplémentaires détaillées sur les émissions de métaux et les techniques de recherche qui pourraient être utilisées pour la réduction des métaux (en particulier le mercure) ;
- étude et collecte de données concernant la fréquence et la durée des pics de CO lors de l'application d'ESP ;
- pour les PFRK, il convient de procéder à des études supplémentaires pour trouver une solution au problème des émissions de COT ;
- pour les MFSK, des informations supplémentaires concernant les émissions de CO et de COT doivent être collectées (en particulier sur le développement de la postcombustion décrite à la Section 2.6.4) ;
- collecte d'informations concernant la technique de fabrication de la chaux en lit fluidisé.

Suggestions de sujets pour les travaux de R&D à venir

Concernant les techniques décrites dans la section relative aux Techniques Émergentes en particulier (Section 2.6), des travaux de R&D à venir seront encore nécessaires et utiles pour que ces techniques puissent être considérées dans l'avenir pour la détermination des MTD pour l'industrie de la chaux.

En outre, la CE lance et soutient, au travers de ses programmes RTD, une série de projets relatifs aux technologies propres, aux technologies émergentes de traitement et de recyclage des effluents et aux stratégies de management. Ces projets pourraient potentiellement apporter une contribution utile aux futures révisions des BREF. Les lecteurs sont donc invités à informer l'EIPPCB de tous les résultats de recherche tombant dans la portée du présent document (cf. également la préface du présent document).

3 INDUSTRIE DE L'OXYDE DE MAGNESIUM (FABRICATION PAR VOIE SECHE A PARTIR DE MAGNESITE NATURELLE EXTRAITE EN CARRIERE)

3.1 Informations générales

3.1.1 Introduction

L'oxyde de magnésium est le plus important composé de magnésium industriel et s'utilise principalement dans l'industrie de l'acier et des réfractaires. Il est également largement utilisé dans de nombreux autres secteurs industriels, comme le secteur alimentaire et le secteur des aliments pour animaux. Les matières premières destinées à la production de l'oxyde de magnésium sont le carbonate de magnésium naturel et le brucite ou le chlorure de magnésium issu de l'eau de mer et de la saumure.

Deux grands procédés de production sont utilisés pour la fabrication de l'oxyde de magnésium (MgO/magnésie) :

- en partant de carbonate de magnésium, à l'aide d'une réaction de décarbonisation à haute température. Le carbonate de magnésium lui-même peut être obtenu dans des mines de magnésite (procédé naturel ou procédé par voie sèche)
- en partant de chlorure de magnésium, à l'aide de différents procédés tels que la réaction d'hydrolyse à haute température et la précipitation par hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Le chlorure de magnésium peut être obtenu à partir de saumures, de la dissolution de minéraux riches en magnésium avec de l'acide chlorhydrique (HCl), et de l'eau de mer (procédé synthétique ou par voie humide) [108, Commission européenne, 2006].

Le procédé susmentionné qui part du chlorure de magnésium (procédé par voie humide) est de moins en moins utilisé, car les besoins en énergie sont trois fois plus élevés que ceux du procédé de fabrication d'oxyde de magnésium qui part du carbonate de magnésium (procédé par voie sèche). Pour plus d'informations sur le procédé de fabrication de l'oxyde de magnésium par voie humide, se reporter au document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication des produits chimiques inorganiques en grands volumes - solides et autres (LVICS) [108, Commission européenne, 2006].

Ce chapitre traite de la fabrication de l'oxyde de magnésium (MgO/magnésie) de différents types - magnésie surcuite, magnésie calcinée caustique, magnésie fondue (cf. Section 3.1.2.1.1) - à l'aide du procédé par voie sèche à partir de magnésite naturelle extraite en carrière (carbonate de magnésium MgCO_3). En Europe, le brucite n'est pas utilisé pour la fabrication de l'oxyde de magnésium ; cependant, les étapes de production et les conditions de cuisson nécessaires sont exactement les mêmes. Le procédé par voie humide utilisant le chlorure de magnésium matière première n'est pas abordé dans le présent document en raison des différences qu'il présente dans l'utilisation de la structure de traitement, des techniques et des matières premières.

Cependant, dans certains cas, comme pour des raisons liées au marché, ces deux produits de magnésie ne peuvent être séparés. Dans ce cas, une remarque appropriée figure alors dans le présent document.

3.1.2 L'industrie de la magnésite à travers le monde et en Europe

La magnésie clinkérisée ou surcuite est fabriquée et commercialisée dans le monde entier, avec la magnésie calcinée caustique et la magnésie fondue. La figure 3.1 offre une vue d'ensemble des sources et des producteurs d'oxyde de magnésium à l'échelle mondiale.

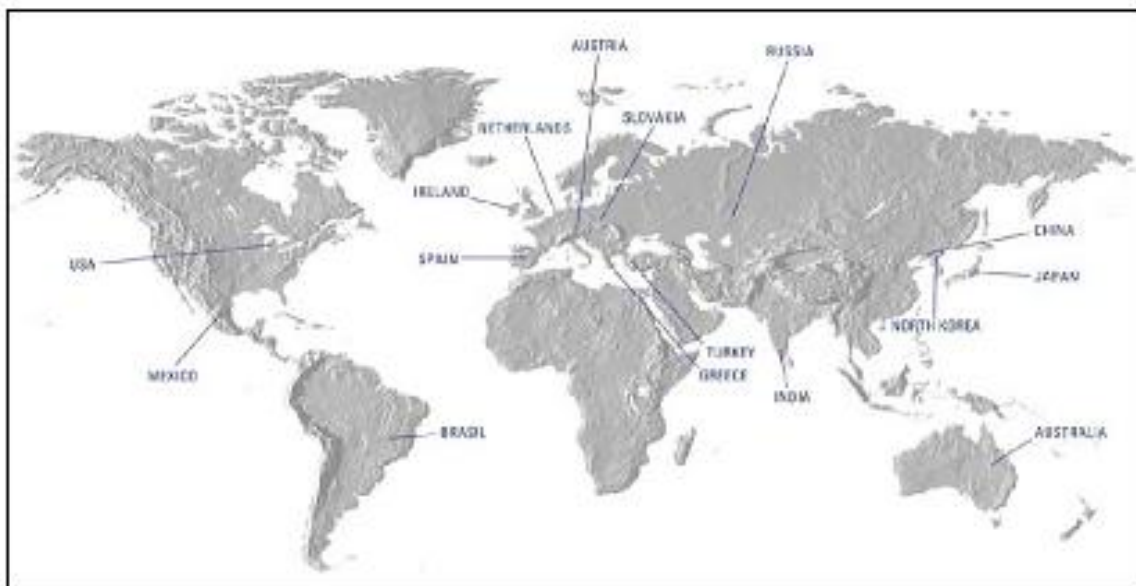


Figure 3.11 : Sources d'oxyde de magnésium et pays producteurs à l'échelle mondiale
[109, RHI AG, 2006], [165, EUROMINES, 2006]

La figure 3.2 illustre la production de magnésite brute dans le monde et les volumes de production pour l'UE des 25, en utilisant le procédé par voie sèche, entre 1981 et 2003.

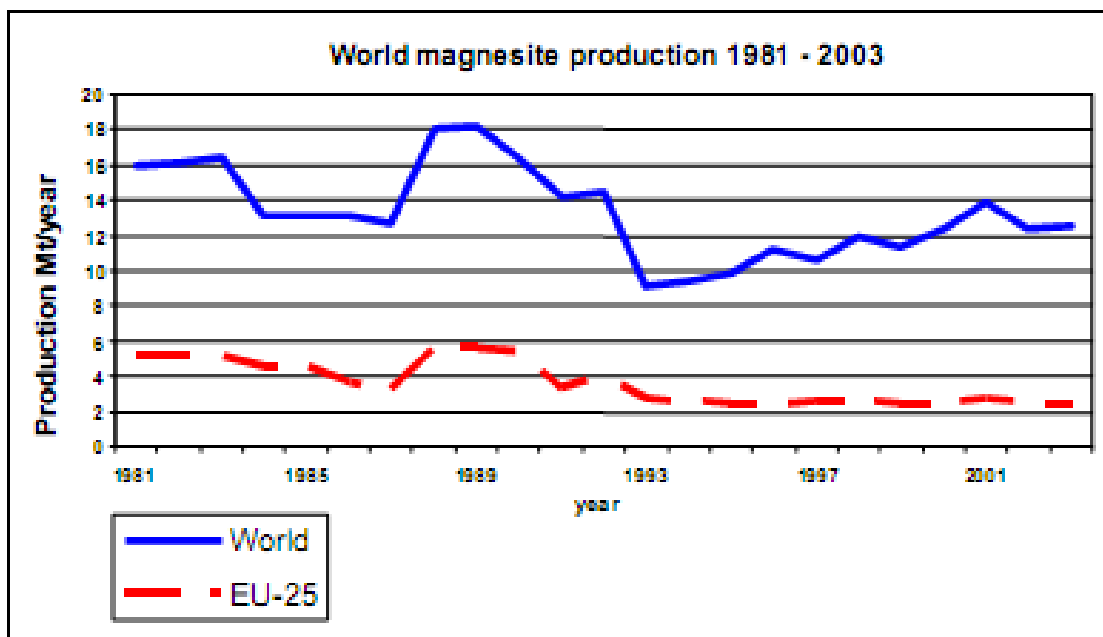


Figure 3.2 : Production de magnésite brute dans l'UE des 25 et dans le monde
[109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

Le tableau 3.1 indique les données de production à travers le monde entre 2000 et 2005, selon les pays producteurs.

Pays	Production de magnésite brute (t)					
	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Albanie ¹⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Australie	349933	540000	540000	553847	586393	590000
Autriche	725832	680534	728235	766525	715459	693754
Brésil	300000	265749	310000	330000	350000	386759
Canada	270000	300000	200000	150000	140000	120000
Chine	4230000	4300000	4400000	4500000	4650000	4800000
CIS - Asie	250000	260000	150000	120000	n/a	n/a
CEI - Europe	2250000	2340000	1350000	1080000	n/a	n/a
Colombie	7100	7000	6900	6700	6500	6300
République Tchèque ²⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Corée du Sud	650000	650000	450000	580000	n/a	n/a
Grèce	492780	483296	558057	549049	499474	500000
Guatemala ³⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Inde	340000	330000	280000	300000	320000	380000
Iran	140000	133778	128565	91700	91700	120000
Kenya ⁴⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Corée	650000	650000	450000	580000	600000	800000
Mexique ⁵⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Népal ⁶⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Pakistan	3610	3000	4430	4700	4900	3029
Philippines ⁷⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Pologne	54830	23000	24000	33000	35000	37000
Russie (Europe)	1400000	1380000	1350000	1080000	900000	885000
Russie (Asie)	140000	138000	150000	120000	100000	95000
Serbie et Montenegro	0	0	0	73000	70000	60000
Slovaquie	1535200	1537000	1464500	1640900	965900	1555000
Afrique du Sud	97446	98000	99000	100000	120000	130000
Espagne	423605	438194	462200	468900	n/a	n/a
Thaïlande ⁸⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Turquie	2672089	2738086	2800000	3224278	n/a	n/a
URSS ⁹⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
États-Unis ⁹⁾	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Yougoslavie	80000	78000	75000	73000	0	0
Zimbabwe	5800	6000	6200	6400	6500	6800
Pour les autres pays, les données sont disponibles uniquement pour les périodes suivantes : 1) 1988 – 1994 2) 1981 – 1994 3) 1984 – 1992 4) 1984 – 1992 5) 1988 – 1994				6) 1983 – 1992 7) 1984 – 1994 8) 1988 – 1992 9) 1981 – 1994 10) 1981 – 1983 n/a : aucune donnée		

Tableau 3.1 : Production mondiale de magnésite brute (carbonate de magnésium) entre 2000 et 2005
[109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007]

En 2003, la production mondiale de magnésite se situait autour de 12,5 millions de tonnes. Dans l'UE des 27, environ 2,3 millions de tonnes ont été produites en 2003, soit 18,4 % de la production mondiale. En 2003, la production mondiale d'oxyde de magnésium (magnésie) à l'aide du procédé par voie sèche se situait autour de 5,8 millions de tonnes. En comparaison avec 1981, où les pays européens représentaient 32 % de la production mondiale, ce rapport entre la production mondiale et la production européenne a considérablement diminué. Par conséquent, en 1995 et 2005, la Commission européenne a publié des Réglementations sur la protection contre les importations issues des pays qui ne font pas partie de la Communauté européenne, et a imposé une taxe anti-dumping sur les importations d'oxyde de magnésium [166, Commission européenne, 1995], [167, Commission européenne, 2005].

La production estimée d'oxyde de magnésium/de magnésie clinkérisé(e) en 2003 est indiquée dans le tableau 3.2.

Type d'oxyde de magnésium produit	Estimation de la production d'oxyde de magnésium (en millions de tonnes)
Oxyde de magnésium naturel	5.8 ¹⁾
Oxyde de magnésium synthétique	0.6 ²⁾
Production totale d'oxyde de magnésium	6.4 ³⁾
1) Production d'oxyde de magnésium à l'aide du procédé par voie sèche	
2) Procédé par voie humide	
3) X production totale à l'aide du procédé par voie sèche et par voie humide	

Tableau 3.2 : Production mondiale d'oxyde de magnésium/de magnésie clinkérisé(e) en 2003
[109, RITI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

La production mondiale des différentes variantes de l'oxyde de magnésium (magnésie), comme la magnésie clinkérisée ou surcuite, la magnésie calcinée caustique et la magnésie fondue, se situait entre 6,4 et 6,7 millions de tonnes en 2003, en raison de certaines inexactitudes statistiques. La figure 3.3 illustre la répartition de la production des différentes modifications/des différents types d'oxyde de magnésium (magnésie) en 2003. La production totale était de 6,7 millions de tonnes.

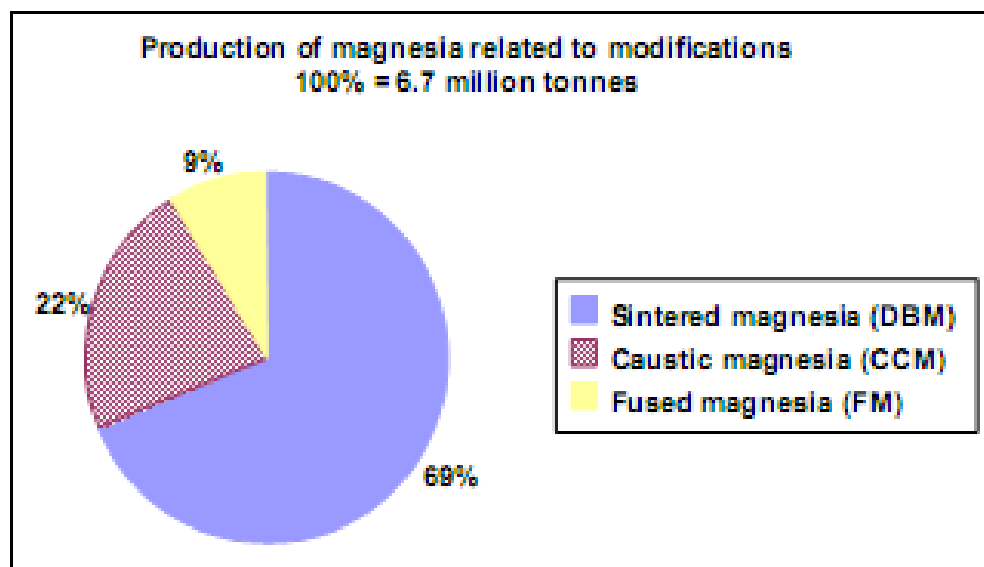


Figure 3.3 : Production mondiale d'oxyde de magnésium modifié en 2003
[109, RITI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

Les producteurs d'oxyde de magnésium n'étant pas très nombreux dans l'UE des 27, le nombre d'usines produisant de la magnésie clinkérisée est donc faible, et celles-ci sont indiquées dans le tableau 3.3. Dans l'UE des 27, on ne recense que neuf producteurs, utilisant 14 usines. En moyenne, le nombre de fours par usine est de un à trois, excepté pour un producteur qui utilise huit fours dans une seule usine. Les activités économiques de l'industrie de l'oxyde de magnésium se limitent à une zone peu étendue.

Pays	Nombre de producteurs	Nombre d'usines
Grèce	1	1
Espagne	2	2
Autriche	2	5
Pologne	1	11)
Slovaquie	3	5
Total	9	14
1) Hypothèse		

Tableau 3.3 : Producteurs de magnésite clinkérisée dans l'UE des 27
 [109, RITI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007]

Le tableau 3.4 indique la production de magnésite brute extraite en carrières et la production de magnésie à l'aide du procédé par voie sèche dans l'UE des 27 en 2003. Plus de 98 % de la magnésite extraite sert à la fabrication des différents produits de magnésie (magnésie surcuite, magnésie calcinée caustique et magnésie fondue).

Pays	Production de magnésite ¹⁾ production en 2003 (t)	Capacité de production de magnésie en 2003 (en tonnes)		
		Magnésie surcuite	Magnésie calcinée caustique	Magnésie fondue
UE des 25	2398574			
Grèce	549049	84635	92350	
Espagne	468900	60000	150000	
Autriche	766525			6000
Pologne	33000			
Slovaquie	900000			
1) Minerai brut extrait en carrière, la matière première pour la production d'oxyde de magnésium				

Tableau 3.4 : Production de magnésite et de magnésie à l'aide du procédé par voie sèche dans l'UE des 25 en 2003
 [109, RITI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007]

La magnésite brute est peu commercialisée. Des catégories particulières sont utilisées dans l'industrie de la céramique et de l'acier, et comme source de magnésium pour la production d'autres composés de magnésium. En 2003, ces marchés représentaient environ 2 % de la production de magnésite [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006].

3.1.2.1 Types de produits à base d'oxyde de magnésium (de magnésie)

3.1.2.1.1 Magnésie

La magnésie est de l'oxyde de magnésium chimiquement pur (MgO), également connu sous le nom de « périclase ». Le point de fusion de la magnésie se situe autour de 2800°C. C'est à cause de ce point de fusion élevé que la magnésie sert de préférence de matière première pour les produits réfractaires qui sont utilisés dans les processus à haute température pour les industries de l'acier, du ciment, de la chaux, du verre et des métaux non ferreux.

La magnésie peut être produite et modifiée comme suit :

- magnésie clinkérisée ou surcuite
- magnésie calcinée caustique
- magnésie fondue.

Ces types de produits de magnésie se différencient par leurs caractéristiques physico-chimiques. Les différentes catégories de magnésie produites sont définies par leur pureté chimique. Selon son origine, la magnésie contient généralement de l'oxyde de magnésium (MgO) à hauteur de 55 à 98 %. Les principales impuretés présentes sont le SiO_2 , le Fe_2O_3 , le CaO et le Al_2O_3 . Ces impuretés affectent la qualité du produit de magnésie. Avec la magnésie caustique calcinée, des quantités considérables de CO_2 restent dans le produit [67, Autriche, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006].

3.1.2.1.1.1 *Magnésie clinkérisée/surcuite*

La magnésie clinkérisée (MgO = magnésie surcuite) est fabriquée à l'aide d'un procédé de clinkérisation à une température de 1600 à 2200°C. Les différents types sont définis par la teneur en chaux de la matière première, qui est de l'ordre de <2 à 35 %, et par la teneur en SiO_2 , qui doit généralement être faible. Certaines applications particulières nécessitent également une teneur très faible en fer. Le produit se caractérise par une structure cristalline cubique ayant généralement une densité apparente de l'ordre de 3,05 à 3,45 g/cm³, et des dimensions cristallines de l'ordre de 30 à 200 j.tm. La magnésie clinkérisée ou surcuite est produite sous la forme de grains ou de briquettes.

3.1.2.1.1.2 *Magnésie calcinée caustique*

La magnésie calcinée caustique (MgO = magnésie calcinée caustique) est de la magnésite partiellement désacidifiée ou du $\text{Mg}(\text{OH})_2$ calciné, dont la modification cristalline d'origine a été conservée. Par exemple, la structure cristalline de la substance d'origine est conservée pendant la calcination à une température de décomposition de l'ordre de 600 à 800 °C, et les points de rétention du CO_2 sont libres (espaces au sein de la structure cristalline). Par conséquent, la magnésie calcinée caustique possède une surface spécifique importante, ce qui explique son comportement hautement réactif en comparaison avec la magnésie surcuite ou la magnésie fondue. La magnésie calcinée caustique se présente généralement sous la forme de poudre (fine, poreuse) ou de fragments hautement fissiles. La calcination à 1 300 °C est utilisée pour la production de différentes catégories de magnésie calcinée caustique.

3.1.2.1.1.3 *Magnésie fondue*

La magnésie fondue est produite à l'aide d'un procédé de fusion dans un four à arc électrique à une température de 2 800 °C. La différence entre la magnésie clinkérisée et la magnésie fondue réside, en premier lieu, dans la densité apparente (la magnésie fondue possède une densité plus élevée, de l'ordre de 3,43 à 3,54 g/cm³, que la magnésie clinkérisée) et, en second lieu, dans la taille cristalline, qui est de l'ordre de 200 à 2000 j.tm. La magnésie fondue est utilisée comme matériau réfractaire et pour certaines applications particulières, comme pour les réacteurs nucléaires. En Europe, la magnésie fondue est produite en très petites quantités. Par conséquent, la production de magnésie fondue n'est pas décrite en détail dans le présent document.

3.1.3 Utilisation de la magnésie

La magnésie clinkérisée ou surcuite est principalement utilisée dans l'industrie des réfractaires. Voici quelques exemples de domaines d'application de produits réfractaires utilisant de la magnésie :

- l'industrie de l'acier, comme par exemple pour les fours à arc électrique, les fours à oxygène basiques ou les autres fours, les convertisseurs d'acier, le transport du métal chaud et les machines
- l'industrie du ciment, comme par exemple pour l'admission des préchauffeurs, les fours à ciment et les refroidisseurs
- l'industrie des métaux non ferreux, comme par exemple pour les fours
- l'industrie de la chaux, comme par exemple pour l'alimentation des fours à chaux
- l'industrie du verre, comme par exemple pour les fours de fusion, les chambres de régénération.

Pour la magnésie calcinée caustique, les principales applications sont les suivantes :

- le secteur agricole, comme apport ou fertilisant
- l'industrie de production de l'acier, comme conditionneur de scories
- l'industrie de la construction, comme revêtement de sol et pour l'isolation
- la fabrication de la cellulose, du papier, des produits chimiques, des produits pharmaceutiques, des matériaux ignifuges et des matériaux balayables
- la protection de l'environnement.

Sur la base d'une production mondiale de magnésie de 6,7 millions de tonnes en 2003, la figure 3.4 illustre la consommation de magnésie par secteur dans différentes industries, y compris l'industrie de la magnésie synthétique. La magnésie est principalement utilisée pour la fabrication de produits réfractaires. 65% de la magnésie utilisée pour les réfractaires sont produits pour être utilisés dans l'industrie de l'acier, 15% dans l'industrie du ciment, 7 % de la magnésie produite est utilisée pour d'autres applications réfractaires, comme dans l'industrie des métaux non ferreux ou du verre, et, enfin, 13% de la production totale sont utilisés pour d'autres applications. Ces autres applications sont très variées et 80 applications sont connues en tout - la plupart d'entre elles concernent la magnésie calcinée caustique. Les principales applications sont l'agriculture (apports ou fertilisants), la construction (revêtements de sol et isolation), la fabrication de la cellulose, du papier, des produits chimiques et des produits pharmaceutiques, des matériaux ignifuges et des matériaux balayables, et la protection de l'environnement.

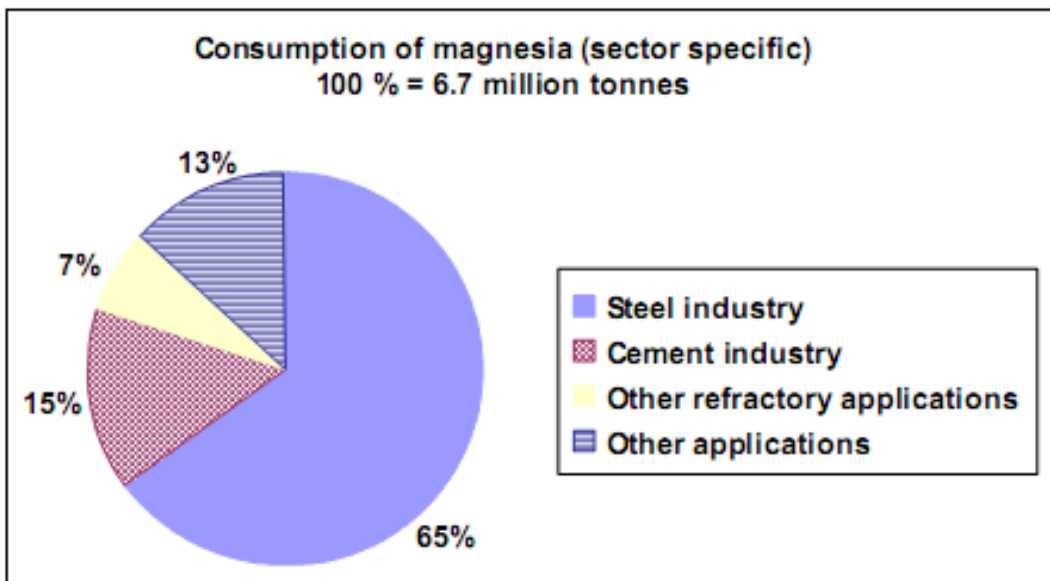


Figure 3.4 : Consommation mondiale de magnésie par secteur en 2003
[109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

Aucune statistique/étude indiquant la répartition et l'utilisation de la magnésie naturelle n'est disponible. Cependant, on peut supposer qu'il n'existe aucune différence significative par rapport à la magnésie synthétique.

Dans le monde entier, l'utilisation spécifique des produits réfractaires contenant de la magnésie est de moins en moins fréquente ; cependant, la production mondiale d'acier augmente et, d'un point de vue global, la demande en produits réfractaires contenant de la magnésie continue à augmenter, comme cela est illustré sur la figure 3.5. Cette figure concerne également la magnésie (MgO) utilisée pour la scorification (10 % de la consommation totale de MgO).

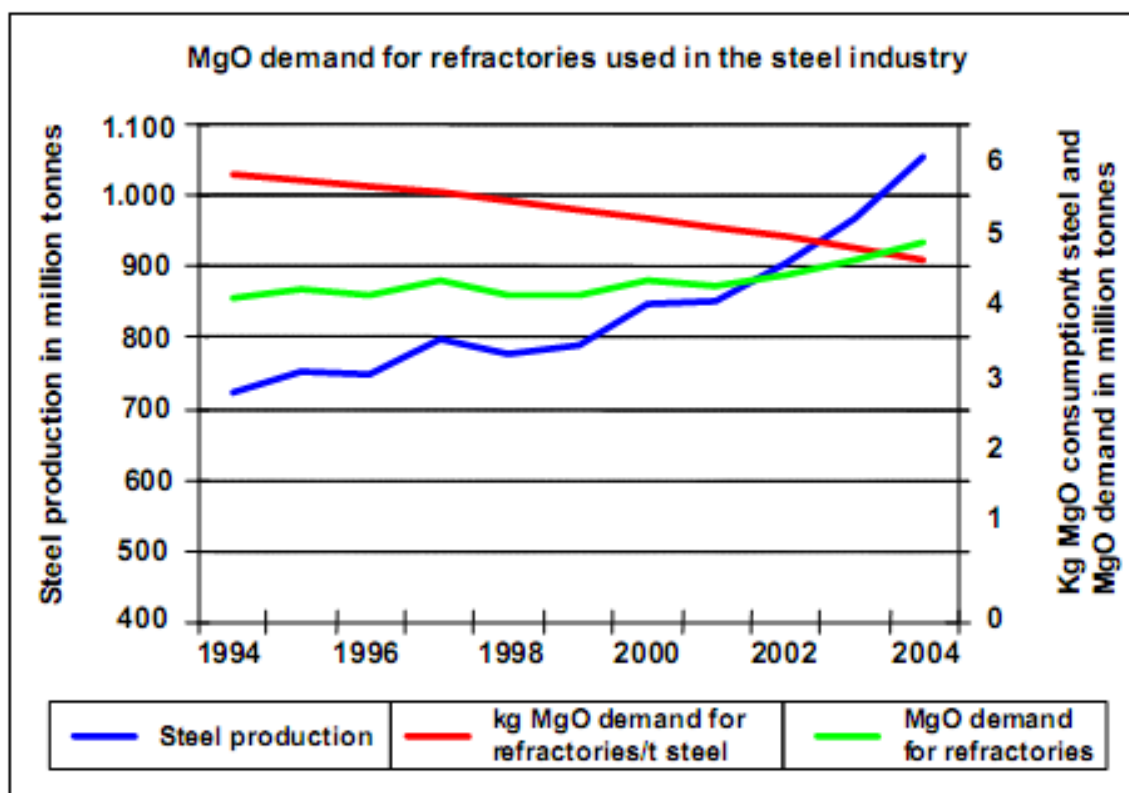


Figure 3.5 : Demande mondiale en magnésie pour la production de matériaux réfractaires utilisés dans l'industrie de l'acier.

[109, RITI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

En 1994, la production mondiale d'acier brut se situait autour de 700 millions de tonnes, tandis que, en 2005, la capacité de production d'acier atteignait plus de 1000 millions de tonnes. Sur la même période, la demande spécifique en magnésie a diminué de façon continue (-24% entre 1994 et 2004), pour passer d'environ 5 à 4,2 kg/t d'acier. Cependant, d'un point de vue global et en combinaison avec l'augmentation de la production mondiale d'acier, les besoins en magnésie et en magnésite augmentent de façon continue. Parallèlement à l'augmentation de l'utilisation de la magnésie dans l'industrie de l'acier, la production de magnésite est également passée de 9,4 (1994) à 12,5 (2003) million de tonnes par an, comme cela est également illustré sur la Figure 3.2 [67, Autriche, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007].

3.2 Procédés et techniques appliqués

3.2.1 Matières premières et préparation

Pour la fabrication des produits de magnésie (magnésie surcuite, magnésie calcinée caustique, magnésie fondue), les matières premières les plus importantes sont :

- la magnésite (carbonate de magnésium) = $MgCO_3$ (procédé par voie sèche)
- la brucite (hydroxyde de magnésium) = $Mg(OH)_2$ (procédé par voie sèche)
- la bischofite (chlorure de magnésium) = $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$ (procédé par voie humide)
- l'eau de mer et la dolomite (procédé par voie humide)

Le présent document ne couvre que le procédé en voie sèche pour la production de magnésie surcuite à partir de magnésite, étant donné que l'utilisation d'hydroxyde de magnésium (brucite) ne joue qu'un rôle mineur. Le procédé de production basé sur le chlorure de magnésium, le procédé par voie humide, n'est pas couvert dans le présent document. Pour plus d'informations sur le procédé par voie humide, se reporter au document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication des produits chimiques inorganiques en grands volumes - solides et autres (LVICS) [108, Commission européenne, 2006].

Les matières premières sont extraites dans des carrières à ciel ouvert et des mines souterraines, et la première fragmentation et le premier traitement préliminaire sont effectués au cours de l'opération d'extraction. Des unités de traitement standard sont utilisées pour la préparation des matières premières, comme des unités de concassage ou de broyage, et des unités de tamisage. Différents types de broyeurs primaires et secondaires sont utilisés selon la nature de la roche (comme par exemple sa dureté, sa taille, etc.). Cependant, les pierres ne doivent pas être trop petites, et seule une faible quantité de fines doit subsister.

Pour fabriquer la magnésite, une préparation à base de boues épaisses est parfois utilisée. Les matières premières sont quelquefois lavées afin d'éliminer les impuretés. Des séparateurs à aimants permanents sont également utilisés pour les tâches liées à la préparation magnétique.

La magnésie clinkérisée ou surcuite est généralement broyée et, dans une certaine mesure, manipulée magnétiquement après le processus de cuisson. La magnésie calcinée caustique est souvent broyée après le processus de cuisson, puis devient un produit fini. Différents types de machines peuvent être utilisés pour le processus de broyage, comme par exemple des broyeurs à boulets, des broyeurs à cylindres, des broyeurs pendulaires et des cylindres de broyage à haute pression. Des presses à briquettes sont généralement utilisées pour la fabrication des briquettes de magnésie calcinée caustique (traitement thermique en deux phases).

Le processus d'extraction n'est pas couvert dans le présent document non plus. Pour plus d'informations sur l'extraction en carrière, se reporter au document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la gestion des rejets et des débris de roche dans les activités d'extraction [47, Commission européenne, 2004].

3.2.1.1 Magnésite

Le terme « magnésite » désigne le carbonate de magnésium naturel (MgCO_3). La magnésite est partiellement dérivée des matières de formation rocheuse et apparaît généralement avec les dépôts de dolomite, qui sont très anciens la plupart du temps (plus de 400 millions d'années). En Europe, la magnésite se retrouve dans de nombreux endroits ; cependant, quelques dépôts ayant une valeur marchande et quelques producteurs existent. L'un des plus gros dépôts connus est la zone de greywacke (« zone de Grauwacken »), dans les Alpes. On distingue généralement deux types, qui diffèrent principalement par leur teneur en fer, comme suit :

- la magnésite spath (type Veitsch, riche en fer - 4 à 6 %)
- la magnésite gel (type Kraubath, avec une faible teneur en fer - < 0,5 %).

La magnésite spath se caractérise par des formations cristallines ou des formations cristallines en surface (de type macro-cristallin), et par une teneur en fer généralement élevée. La teneur en Fe_2O_3 est le plus souvent de l'ordre de 5 à 8 %. La formation est généralement métasomatique, c'est-à-dire qu'un minéral a été remplacé par un autre sans fusion, et que la composition chimique a été modifiée par des interactions de fluides. Les plus gros dépôts se trouvent en Autriche, en Slovaquie, en Corée du Nord, au Brésil, dans les régions asiatiques des pays de la CEI et en Chine, où, dans une certaine mesure, la matière première contient également une faible quantité de Fe_2O_3 .

La magnésite gel ne possède pas de structure macroscopique (de type microcristallin ou cryptocristallin). Sa formation fait suite à des modifications qui se sont produites au sein de roches riches en magnésium (principalement en serpentines). La teneur en fer est très faible (moins de 1 %). Les plus gros dépôts se trouvent en Turquie, en Grèce et en Australie.

3.2.2 Combustibles

En 2007, les différents types de combustibles suivants étaient principalement utilisés pour la cuisson :

- le gaz naturel
- le coke de pétrole
- le fioul lourd.

Cependant, selon la disponibilité et la situation économique, d'autres combustibles sont également utilisés, comme l'anthracite ou le charbon. Il existe une bonne relation entre le rendement et le prix du coke de pétrole (voir également la Section 3.4.5 et la figure 3.13). Cependant, en raison des besoins importants en énergie thermique et des températures élevées nécessaires pour le procédé de fabrication, il est indispensable d'ajouter d'autres combustibles dans certains cas.

De l'air est généralement ajouté au processus de combustion. Lorsque des températures élevées sont nécessaires pour le processus de clinkérisation ou de surcuisson, l'air de combustion peut être enrichi avec de l'oxygène techniquement pur.

En 2007, les déchets n'étaient pas utilisés comme combustibles, en raison du risque de présence d'impuretés dans le produit ou dans les gaz d'exhaure. La plupart des produits doivent être purs et propres, sans aucune impureté. L'utilisation des déchets peut avoir un effet sur la qualité du produit. Cet effet doit être évité, car les caractéristiques réfractaires de la magnésie clinkérisée ou surcuite à utiliser pour les briques réfractaires s'en trouveraient alors réduites. Cependant, à l'avenir, et suite à de nouvelles mesures/techniques de co-incinération des déchets et en raison de certains produits de magnésie, l'industrie de l'oxyde de magnésium prend en considération l'utilisation de différents types de déchets, comme par exemple le plastique ou le bois.

Dans ce contexte, les aspects d'ordre général et ceux liés au contrôle qualité pour l'utilisation des déchets dans le secteur du ciment et de la chaux figurent respectivement dans les Sections 1.2.4 et 2.2.5 du présent document.

3.2.3 Description générale du procédé de production de magnésie à partir de magnésite (magnésie naturellement clinkérisée/surcuite)

La magnésie est produite en cuisant la matière première (roche naturelle traitée et préparée) dans un four à foyers multiples, un four vertical ou un four rotatif de clinkérisation. La réaction chimique peut être exprimée comme suit :



La réaction chimique est endotherme, dépend d'une température de cuisson élevée, et est grosse consommatrice d'énergie. La quantité d'énergie nécessaire est élevée ($\Delta H = + 113 \text{ kJ/mol MgO}$). Le procédé commence à une température d'environ 550 à 800 °C, où la magnésite est désacidifiée et le dioxyde de carbone est libéré. Cette réaction produit de la magnésie calcinée caustique. A l'étape suivante, la magnésie calcinée caustique subit un traitement thermique (cuisson) à des températures de l'ordre de 1600 à 2200°C, en une ou deux phase(s), et devient de la magnésie clinkérisée ou de la magnésie surcuite. Les températures, ainsi que la durée du traitement, sont des facteurs indispensables à l'obtention d'un produit correctement cristallisé et à densité élevée. Avec ce procédé, le système cristallin de la magnésite (trigonal) se transforme en une structure cubique, et la densité est fortement augmentée.

Le schéma de traitement de la méthode normale de production des différents types de magnésie est illustré sur la figure 3.6.

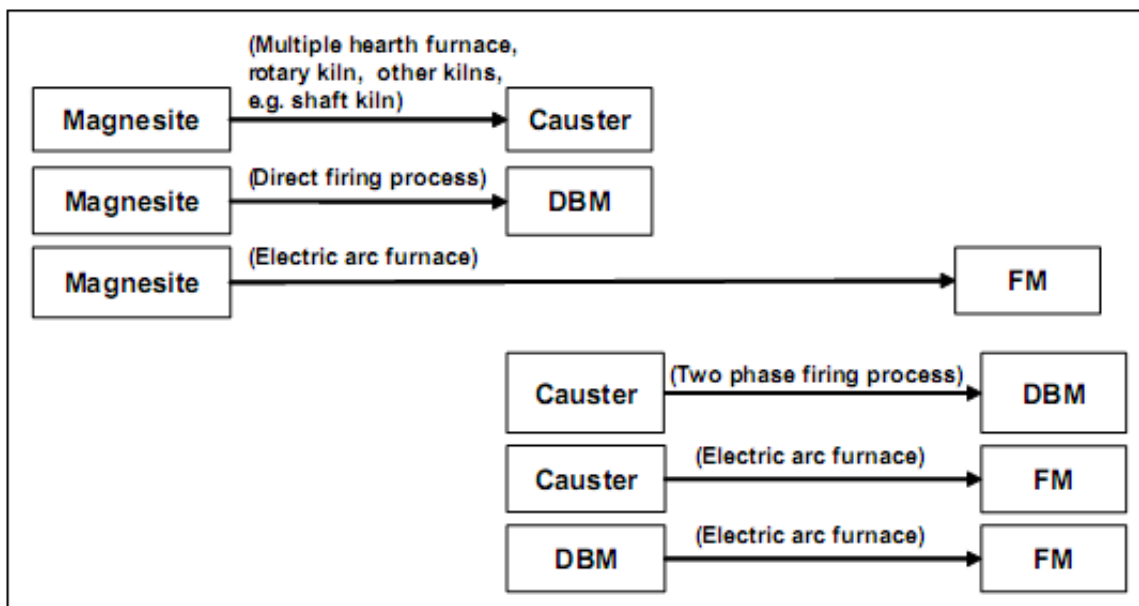


Figure 3.6 : Schéma de traitement de la méthode normale de production de la magnésie [67, Autriche, 2006], [109, RHI AG, 2006] [165, EUROMINES, 2006]

3.2.3.1 Procédés de cuisson

3.2.3.1.1 Procédé de cuisson directe (cuisson en une seule phase)

La magnésite brute est cuite afin de devenir de la magnésie clinkérisée ou surcuite en un seul cycle, à l'aide de fours verticaux ou de fours rotatifs de clinkérisation. L'avantage de ce procédé est que les besoins en énergie sont plus faibles par rapport au procédé de chauffage en deux phases. Cependant, la qualité du produit clinkérisé dépend de la matière première et ne peut être modifiée en ajoutant des matières différentes, comme par exemple du dioxyde de zirconium ou de l'oxyde de chrome.

Le premier procédé est généralement effectué en analysant les matières premières par lots puis en les séparant et en les stockant selon leur qualité. Un cycle de charges est réalisé en mélangeant différentes qualités de matières premières. Ce mélange de matières premières est ensuite cuit dans un four vertical ou un four rotatif de clinkérisation à des températures de l'ordre de 1450 à 2200°C. Le produit est appelé « clinker brut ». Après ce procédé de cuisson, cette magnésie agglomérée brute peut être traitée.

3.2.3.1.1.1 Préparation du « clinker brut »

Dans la plupart des cas, la préparation et le traitement du « clinker brut » sont nécessaires. La magnésie riche en fer est préparée et traitée en deux étapes :

- concassage et broyage (densité, chromatie, flottation ; traitement avant le procédé de cuisson en four)
- préparation magnétique (traitement après le procédé de chauffe du four).

Enfin, le clinker brut refroidi peut être traité magnétiquement à température ambiante. La caractéristique de séparation est la teneur en chaux de l'aggloméré. La faible teneur en chaux de l'aggloméré est indispensable à la production des produits réfractaires moulés (briques). La séparation magnétique est effectuée à l'aide d'un séparateur à aimants permanents ou d'un séparateur électromagnétique. La ferrite de magnésie (MgFe_2O_4) est une phase minérale utilisée comme support de magnétisation, qui se forme lorsque la magnésie passe de 1200 à 900 °C.

Le principe de base de ce processus est le suivant : plus le processus de refroidissement est rapide, plus la quantité de ferrite de magnésie formée est importante. Le processus de préparation magnétique est donc amélioré, c'est-à-dire que plus la quantité de ferrite de magnésie disponible est élevée, plus le processus de préparation magnétique s'améliore.

La caractéristique physique suivante est utilisée : une plus grande quantité de ferrite de magnésie est formée dans un matériau pauvre en CaO que dans un matériau riche en CaO. La séparation s'effectue grâce à la proportion relative de ferrite de magnésie. Ainsi, les particules pauvres en CaO sont davantage magnétisées et adhèrent mieux au tambour magnétique que les particules riches en CaO.

Cette préparation magnétique de l'aggloméré donne :

- De la magnésie clinkérisée pauvre en CaO (riche en ferrite de magnésie et présentant de bonnes propriétés de magnétisation) et
- De la magnésie clinkérisée riche en CaO (teneur en CaO plus élevée et peu de propriétés de magnétisation).

Le rendement varie considérablement selon la charge en clinker brut et la position du séparateur sur l'évacuation du tambour.

La figure 3.7 illustre un exemple de schéma de traitement de la production de magnésie par voie sèche par une usine de magnésie surcuite.

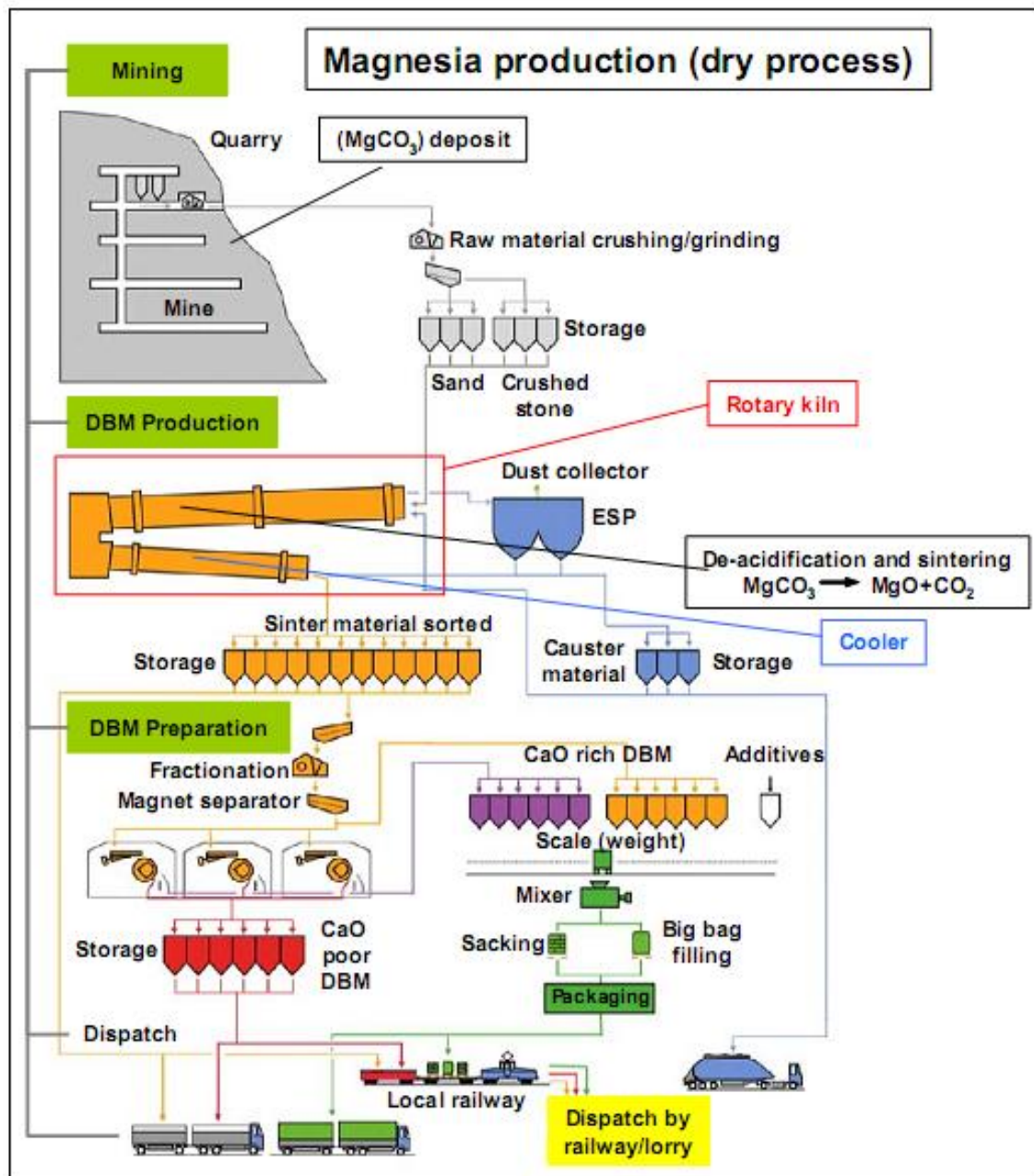


Figure 3.7 : Exemple de schéma de traitement de la production de magnésie par voie sèche par une usine de magnésie surcuite [109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.2.3.1.2 Procédé de cuisson en deux phases

Différentes unités et différents types de fours peuvent être utilisés pour la première étape de ce procédé, comme des fours à lit fluidisé, les fours verticaux ou les fours rotatifs de clinkérisation, les fours à foyers multiples, et les fours spéciaux destinés à la production de magnésie calcinée caustique.

Tout d'abord, la magnésite brute est désacidifiée dans un four à des températures allant jusqu'à 1 000 °C. La matière calcinée caustique peut ensuite être broyée. Le broyage est très important pour pouvoir obtenir de la magnésie surcuite à haute densité. Cette matière broyée est formée en briquettes qui sont ensuite cuites dans un four rotatif ou un four vertical afin d'obtenir de la magnésie clinkérisée/surcuite.

Contrairement au procédé de cuisson en une seule phase, les caractéristiques de la matière clinkérisée peuvent être considérablement influencées, en termes de taille cristalline et de densité, par l'ajout de différentes matières, appelées « agents dopants », comme par exemple de l'oxyde de chrome ou de l'oxyde de zirconium.

3.2.3.2 Types de fours - techniques et conception

Les différents types de dépôts de minéraux nécessitent, dans une certaine mesure, des procédés de production très variés. Aucun four standard n'existe pour la production de magnésie à partir de magnésite (procédé naturel). Aucune standardisation n'existe non plus pour les procédés et les techniques utilisés. Cependant, une grande variété de procédés, de techniques et de fours est utilisée pour la production de magnésie.

Le type de four à utiliser est déterminé par différents paramètres, comme :

- les caractéristiques de la magnésite disponible sur le site
- le type de produit fabriqué (magnésie clinkérisée, magnésie fondue, magnésie caustique)
- la qualité et les caractéristiques du produit, comme par exemple sa densité, sa pureté, sa dimension cristalline
- le prix et/ou la disponibilité des combustibles utilisés.

Le type de four dépend très souvent de la matière première elle-même et des capacités de production, et la qualité du produit dépend beaucoup du type de four et du type de procédé. Différents types de fours peuvent être utilisés, mais les fours rotatifs ou les fours verticaux sont les plus couramment utilisés. Des fours verticaux ou des fours rotatifs de clinkérisation (fours longs rotatifs, fours Lepol) sont utilisés pour le traitement thermique en une seule phase de la magnésie clinkérisée. En cas d'utilisation d'un procédé en deux phases pour produire de la magnésie clinkérisée, pour la première phase, on utilise les mêmes types de fours que pour la production de magnésie caustique pure, comme des fours verticaux ou des fours rotatifs de clinkérisation. De plus, on utilise des fours verticaux ou des fours rotatifs pour le procédé de clinkérisation ultérieur. Pour produire de la magnésie calcinée caustique, on utilise des fours rotatifs, des fours à lit fluidisé et des fours spéciaux. Pour produire de la magnésie fondue, on utilise des fours à arc électrique. Ces fours (excepté les fours à arc électrique et les fours spéciaux) utilisent le principe du contre-courant afin d'obtenir des rendements élevés.

Dans les fours verticaux, il est généralement possible d'utiliser de la magnésite en gros morceaux ayant une granulométrie supérieure à 50 mm, ou des briquettes de magnésie calcinée caustique. La magnésite à grain fin est cuite dans des fours rotatifs ou caustérisée, formée en briquettes et cuite dans des fours verticaux ou dans un four rotatif, ou est comprimée, comme cela est illustré sur la figure 3.8.

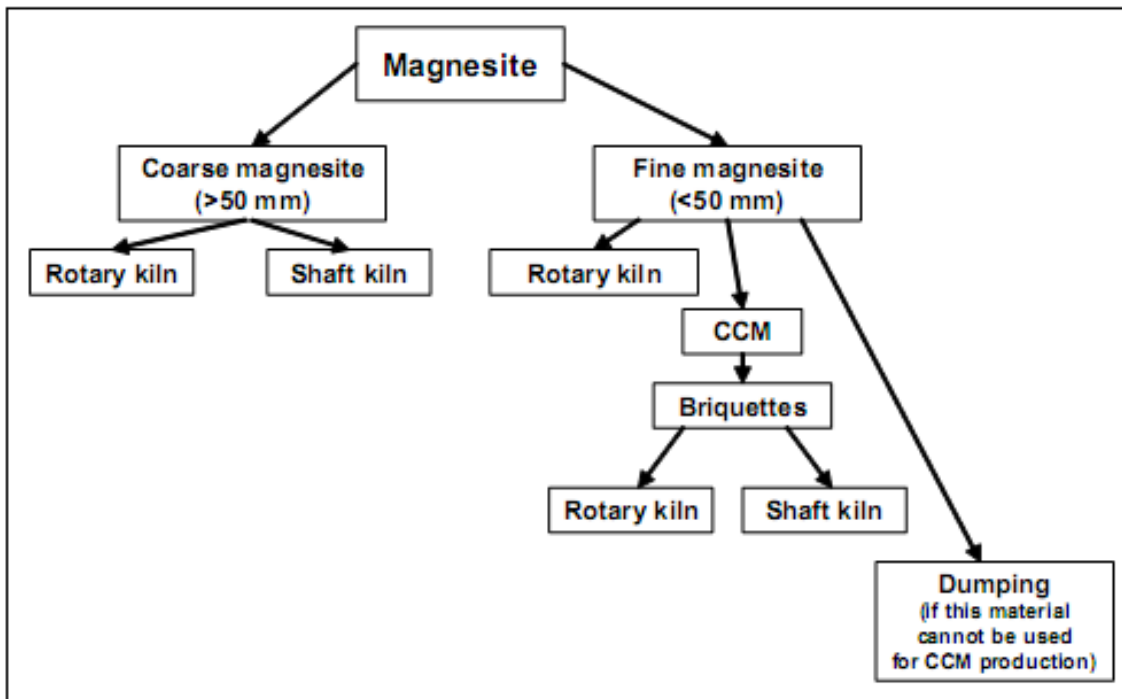


Figure 3.8 : Parcours de la magnésite grossière et fine dans la fabrication de la magnésie [109, RHI AG, 2006], [165, EUROMINES, 2006]

3.2.3.2.1 Fours rotatifs

3.2.3.2.1.1 Fours rotatifs avec préchauffeur

Dans les fours rotatifs avec préchauffeur (four Lepol), les matières premières sont fournies à la zone d'alimentation et de préchauffage du four via une grille de préchauffage. Tout d'abord, les matières premières sont préchauffées et partiellement désacidifiées par des gaz d'exhaure chauds, à l'aide du principe de contre-courant. La magnésite partiellement désacidifiée est acheminée dans le four, dans lequel une désacidification est effectuée avant la zone de cuisson. Pendant la phase de préchauffage, des morceaux de matières premières sous la forme de MgO à grains fins tombent à travers la grille Lepol et sont ensuite fournis directement à la zone de cuisson du four. Dans la zone de cuisson, les matières sont clinkérisées à des températures de l'ordre de 1600 à 2200 °C. Le cycle de cuisson dure entre 8 et 16 heures. Pour le reste du traitement, la matière clinkérisée est refroidie à 200 °C dans la zone de refroidissement du four. Le principe de fonctionnement d'un four rotatif avec préchauffeur utilisé pour le procédé par voie sèche de la fabrication de la magnésie est illustré sur la figure 3.9. Les fours rotatifs avec préchauffeur utilisés pour la fabrication de la magnésie clinkérisée/de la magnésie surcuite possèdent une longueur de l'ordre de 60 à 80 mètres et un diamètre de 2 à 4 mètres [67, Autriche, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [109, RHI AG, 2006], [165, EUROMINES, 2006].

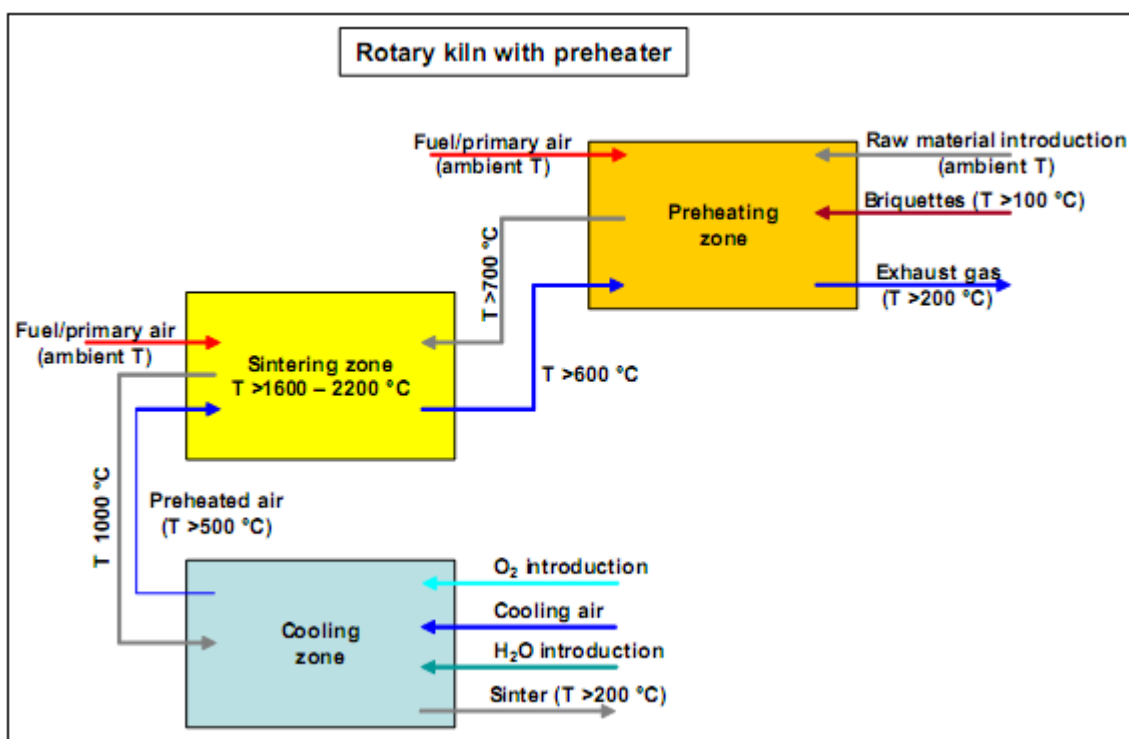


Figure 3.9 : Principe de fonctionnement des fours rotatifs avec préchauffeur dans la fabrication de la magnésie

[109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.2.3.2.1.2 Fours longs rotatifs

Dans les fours longs rotatifs, le préchauffage, la désacidification et la clinkérisation ont lieu entièrement à l'intérieur du four. C'est principalement la raison pour laquelle ce type de four est beaucoup plus long que les fours rotatifs avec préchauffeur. Les fours longs rotatifs utilisés pour la fabrication de la magnésie surcuite possèdent une longueur de l'ordre de 80 à 120 mètres et un diamètre de 2 à 4 mètres.

Grâce à la rotation et à la déclivité horizontale du four, les matières situées à l'intérieur sont transférées vers la zone de clinkérisation et sont préchauffées et désacidifiées, en raison de la température des gaz d'exhaure, avant d'atteindre la zone de clinkérisation. Le procédé de clinkérisation a lieu dans la zone de clinkérisation du four long rotatif à des températures de l'ordre de 1600 à 2200°C, auxquelles la magnésie clinkérisée atteint la densité requise. A la sortie du four, le produit est transporté dans le tube de refroidissement. Le refroidissement s'effectue à l'aide d'un courant d'air secondaire qui est aspiré par le principe du contre-courant. Cet air préchauffé qui provient du refroidisseur est ensuite réutilisé comme air de combustion. La figure 3.10 illustre le principe de fonctionnement d'un four rotatif de clinkérisation utilisé pour le procédé par voie sèche dans la fabrication de la magnésie.

Le produit clinkérisé refroidi est transporté par un convoyeur afin de subir le reste du traitement.

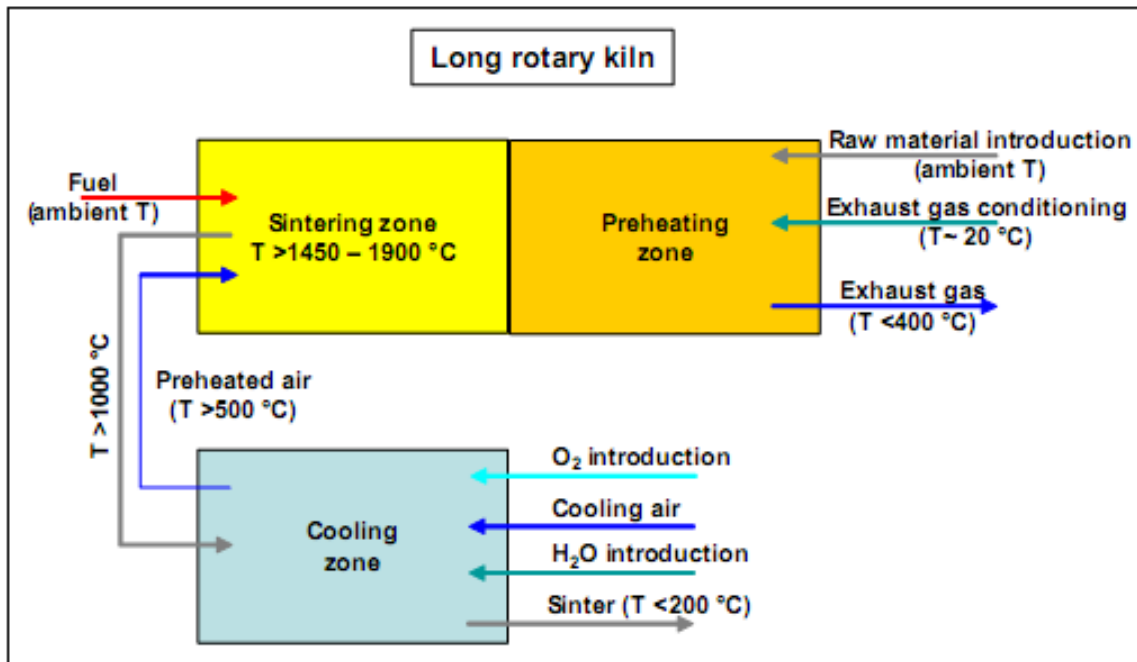


Figure 3.10 : Principe de fonctionnement des fours longs rotatifs dans la fabrication de la magnésie [109, RITI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.2.3.2.2 Fours verticaux

Différents types de fours verticaux peuvent être utilisés pour la fabrication de la magnésie.

3.2.3.2.2.1 Fours verticaux avec plaque rotative

La matière première réfractaire broyée et fine, qui est préparée selon des mélanges définis, est placée dans un tambour rotatif d'agglomération, et formée en agglomérés (\varnothing 20 à 30 mm) en ajoutant de l'eau. Les boulettes sont séchées en continu avant d'être cuites dans un four vertical à une température d'environ 1 750 °C. Le produit clinkérisé est évacué via une plaque rotative et stocké dans un lieu intermédiaire avant le reste du traitement. Le principe de fonctionnement d'un four vertical utilisé dans la fabrication de la magnésie est illustré sur la figure 3.11.

De la pierre de magnésite naturelle d'une taille de 20 à 200 mm peut également être cuite à l'aide de ce procédé.

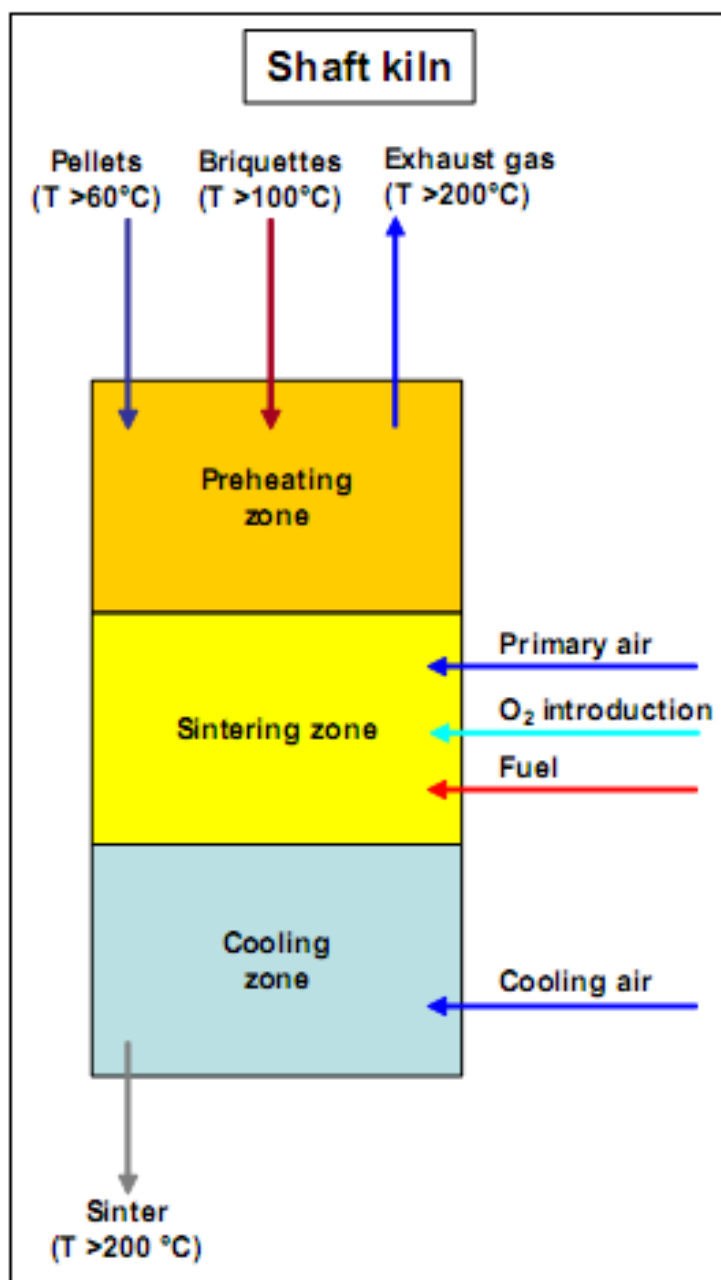


Figure 3.11 : Principe de fonctionnement des fours verticaux dans la fabrication de la magnésie [109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO , 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.2.3.2.2 Fours verticaux avec grille rotative

Ce type de four vertical permet de fabriquer un type de briquettes particulier. Les briquettes sont composées de magnésite caustérisée et de minerai de chrome et sont comprimées à l'aide d'un procédé de briquetage en ajoutant de l'eau comme liant. Afin d'obtenir la qualité de clinkérisation requise avec ce type de four, on utilise une température de $2\,200^{\circ}\text{C}$. Un courant d'air de combustion enrichi en oxygène est également nécessaire. Dans le four, la colonne de matière compacte est transportée par une évacuation rotative puis est évacuée du four.

Ce produit clinkérisé est finement broyé et tamisé avant d'être traité en produits réfractaires.

3.2.3.2.2.3 Four à double chambre

Avec ce type de four, la magnésite brute est placée dans une chambre située au sommet du four, et appelée « chambre de préchauffage », où elle est préchauffée et désacidifiée. Après la zone de préchauffage, la chambre est divisée en deux sections - appelées « double chambre » - dans lesquelles ont lieu la clinkérisation et le refroidissement. Après avoir passé la zone de préchauffage, la magnésite brute est clinkérisée à une température de l'ordre de 1600 à 2200°C. Dans les zones de refroidissement situées en bas du four à double chambre, le produit de magnésie clinkérisé est refroidi à une température inférieure à 200 °C en utilisant de l'air de refroidissement. Le produit de magnésie clinkérisé et refroidi est ensuite évacué du four. La figure 3.12 illustre le principe de fonctionnement d'un four à double chambre utilisé dans la fabrication de la magnésie.

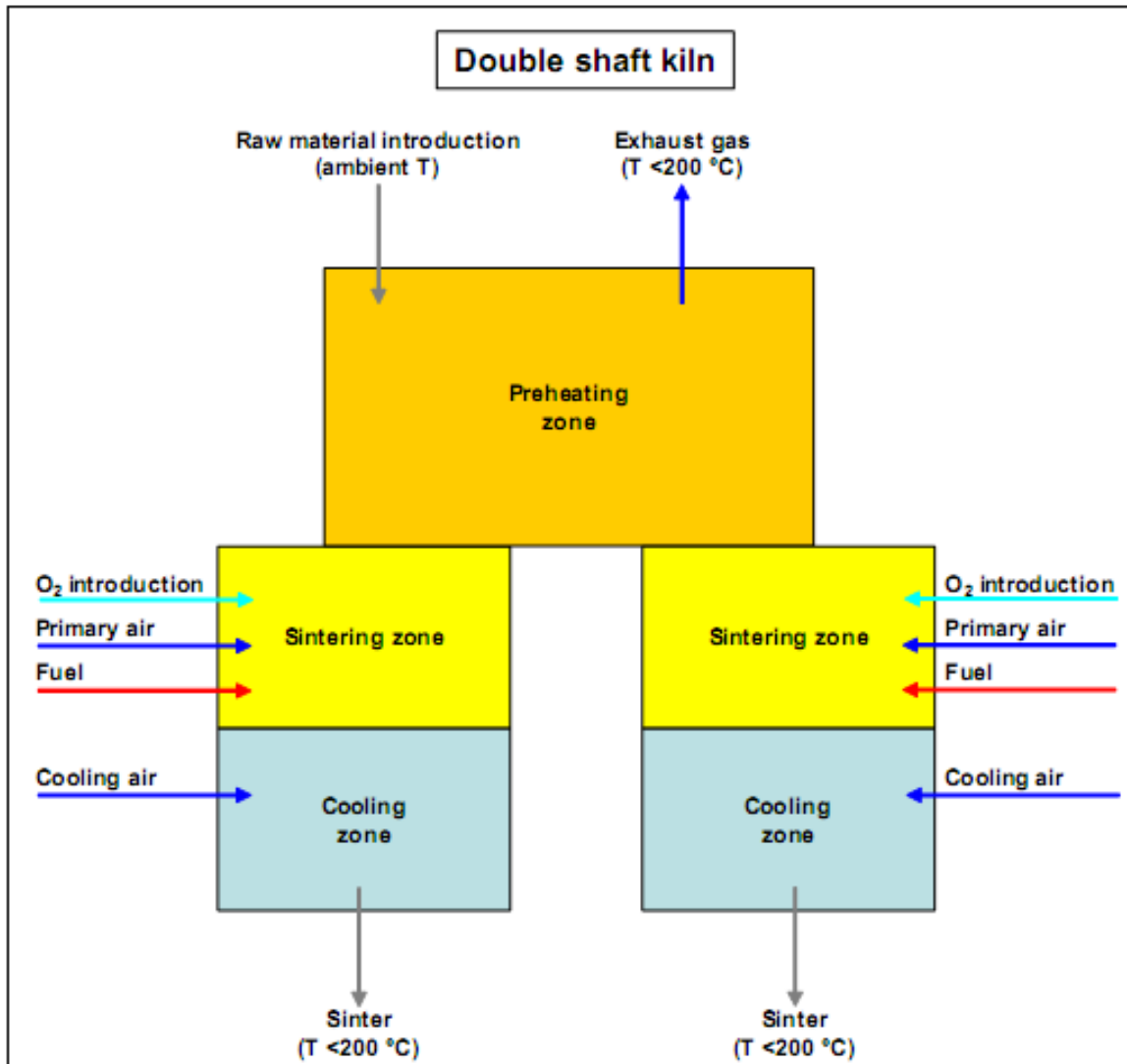


Figure 3.12 : Principe de fonctionnement des fours à double chambre utilisés dans la fabrication de la magnésie

[109, RITI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.2.4 Production de magnésie fondue

La magnésie fondue est produite dans des fours spéciaux à arc électrique qui fonctionnent par lot. En principe, le four se compose d'un wagon plate-forme sur lequel est placée la sortie du four (conduit).

La matière première est fondue à l'intérieur de cette sortie de four par un arc électrique qui est déclenché entre deux électrodes en graphite. Le procédé de fusion s'effectue à la verticale, de bas en haut. Pendant ce procédé de fusion, la matière première est fournie par lots au four, depuis le dessus. Aucune coulée n'est effectuée. La matière fondue reste sur le wagon plate-forme au sein du conduit, où a également lieu le procédé de refroidissement. Après la fusion, le wagon est écarté des électrodes et le cycle suivant peut débuter. 5 à 8 tonnes de magnésie fondue sont généralement obtenues pour chaque bloc de produit. La pierre brute, la magnésie calcinée caustique ou la magnésie clinkérisée/surcuite peuvent être mélangées et utilisées comme matière première. Pendant le procédé de refroidissement, des impuretés se forment au niveau des bords (dans la croûte) et les parties les plus pures sur le plan chimique se trouvent au centre du bloc de produit fondu.

Après le refroidissement, le bloc de produit est renversé, broyé de façon à réduire sa taille, et souvent trié à la main. Le principal pays de production est la Chine. Cependant, quelques sites se trouvent également dans l'Union européenne, mais les quantités produites sont très faibles. C'est pourquoi les détails concernant la production de magnésie fondue ne figurent pas dans le présent document [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006].

3.3 Consommation d'énergie et niveaux d'émission

Les questions environnementales principales associées à la fabrication des différents types de magnésie sont l'utilisation de l'énergie et les émissions dans l'air. Le procédé de cuisson de la magnésie est le principal consommateur d'énergie et la principale source d'émissions. Le procédé de broyage secondaire et les opérations annexes (comme le concassage, le tamisage, le transport, le stockage et l'évacuation) peuvent également jouer un rôle significatif.

Il convient de noter que, sauf indication contraire dans le présent document, pour la présente Section concernant l'industrie de l'oxyde de magnésium, les conditions standard de mesure des débits volumétriques et des concentrations sont liées aux définitions suivantes, qui figurent également dans le glossaire :

m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, le débit volumétrique correspond à 10% en volume d'oxygène et à l'état standard
mg/m ³	concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux correspondent à des gaz résiduels secs à 10% en volume d'oxygène et à l'état standard
état normal	correspond à une température de 273 K, une pression de 1013 hPa et un gaz sec

De plus, il convient de noter que les plages d'émissions correspondent à un niveau d'oxygène de référence de 10 %, bien que le niveau d'oxygène réel au cours du procédé de cuisson soit bien inférieur à 10 %. La formule de calcul de la concentration en émissions est indiquée ci-dessous :

$ER = \frac{21 - OR}{21 - OM} * EM$	
ER (mg/Nm ³) : concentration en émissions associée au niveau d'oxygène de référence OR OR (en % en volume) : niveau d'oxygène de référence EM (mg/Nm ³) : concentration en émissions associée au niveau d'oxygène mesuré OM OM (en % en volume) : niveau d'oxygène mesuré	

Pour plus d'informations sur le contrôle, se reporter au document de référence sur les principes généraux de suivi (MON) [151, Commission européenne, 2003].

3.3.1 Consommation de matières premières (magnésite non traitée) et d'eau

A haute température, la magnésite (MgCO₃) se décompose thermiquement en magnésie (MgO) et en dioxyde de carbone (CO₂). En prenant le poids moléculaire de la magnésite comme base (84,31 g/mol), les quantités suivantes de magnésie et de dioxyde de carbone sont obtenues après décomposition, comme cela est indiqué dans le tableau 3.5 :

Matière	Quantité de			Quantité totale (g/mol)
	Mg (g/mol)	C (g/mol)	O (g/mol)	
Magnésite (MgCO ₃)	24.3 1	12.01	48.00	84.3 1
Dioxyde de carbone (CO ₂)	-	12.01	32.00	44.01
Magnésie (MgO)	24.3 1	-	16.00	40.30

Tableau 3.5 : Quantités de magnésie et de dioxyde de carbone après décomposition
 [109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

Ce résultat peut également être représenté en termes relatifs sous la forme de la proportion de matière dans la magnésite, comme cela est indiqué dans le tableau 3.6.

Matière	Proportion dans la magnésite (MgCO ₃) (%)
Magnésie (MgO)	47.80
Dioxyde de carbone (CO ₂)	52.20
Total	100.00

Tableau 3.6 : Rendement en magnésie et en oxyde de carbone de la magnésite
RITI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

Pendant la décomposition de 1 kg de magnésite, environ 522 g de dioxyde de carbone et 478 g de magnésie sont produits. Cela signifie que, pour produire une tonne de magnésie (MgO), 1092 tonnes de dioxyde de carbone résultent de la décomposition du carbonate. Cependant, ce problème est théorique, car la magnésite contient différentes impuretés, comme du SiO₂, du CaO, et du Fe₂O₃. Il convient de noter que, en règle générale, pour produire une tonne de magnésie, 2,1 à 2,4 tonnes de magnésite sont nécessaires selon le minerai de magnésite, la qualité produite et le type de four utilisé [109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007].

Consommation d'eau

L'utilisation d'eau de traitement est faible, étant donné que seule une petite quantité d'eau est utilisée, comme par exemple pour laver la matière première (magnésite) de façon à éliminer les impuretés, ou pour refroidir le produit de magnésie dans la zone de refroidissement du four, et pour le procédé de séparation des milieux denses. Certaines opérations sont effectuées à l'aide de systèmes d'épuration des gaz d'exhaure, cependant, et les gaz d'émission sont épurés avec de l'eau. Environ 5 à 12 m³ d'eau/tonne de produit de magnésie sont nécessaires [109, RHI AG, 2006], producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007].

3.3.2 Consommation d'énergie

La fabrication de la magnésie (procédé par voie sèche) est grosse consommatrice d'énergie, le procédé de fabrication de la magnésie, et principalement de la magnésie surcuite, s'opérant à très haute température.

La magnésite (MgCO₃) se décompose thermiquement en magnésie (MgO) et en dioxyde de carbone (CO₂). Le procédé est très endotherme et son enthalpie de réaction théorique est de 2803 MJ/kg de MgO. La décomposition de la magnésite commence à une température de 550 °C et se termine à moins de 800 °C si elle contient une quantité significative d'autres carbonates.

Du gaz naturel, du coke de pétrole et du fioul sont utilisés pour le procédé de cuisson. Le tableau 3.7 indique le combustible nécessaire à la fabrication d'une tonne de magnésie clinkérisée en utilisant un procédé à chauffage direct. Les valeurs les plus élevées indiquées dans ce tableau sont nécessaires à la fabrication de la magnésie clinkérisée ou surcuite.

Combustibles	Minimale	Maximale
Gaz naturel	176 Nm ³ /t	310 Nm ³ /t
Coke de pétrole	240 kg/t	393 kg/t
Fioul	190 kg/t	330 kg/t

Tableau 3.7 : Combustible nécessaire à la fabrication d'une tonne de magnésie (MgO)
[109, RITI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

La quantité d'énergie nécessaire à la production de magnésie se situe entre 6 et 12 GJ/t MgO et dépend de différents facteurs, comme les caractéristiques et la teneur en humidité (humide ou très sèche) de la magnésite brute.

Afin d'atteindre la température de combustion très élevée nécessaire (plus de 2000°C), de l'oxygène peut également être utilisé. La quantité d'oxygène nécessaire se situe entre 15 et 150 Nm³/t de magnésie clinkérisée. Il convient de noter que, en cas de fabrication de types spéciaux de magnésie clinkérisée présentant des niveaux très élevés de pureté ou des dimensions cristallines importantes, les valeurs peuvent être beaucoup plus hautes - jusqu'à 150 Nm³/t.

L'électricité est utilisée pour les machines mécaniques, comme par exemple pour le système de ventilation, le procédé de briquetage et les pompes. Cette électricité est généralement achetée auprès de fournisseurs d'électricité (réseau national). Les besoins en électricité peuvent varier selon les machines utilisées, et sont généralement de l'ordre de 75 à 180 kWh/t (270 à 648 MJ/t) de magnésie clinkérisée. Les valeurs sont similaires pour la fabrication de la magnésie caustique.

Une quantité d'électricité beaucoup plus importante (fours à arc électrique), de l'ordre de 3500 à 4500 kWh/t, est nécessaire pour la fabrication de la magnésie fondue. Cependant, pour fabriquer de la magnésie très pure, les besoins en énergie peuvent être multipliés par 2, voire plus [109, RHI AG, 2006], [165, EUROMINES, 2006].

3.3.3 Émissions

La fabrication de l'oxyde de magnésium/de la magnésie à l'aide du procédé par voie sèche entraîne des rejets dans l'atmosphère, dans l'eau et dans le sol (pertes/déchets) et des émissions de bruit. La présente Section concerne les rejets de polluants dans l'atmosphère pour le procédé de fabrication d'oxyde de magnésium/de magnésie par voie sèche.

3.3.3.1 Émissions dans l'air

Le procédé de cuisson entraîne des rejets importants dans l'atmosphère, comme de la poussière, des oxydes d'azote, des oxydes de soufre et du monoxyde de carbone. Ces rejets proviennent pour partie de la magnésite utilisée comme matière première, et pour partie des combustibles utilisés.

En raison des températures de cuisson élevées dans le four, le dioxyde de soufre émis par les combustibles n'est normalement pas contenu dans le produit. Cependant, en cas d'utilisation de températures moins élevées pour la cuisson en four, le dioxyde de soufre est partiellement absorbé par le produit et est contenu dans la poussière issue du procédé de cuisson (cf. Section 3.4.7.3). Les rejets de dioxyde de soufre provenant de la matière première (magnésite) dépendent de la teneur en soufre de la matière première. Ils sont en principe peu élevés en raison de la faible teneur en SO₂ de la plupart des matières premières. Cependant, dans certains cas, les rejets de SO₂ par les matières premières peuvent représenter 50 % de la totalité des rejets de dioxyde de soufre. De plus, la teneur en soufre de la matière première est liée à la taille des particules ou à la granulométrie de la matière première. Le tableau 3.8 contient des exemples de la relation entre la granulométrie et la teneur en soufre des matières premières.

Granulométrie des matières premières (mm)	Teneur en soufre des matières premières (%)
>1	0.04
0.02 – 1	0.19
<0.02	1.80

Tableau 3.8 : Exemples de la relation entre la granulométrie et la teneur en soufre des matières premières
[110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [168, GTT CLM, 2007]

La comparaison entre différentes sources d'énergie en fonction des coûts spécifiques en EUR/GJ et de la teneur en soufre de ces combustibles est illustrée sur la figure 3.13. Le coke de pétrole contient la plus grande quantité de soufre, suivi par le charbon et l'anthracite.

Les « rejets de CO₂ » résultent de la décomposition de la magnésite (MgCO₃) en magnésie (MgO), et environ 1 tonne de CO₂/t de magnésie peut être obtenue. Les rejets de CO₂ peuvent également être dus au procédé de combustion, comme par exemple en cas d'utilisation de gaz naturel ou de coke de pétrole. Le procédé de combustion contribue à hauteur d'environ 0,4 à 1,3 t de CO₂/t de magnésie clinkérisée aux rejets de CO₂.

Les rejets dans l'atmosphère ont lieu non seulement au cours du procédé de cuisson, mais également pendant les autres étapes de la fabrication, comme :

- le stockage et la manipulation des matières premières, des combustibles ou des produits - rejets de poussière possibles
- les procédés de broyage - rejets de poussière possibles.

Les émissions de poussières diffuses sont principalement dues au stockage et à la manipulation des matières premières et des combustibles, et aux véhicules utilisés sur le site. Les émissions de poussière dues au conditionnement et à l'expédition du produit de magnésie peuvent également être significatives. Le recours à des aménagements simples et linéaires et à des mesures/des techniques d'organisation est recommandé afin de minimiser les sources éventuelles de poussières diffuses [67, Autriche, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008] [165, EUROMINES, 2006].

Les valeurs des différents rejets dans l'atmosphère dus au procédé de clinkérisation avec des débits volumétriques de gaz d'exhaure de l'ordre de 4000 à 12000 m³/t de magnésie clinkérisée sont indiquées dans le tableau 3.9. Il convient de noter que seules certaines concentrations de rejets indiquées dans le tableau 3.9 correspondent aux conditions standard, étant donné que les conditions de référence n'ont pas été communiquées pour certaines données.

Élément constitutif des émissions	Unité	Concentration moyenne ¹⁾	Concentrations maximum ¹⁾
Poussières	mg/Nm ³	20 – 118	400
NO _x	mg/Nm ³	650 – 2500 ⁵⁾	5000 ⁵⁾
SO ₂	mg/Nm ³	10 ⁴⁾ – 3350 ³⁾	5000 ³⁾
CO	mg/Nm ³	33 – 1000	1323
CO ₂	g/Nm ³	165 – 350	360
1) Concentrations moyennes obtenues après une longue période d'observation, et mesurées une fois par an pendant une semaine 2) Valeurs maximales à court terme 3) Les valeurs les plus élevées correspondent aux combustibles riches en soufre et aux installations disposant du plus petit nombre de mesures/de techniques de réduction des rejets 4) Utilisation du gaz naturel 5) Les valeurs les plus élevées correspondent au procédé de fabrication de la magnésie surcuite à haute température			

Tableau 3.9 : Concentrations des éléments constitutifs des émissions liées à l'industrie de l'oxyde de magnésium dans l'UE des 27

[67, Autriche, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

Selon le type de combustible utilisé pour le procédé, jusqu'à 50% du dioxyde de soufre peuvent être dus aux combustibles (voir également la Section 3.4.5 et la figure 3.13 pour connaître la teneur en soufre des combustibles). En fabriquant la magnésie caustique dans un four rotatif, 40 à 50% du dioxyde de soufre émis par le combustible sont récupérés par le filtre à poussières. L'injection de MgO réactives dans le flux de gaz résiduaire permet de réduire les rejets de SO₂ à moins de 1500 mg/Nm³ pour une valeur initiale de SO₂ de 3000 mg/Nm³ [168, TWG CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008].

3.3.3.2 Pertes/déchets de traitement

Les pertes/les déchets de procédé dus à la fabrication de la magnésie sont différents types de poussières de carbonate de magnésium qui sont séparées dans des unités d'épuration des gaz de rejet, comme par exemple le précipitateur de poussières. Les types de poussières sont, par exemple, le carbonate de magnésium contenant différentes proportions de magnésie calcinée caustique et de magnésie clinkérisée. Les déchets de conditionnement (plastique, bois, métal, papier, etc.) proviennent de l'étape de conditionnement.

Certains types de poussières peuvent être recyclés et réutilisés au sein du procédé. La poussière collectée peut également être utilisée dans d'autres applications environnementales, comme par exemple le traitement des eaux usées industrielles, ou la collecte des métaux dans les décharges. Les techniques utilisées pour les poussières et les autres déchets au sein des décharges vont de la réutilisation dans des produits commercialisables au recyclage, en passant par l'élimination.

Les détergents utilisés pour le dépoussiérage subissent un procédé de sédimentation en plusieurs étapes afin de séparer les matières solides. Les solides obtenus au cours de ce procédé sont stockés sur un site intermédiaire afin d'être réutilisés ultérieurement dans le cadre du processus, alors que l'eau est réutilisée et remise en circulation dans le système.

Les boues issues du procédé de désulfuration des gaz résiduels par voie humide (méthodes de décantation et/ou de filtration ; une unité existe en Autriche) peuvent être réutilisées au sein du procédé ou dans d'autres secteurs.

3.3.3.3 Émissions dans l'eau

L'eau est utilisée à différentes étapes du procédé. L'eau destinée au lavage des matières premières (magnésite) et au procédé de séparation des milieux denses est réutilisée au sein du processus après la décantation et la clarification des boues. L'eau est également utilisée pour refroidir le produit dans la zone de refroidissement du four. Cependant, cette eau s'évapore en raison des températures élevées du procédé. L'eau est également utilisée pour certaines opérations effectuées avec les systèmes d'épuration des gaz d'exhaure.

Aucune eau usée n'est engendrée par les procédés de fabrication de la magnésie qui utilisent le procédé par voie sèche. En revanche, le procédé de désulfuration des gaz résiduels par voie humide (une unité existe en Autriche) produit des eaux usées. Ces eaux usées doivent être traitées à l'aide de méthodes de décantation et/ou de filtration afin de séparer les boues de sulfite/de sulfate. Ces boues peuvent être réutilisées au sein du procédé ou dans d'autres secteurs.

3.3.3.4 Bruit

L'extraction et le traitement des matières premières et la fabrication de la magnésie engendrent inévitablement des opérations bruyantes. Le fonctionnement des machines lourdes et des ventilateurs de grande taille peut entraîner des émissions de bruit et/ou des vibrations.

Les barrières acoustiques naturelles, comme les immeubles de bureaux, les murs, les arbres ou les buissons peuvent être utilisées afin de réduire les émissions de bruit. Les usines doivent respecter les normes de réduction des émissions de bruit, conformément à la législation en vigueur dans le pays.

3.3.4 Surveillance

Afin de contrôler les procédés liés à l'utilisation des fours, des mesures continues sont recommandées pour les paramètres suivants :

- température,
- pression,
- teneur en O₂,
- teneur en CO.

La réalisation de mesures en continu peut également convenir pour les paramètres suivants :

- teneur en NO_x,
- SO₂,
- poussière.

Afin de déterminer et de quantifier les émissions avec précision, des mesures périodiques de paramètres suivants peuvent être effectuées :

- teneur en NO_x,
- poussière,
- SO₂,
- (CO₂ – généralement calculé).

Pour plus d'informations sur le contrôle, se reporter au document de référence sur les principes généraux de suivi [151, Commission européenne, 2003].

3.4 Techniques à prendre en compte pour la détermination des MTD

La présente Section décrit les mesures/les techniques généralement réputées capables d'assurer un degré élevé de protection de l'environnement dans les industries concernées par le présent document. Les systèmes de gestion, les mesures/les techniques intégrées aux procédés et les mesures/les techniques curatives sont inclus, mais ces trois éléments se chevauchent lorsqu'il s'agit de rechercher les meilleurs résultats possibles.

Des procédures de prévention, de contrôle, de minimisation et de recyclage sont considérées, ainsi que la réutilisation des matériaux et de l'énergie.

Les mesures/les techniques peuvent être présentées seules ou en combinaison afin d'atteindre les objectifs de la Directive IPPC. L'Annexe IV de cette Directive énumère un certain nombre de considérations générales à prendre en compte lors de la détermination des MTD, et les mesures/les techniques de la présente Section abordent une ou plusieurs d'entre elles. Dans la mesure du possible, une structure standard est utilisée pour décrire chaque mesure/technique, de façon à pouvoir comparer ces mesures/ces techniques et une évaluation des objectifs par rapport à la définition des MTD donnée dans la Directive IPPC.

Le contenu de la présente Section n'est en aucun cas une liste exhaustive de mesures/de techniques, et d'autres peuvent exister ou peuvent être développées dans le cadre de l'IPPC et des MTD.

La structure standard utilisée pour décrire chaque mesure/technique est indiquée dans le tableau 3.10. Étant donné que les limites entre les éléments mentionnés dans ce tableau peuvent se chevaucher dans une certaine mesure, la structure reste flexible, afin de refléter chaque cas particulier.

Type d'informations considérées	Type d'informations incluses
Description	Description technique de la mesure/de la technique (schémas compris si nécessaire)
Avantages environnementaux obtenus	Principaux avantages pour l'environnement (économies d'énergie, d'eau, de matières premières, augmentation du rendement, efficacité énergétique, etc.) offerts par la mesure/la technique
Effets croisés	Principaux effets secondaires sur l'environnement et principaux inconvénients pour les autres milieux provoqués par l'utilisation de la mesure/de la technique. Détails des effets sur l'environnement engendrés par la mesure/la technique en comparaison avec les autres
Données d'exploitation	Données relatives aux niveaux de consommation et d'émission des usines utilisant la mesure/la technique (y compris les conditions de référence et les méthodes de contrôle utilisées). Autres informations pertinentes concernant l'application, le maintien et le contrôle de la mesure/de la technique
Applicabilité	Indication du type d'usines dans lesquelles la mesure/la technique peut être appliquée, en considérant, par exemple, l'âge de l'usine (nouvelle ou déjà existante), la taille de l'usine (grande ou petite), les mesures/les techniques déjà utilisées et le type ou la qualité du produit
Aspects économiques	Informations relatives aux coûts (coûts d'investissement et coûts d'exploitation) et aux éventuelles économies (réduction de la consommation de matières premières ou d'énergie, du nombre de déchets) ou aux éventuels bénéfices, y compris les détails sur la manière dont ces coûts/ces économies ou ces bénéfices ont été calculés/estimés
Motivation pour la mise en œuvre	Conditions ou exigences locales entraînant ou stimulant la mise en application. Informations relatives aux motifs d'application autres que les raisons environnementales (augmentation de la productivité, sécurité)
Exemples d'installations	Référence à une/des usine(s) appliquant la mesure/la technique, et pour laquelle/lesquelles des informations ont été collectées et utilisées pour rédiger la Section
Documentation de référence	Documentation ou toute autre référence (livres, rapports, études, sites Web)

	utilisée pour rédiger la Section et contenant davantage d'informations sur la mesure/la technique
--	---

Tableau 3.10 : Ventilation des informations relatives à chaque mesure ou technique décrite dans cette Section

Les coûts des mesures/des techniques de réduction doivent être évalués selon le type de four utilisé, la taille des installations, l'efficacité des mesures/des techniques et les circonstances de l'application en question.

3.4.1 Considérations générales concernant la consommation de matières premières

Le recyclage et/ou la réutilisation des matières granulées (application dans les fours verticaux et en combinaison avec les fours rotatifs) et la réduction et le recyclage des pertes/des déchets de procédé permettent de réduire la consommation totale de matières premières.

3.4.2 Considérations générales concernant l'eau

Les détergents utilisés pour le dépoussiérage subissent un procédé de sédimentation en plusieurs étapes afin de séparer les matières solides. L'eau est réutilisée et remise en circulation dans le circuit d'eau propre.

3.4.3 Réduction de la consommation d'énergie (efficacité énergétique)

Description

L'amélioration de la conception des fours, l'optimisation du procédé et l'augmentation du degré de récupération et de réutilisation de l'excédent de chaleur des fours et des refroidisseurs permettent de réduire la consommation d'énergie et de combustibles. De plus, l'utilisation d'oxygène (air de combustion enrichi en oxygène) pour le procédé de cuisson peut augmenter l'efficacité du procédé de cuisson, et améliorer de manière significative le rendement du four. Cela est associé à une diminution des besoins en air, et, ainsi, à une diminution de la charge en N_2 dans le four. Les besoins en énergie peuvent être réduits de façon durable grâce à ce moyen.

La chaleur des gaz d'exhaure est récupérée par le chauffage préliminaire de la magnésite afin de minimiser l'utilisation de combustible. Les pertes de chaleur du four peuvent être utilisées pour sécher les combustibles, les matières premières et certains matériaux de conditionnement.

L'utilisation de l'électricité est minimisée en ayant recours à des équipements électriques à forte efficacité énergétique.

Avantages environnementaux obtenus

Réduction de la consommation d'énergie et augmentation de l'efficacité énergétique. Les rejets de CO_2 par les combustibles sont également réduits lorsque le procédé devient plus efficace.

Effets croisés

L'utilisation d'une température de flamme plus élevée pour le procédé de cuisson peut provoquer une augmentation des rejets de NO_x .

Données d'exploitation

Une consommation d'énergie spécifique de l'ordre de 6 à 12 GJ/t a été rapportée. L'enthalpie de réaction théorique de ce procédé hautement endotherme est de 2803 MJ/kg (cf. Section 3.3.2).

Applicabilité

La réduction de la consommation d'énergie est, en principe, applicable à l'industrie de la magnésie.

Aspects économiques

Les coûts en énergie peuvent représenter 35 à 40 % des coûts totaux.

La réduction de la consommation d'énergie peut entraîner une diminution des coûts totaux et des rejets de CO₂.

En cas d'utilisation d'oxygène, la totalité des coûts en énergie et le bilan énergétique doivent être pris en considération.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Réduction des besoins et des coûts en énergie.

Réduction des rejets de CO₂.

Réduction des coûts.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines basées en Autriche, en Espagne et dans l'UE des 27.

Pour d'autres informations utiles à ce sujet, se reporter au document de référence « Techniques sur l'efficacité énergétique » (ENE).

[67, Autriche, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.4 Optimisation de la conduite

Description

Un fonctionnement stable et régulier du four, proche de l'air stoechiométrique nécessaire, est bénéfique pour toutes les émissions des fours, tout comme pour l'utilisation de l'énergie. Généralement, en pratique, l'excédent d'oxygène est d'environ 1 à 3% afin d'obtenir la qualité requise pour les produits, et une combustion optimale. Ce mode de fonctionnement est accessible grâce à une optimisation de la conduite. Le procédé de cuisson est optimisé afin de diminuer la consommation de chaleur et d'améliorer/de maintenir la qualité de la magnésie clinkérisée, de la magnésie calcinée caustique ou de la magnésie fondue, comme à l'aide d'une consommation d'énergie spécifique et d'émissions spécifiques plus faibles. Généralement, les fours sont équipés d'un système de contrôle de procédé destiné à contrôler la totalité du procédé à partir d'un point central. Certains paramètres du procédé sont enregistrés en continu, comme la consommation d'énergie, la température et parfois les NO_x. La diminution des émissions, comme le CO, le NO_x, le SO₂ et la poussière, peut être un effet secondaire de cette optimisation.

Étant donné que plusieurs produits différents sont généralement fabriqués dans le même four, les caractéristiques de fonctionnement du four doivent être en adéquation avec ces produits. Les conditions de fonctionnement d'un four peuvent varier considérablement selon les charges et la qualité produite.

Avantages environnementaux obtenus

Une diminution des émissions, comme le CO, le NO_x, le SO₂ et la poussière, est possible.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

Aucune donnée soumise.

Applicabilité

L'optimisation de la conduite s'applique à tous les types de fours utilisés dans l'industrie de la magnésie. Cependant, un système de contrôle de procédé très sophistiqué peut être nécessaire.

Aspects économiques

Un système de contrôle de procédé complet pour une usine de clinkérisation ou de calcination représente un investissement d'environ 1 million d'euros.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines basées en Autriche, en Espagne et dans l'UE des 27.

[109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.4.5 Choix du combustible

Description et données d'exploitation

La fabrication de la magnésie à l'aide du procédé par voie sèche est une industrie à forte consommation d'énergie. Les principaux combustibles utilisés dans l'UE sont le gaz naturel, le coke de pétrole et le fioul lourd. Cependant, le charbon (anthracite et lignite) peut également être utilisé dans le procédé de cuisson.

Une sélection et un contrôle rigoureux des matières alimentant le four sont nécessaires et peuvent influencer et réduire les émissions, en particulier le SO₂. Ainsi, les combustibles ayant de faibles teneurs en soufre doivent être choisis si leur prix est raisonnable et si ces combustibles sont disponibles.

Avantages environnementaux obtenus

Réduction des rejets de SO₂.

Effets croisés

L'utilisation de coke de pétrole et de charbon pour la cuisson peut entraîner une augmentation des rejets de SO₂ en comparaison avec le gaz naturel et/ou le fioul (cf. figure 3.13). Le gaz naturel peut générer des rejets de NO_x plus importants à cause des températures de flamme plus élevées ; cependant, les rejets de CO₂ sont plus faibles en raison du rapport C : O moins élevé pour le gaz naturel, en comparaison avec le coke ou le charbon.

Coûts d'exploitation

35 à 40 % des coûts de production sont liés aux coûts en énergie.

Applicabilité

Les combustibles peuvent être principalement utilisés dans les fours destinés à la fabrication de la magnésie. Cependant, plusieurs combustibles, comme le gaz naturel par exemple, ne sont pas disponibles dans toutes les régions, et ces mesures/ces techniques ne peuvent donc pas être appliquées dans tous les cas. Le four doit être équipé de la technique de combustion propre au combustible, ou de lances. Cependant, les combustibles solides, comme le coke de pétrole, ne s'appliquent pas aux fours verticaux munis d'une plaque ou d'une grille rotative, comme cela est décrit aux Sections 3.2.3.2.2.1 et 3.2.3.2.2.2.

En 2007, les déchets n'étaient pas utilisés comme combustibles, en raison du risque de présence d'impuretés dans le produit. Le produit doit être pur et propre, sans aucune impureté. Cependant, à l'avenir, et suite aux nouvelles techniques de co-incinération des déchets et en raison de certains produits de magnésie, l'industrie de la magnésie prend en considération l'utilisation de différents types de déchets, comme par exemple le plastique ou le bois. Pour les aspects d'ordre général et ceux liés au contrôle qualité pour l'utilisation des déchets dans les industries de fabrication du ciment et de la chaux, se reporter respectivement aux Sections 1.2.4 et 2.2.5 du présent document.

Aspects économiques

La comparaison entre différentes sources d'énergie en fonction des coûts spécifiques en EUR/GJ et de la teneur en soufre de ces combustibles est illustrée sur la figure 3.13. Le coke de pétrole contient la plus grande quantité de soufre, suivi par le fioul lourd, le charbon et l'anthracite.

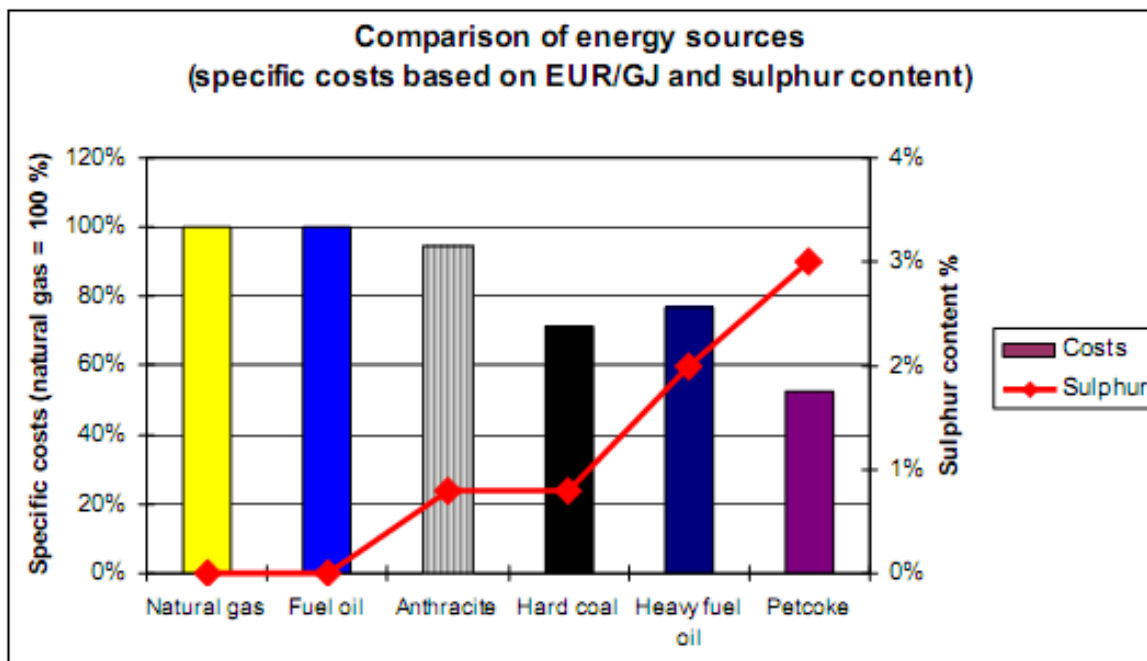


Figure 3.13 : Comparaison des combustibles en fonction des coûts spécifiques et de la teneur en soufre

[130, Drnek/Maier, 2007], [168, GTT CLM, 2007]

Il existe une bonne relation entre le rendement et le prix du coke de pétrole (cf. figure 3.13). Cependant, les coûts en énergie ont atteint un niveau élevé de l'ordre de 35 à 40 %, et le facteur économique doit être pris en considération.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Réduction du SO₂.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines basées en Autriche, en Espagne et dans l'UE des 27.

[109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.6 Émissions de poussières (matières particulaires)

3.4.6.1 Mesures/techniques pour les opérations génératrices de poussières

Description et avantages environnementaux obtenus

Les émissions de poussières diffuses sont principalement dues au stockage et à la manipulation des matières premières et des combustibles, et aux véhicules utilisés sur le site. Les rejets de particules dus au conditionnement et à l'expédition du produit peuvent également être significatifs. Le recours à des aménagements simples et linéaires et à des mesures/des techniques d'organisation est recommandé afin de réduire et de minimiser les sources éventuelles de poussières diffuses.

Plusieurs mesures/techniques différentes sont présentées ici, et peuvent être appliquées individuellement ou en combinaison (cf. Section 3.3.3.1) :

- de bonnes règles de propreté des bâtiments et des routes, et un entretien complet et approprié de l'installation ;
- arrosage des piles de matières premières ;
- enfermement/encapsulation des opérations génératrices de poussières, comme le broyage et le tamisage ;
- recouvrement des transporteurs et des élévateurs, qui sont construits comme des systèmes, en cas de risque d'émissions de poussières par les matériaux générateurs de poussières ;
- silos de stockage d'une capacité adéquate et équipés de filtres de façon à gérer l'air chargé de poussière qui est déplacé pendant les opérations de remplissage ;
- procédé de circulation pour les systèmes de transport pneumatiques ;
- réduction des fuites d'air et des points de déversement ;
- utilisation de dispositifs automatiques et de systèmes de commande ;
- bon fonctionnement continu de l'installation.

Effets croisés

Augmentation de la consommation d'énergie liée à l'utilisation des filtres. Des déchets supplémentaires peuvent être engendrés par les opérations de maintenance. Une réduction du bruit est également possible en enfermant les machines.

Données d'exploitation

Aucune donnée soumise.

Applicabilité

Ces mesures/techniques peuvent en principe être appliquées à l'industrie de la magnésie.

Aspects économiques

En fonction de la mesure/technique spécifique.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exigences de santé et sécurité pour le lieu de travail.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines basées en Autriche, en Espagne et dans l'UE des 27.

[109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.4.6.2 Réduction des émissions de poussières canalisées

Les émissions de poussières sont dues au procédé de cuisson, mais également au stockage et à la manipulation des matières premières et des combustibles (transporteurs et élévateurs, par exemple), et aux procédés de broyage.

Les dispositifs de dépoussiérage suivants peuvent être utilisés seuls ou en combinaison :

- filtres électrostatiques (ESP)
- cyclones
- séparateurs de poussières par voie humide
- filtres à manches.

Dans les unités de tamisage et de broyage, des filtres à manches sont utilisés pour collecter le produit et dépoussiérer le courant d'air.

Les fours utilisés dans l'industrie de la magnésie sont généralement équipés de mesures/de techniques de réduction des poussières qui prennent en compte les températures relativement élevées des gaz d'exhaure liées à la cuisson. Parmi ces fours, plusieurs sont équipés de filtres électrostatiques et/ou d'un cyclone et d'un ESP, et/ou d'un cyclone et d'un épurateur en voie humide, en tenant compte des températures relativement élevées des gaz d'exhaure. Des filtres à manches sont également utilisés, et permettent de réduire très efficacement les émissions de poussières. Cependant, en ce qui concerne l'utilisation des filtres à manches, la température élevée des gaz résiduels est très importante et peut être critique car, selon le matériau utilisé pour le filtre, celui-ci peut s'enflammer à des températures plus élevées.

3.4.6.2.1 Précipitateurs électrostatiques (ESP)

Description et avantages environnementaux obtenus

Des filtres électrostatiques (ESP) peuvent être utilisés pour l'extraction des poussières à des températures de gaz d'exhaure dépassant le point de rosée et atteignant 370 à 400 °C. Les pics de CO doivent être évités en raison des risques d'explosion. Le CO est mesuré en continu pour des raisons liées au contrôle des procédés et à la sécurité. La fréquence des pics de CO peut être réduite en utilisant des systèmes de contrôle de procédés modernes munis de dispositifs de mesure et de régulation à réaction très rapide. Pour plus d'informations sur le contrôle des pics de CO, se reporter au chapitre « Ciment » du présent document, Section 1.4.5.3 et Section 4.2.6.

Pour plus d'informations techniques et pour davantage d'explications sur le fonctionnement des ESP, se reporter au chapitre « Ciment », Section 1.4.4.3.1, et au chapitre « Chaux », Section 2.4.5.3.1. Cependant, les données d'exploitation relatives aux ESP utilisés dans l'industrie de la magnésie sont indiquées ci-dessous.

Effets croisés

Risques d'explosion, plus particulièrement en cas d'utilisation d'ESP par voie sèche.

Augmentation de la consommation d'énergie due au fonctionnement de l'ESP (en comparaison avec les cyclones, par exemple).

Des déchets supplémentaires peuvent être engendrés par les opérations de maintenance.

Données d'exploitation

Avec une température d'entrée des gaz résiduels dans l'ESP d'environ 400 °C, des émissions de poussières de l'ordre de 75 mg/Nm³ ont été observées, et mesurées en discontinu comme une valeur moyenne sur une semaine dans l'année. Cependant, les ESP peuvent offrir des niveaux d'émission de poussières inférieurs à 10 mg/Nm³, selon le mode de fonctionnement.

Applicabilité

Les ESP sont principalement utilisés dans les fours rotatifs.

Ils peuvent être utilisés avec des températures de gaz d'exhaure dépassant le point de rosée et atteignant 370 à 400 °C.

Aspects économiques

Les coûts d'exploitation relativement élevés doivent être pris en considération lors de l'utilisation d'un filtre électrostatique.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences liées au procédé.

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Deux usines dans l'UE des 27.

[67, Autriche, 2006], [109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.6.2.2 Séparateurs centrifuges/cyclones

Description et avantages environnementaux obtenus

Les cyclones utilisent la force centrifuge pour séparer les matières particulaires du flux de gaz. Ils sont solides et offrent une plage de températures de fonctionnement étendue tout en nécessitant peu d'énergie [86, EURITS, 2006].

Dans un séparateur centrifuge, les particules de poussière à éliminer d'un flux de gaz de rejet sont projetées contre la paroi extérieure de l'unité par l'action centrifuge, puis évacuées par une ouverture située au bas de l'unité. Les forces centrifuges peuvent être développées en dirigeant le flux gazeux en un mouvement de spirale descendant au sein d'un réservoir cylindrique (séparateurs cycloniques), ou à l'aide d'une turbine rotative placée dans l'unité (séparateurs centrifuges mécaniques).

Effets croisés

Les séparateurs centrifuges/les cyclones représentent une source de bruit significative lorsqu'ils fonctionnent. Des déchets supplémentaires peuvent être engendrés par les opérations de maintenance.

Données d'exploitation

Dans d'autres secteurs, comme dans l'industrie de la chaux, les séparateurs centrifuges/les cyclones sont utilisés comme des pré-séparateurs/des séparateurs de produits. En règle générale, ils offrent des valeurs d'émission de poussières inférieures à 150 mg/Nm³ (cf. Section 2.4.5.3.4). Dans l'industrie du ciment, les cyclones sont combinés avec un échangeur d'air/un échangeur thermique afin de réduire la température, et avec un filtre à manches afin d'éliminer les poussières, par exemple, des gaz d'exhaure destinés au refroidissement. Un cyclone peut réduire la concentration de poussières de 70 %.

En combinaison avec un échangeur d'air/un échangeur thermique et un filtre à manches, une efficacité d'épuration allant jusqu'à 99,99 % peut être obtenue, ainsi que des valeurs d'émission faibles, de 5 à 7 mg/Nm³. Ces données ont été recueillies auprès d'une cimenterie d'Afrique du Sud (cf. chapitre « Ciment », Section 1.4.4.3.2).

Les séparateurs centrifuges sont plus efficaces avec des concentrations en polluants plus élevées, à condition que le dispositif ne se bloque pas.

Applicabilité

Les particules qui possèdent une faible granulométrie ne sont pas bien retenues par les séparateurs centrifuges/les cyclones. En raison du degré de séparation limité selon le système, les cyclones sont principalement utilisés comme des séparateurs préliminaires pour les poussières grossières et les gaz d'exhaure.

Aspects économiques

Les séparateurs centrifuges/les cyclones sont relativement peu coûteux, et simples à utiliser.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exigences liées au procédé.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines basées en Autriche, en Espagne et dans l'UE des 27.

[86, EURITS, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.6.2.3 Séparateurs de poussières en voie humide

Description et avantages environnementaux obtenus

Les séparateurs de poussières par voie humide permettent d'éliminer les poussières des flux de gaz de rejet. Ces séparateurs (également appelés « épurateurs en voie humide ») peuvent être divisés en différents types selon leur conception et leur principe de fonctionnement, comme le Venturi. Ce type de séparateur de poussières par voie humide peut être appliqué dans l'industrie de la magnésie, y compris lorsque le gaz est dirigé dans la section la plus étroite du tube Venturi, appelée « col Venturi », et des vitesses de gaz de l'ordre de 60 à 120 m/s peuvent être obtenues. Les détergents fournis au col du tube Venturi sont diffusés sous la forme d'une brume de gouttelettes très fines, et sont étroitement mélangés avec le gaz. Les particules séparées avec les gouttelettes d'eau deviennent plus lourdes et peuvent être facilement filtrées à l'aide d'un séparateur de gouttes installé dans le séparateur de poussières par voie humide Venturi.

Effets croisés

Avec la technique de séparation par voie humide, les polluants passent de l'air à l'eau, si bien qu'une seconde installation destinée à épurer le produit de rejet humide (suspension) est nécessaire), et, par conséquent, une augmentation de la consommation d'énergie est possible.

Données d'exploitation

Lorsqu'ils sont utilisés efficacement, les épurateurs en voie humide modernes à cascades multiples peuvent offrir des concentrations de gaz propres de l'ordre de 10 à 20 mg/Nm³ (cf. Section 2.4.5.3.3 du chapitre « Chaux »).

Applicabilité

Ce type de séparateur de poussières par voie humide Venturi élimine les poussières, les substances volatiles, le HCl et le SO₂ du flux de gaz d'exhaure. Cette technique ne provoque ni inconvénients, ni effets secondaires.

Aspects économiques

En ce qui concerne les coûts d'exploitation, la clarification du liquide d'épuration et des eaux usées de procédé doit être prise en considération.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences liées au procédé.

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Deux usines dans l'UE des 27.

[109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007]

3.4.6.2.4 Filtres à manches**Description et avantages environnementaux obtenus**

Dans un filtre à manches, les gaz de rejet passent par un manche de filtre et les particules de poussières se déposent sur la surface du filtre sous la forme d'un gâteau de filtre. Les filtres à manches retiennent une grande quantité de particules, généralement entre 98 et 99%, selon la granulométrie. Cette technique est la plus efficace pour retenir les particules, en comparaison avec les autres mesures/techniques de réduction de la quantité de poussières utilisées dans l'industrie de la magnésie. Cependant, en raison des températures élevées des gaz d'exhaure des fours, des matériaux de filtres spéciaux capables de résister aux hautes températures doivent être utilisés.

Effets croisés

Les filtres à manches, et plus particulièrement ceux qui régénèrent les impulsions de pression, peuvent provoquer des émissions de bruit et peuvent également faire augmenter la consommation d'électricité en raison de leur forte chute de pression. Des déchets supplémentaires peuvent être engendrés par les opérations de maintenance.

Données d'exploitation

Les filtres à manches se présentent sous la forme de différents types de filtres en tissu, et certains d'entre eux peuvent fonctionner et résister à des températures relativement élevées. Pour plus d'informations sur l'application technique des différents types de manches, se reporter à la Section 1.4.4.3.2 (chapitre « Ciment ») du présent document.

Avec certaines opérations génératrices de poussières autres que celles liées au procédé de cuisson, des plages d'émission de poussières inférieures à 5 à 10 mg/Nm³ peuvent être obtenues dans d'autres secteurs en utilisant des filtres à manches. Lorsque les filtres à manches sont correctement conçus, utilisés et entretenus (dépoussiérage continu des manches), des émissions de poussières inférieures à 10 mg/Nm³ sont obtenues dans l'industrie de la chaux (cf. Section 2.4.5.3.2). L'efficacité de séparation peut dépasser 99,9 %, et, par conséquent, des émissions inférieures à 5 mg/Nm³ peuvent être obtenues (gaz sec, 273 K, 10 % de O₂) dans l'industrie du ciment (cf. Section 1.4.4.3.2).

De plus, dans l'industrie de l'oxyde de magnésium, des niveaux d'émission de poussières inférieurs à 20 mg/Nm³ ont été signalés pour les procédés de cuisson en utilisant des filtres à manches [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008].

Applicabilité

Les filtres à manches destinés à éliminer les poussières des gaz de rejet peuvent, en principe, s'appliquer à toutes les unités dans le procédé de fabrication de l'oxyde de magnésium, et plus particulièrement aux opérations génératrices de poussières, comme le tamisage et le broyage. Ils peuvent être utilisés avec des températures de gaz d'exhaure dépassant le point de rosée et atteignant 280 °C.

En raison des températures élevées (de l'ordre de 250 à 400 °C), de la nature corrosive et du volume important des gaz d'exhaure issus du procédé de cuisson pour la fabrication de la magnésie calcinée caustique et de la magnésie clinkérisée/surcuite, des filtres à manches spéciaux en matériau résistant à hautes températures doivent être utilisés. Cependant, si l'on se réfère à l'industrie de la magnésie qui fabrique de la magnésie surcuite, aucun équipement adéquat, comme un matériau filtrant par exemple, n'existe pour les températures de gaz d'exhaure d'environ 400 °C pour la fabrication de la magnésie.

Pour la fabrication de la magnésie surcuite, des matériaux filtrants résistant à des températures maximales de 250 °C sont utilisés, comme le PTFE (Teflon). Ce matériau présente une bonne résistance aux acides ou aux alcalis, et a permis de résoudre un grand nombre de problèmes de corrosion [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008].

Aspects économiques

L'investissement pour les matériaux filtrants résistant aux températures élevées des gaz résiduels est relativement important par rapport aux autres matériaux filtrants.

Les coûts d'exploitation sont plus élevés pour les filtres à manches que pour les filtres électrostatiques, en raison de la chute de pression plus importante des matériaux filtrants.

Pour plus d'informations sur l'application technique et les coûts des différents types de manches, se reporter à la Section 1.4.4.3.2 (chapitre « Ciment ») du présent document.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Trois usines dans l'UE des 27.

[109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.7 Composés gazeux

3.4.7.1 Réduction des émissions de NO_x

Description

La température nécessaire au procédé de cuisson dans l'industrie de la magnésie est le facteur qui a le plus d'influence sur les émissions de NO_x. En règle générale, cela est directement lié à la qualité de la magnésie clinkérisée/surcuite fabriquée. Cette température de cuisson est souvent très élevée par rapport aux autres applications de la même unité. Cependant, les températures de cuisson varient en fonction du produit. En raison des caractéristiques du produit à fabriquer et du lien direct entre le produit et la température de cuisson, cette température de cuisson ne peut être réduite.

Les NO_x sont formés par une seule source :

- les NO_x thermiques sont dus à la réaction à des températures élevées entre le N₂ et le O₂ de l'air de combustion.

Les NO_x thermiques se forment à des températures supérieures à 1 000 °C, c'est-à-dire dans la zone de cuisson du four, dans laquelle les températures sont suffisamment hautes. La quantité de NO_x thermiques produite augmente avec la température et la teneur en oxygène dans la zone de cuisson.

Différentes mesures/techniques peuvent être utilisées pour réduire les émissions de NO_x, comme des techniques primaires ou secondaires, ou une combinaison des deux. Les mesures/les techniques primaires réduisent la formation des NO_x, tandis que les mesures/les techniques secondaires détruisent les oxydes d'azote et les réduisent en N₂.

Les mesures/les techniques primaires sont intégrées aux procédés et impliquent en particulier :

- une optimisation de la conduite ;
- une technique de cuisson améliorée ;
- une combustion étagée/une séparation de l'air ;
- une conception des brûleurs.

En 2007, aucune combustion étagée n'était utilisée dans l'industrie de l'oxyde de magnésium. Les mesures/les techniques secondaires de réduction des NO_x impliquent ce qui suit :

- une réduction sélective non catalytique (SNCR) ;
- une réduction catalytique sélective (SCR).

En 2007, aucune mesure/technique secondaire n'était utilisée pour la réduction des NO_x dans l'industrie de l'oxyde de magnésium.

Avantages environnementaux obtenus

Réduction des émissions de NO_x.

Effets croisés

Come cela est indiqué dans la Section 1.4.5.1.7 et dans la Section 2.4.6.1.4 (chapitre « Ciment »), si la technique SNCR est utilisée, l'échappée d'ammoniac doit également être considérée. La relation entre la température, l'échappée de NH₃ et la réduction des NO_x est illustrée sur la figure 2.50 (cf. Section 2.4.6.1.4 du chapitre « Chaux ») [46, Allemagne, 2006]. Cependant, en 2008, aucune technique SNCR n'était utilisée dans l'industrie de la magnésie (voir « Applicabilité »).

Données d'exploitation

Cf. Section 3.3.3.1 et le tableau 3.9. En utilisant uniquement des mesures/des techniques primaires de réduction des NO_x, des émissions de NO_x de l'ordre de 650 à 2500 mg/Nm³ ont été signalées en 2006. Cependant, la valeur la plus élevée est associée au procédé de fabrication de la magnésie surcuite à haute température.

Applicabilité

Mesures/techniques primaires

Les mesures/les techniques primaires sont, en principe, applicables à la plupart des types de fours utilisés pour la fabrication de la magnésie.

Cependant, certaines mesures/techniques primaires utilisées dans d'autres industries ne peuvent s'appliquer à l'industrie de la magnésie, comme les brûleurs bas- NO_x et le refroidissement de flamme. Les brûleurs bas- NO_x ne sont pas/ne peuvent pas être utilisés en raison de la température de cuisson élevée nécessaire à la fabrication de la magnésie surcuite. Ce type de brûleur résiste à des températures maximales de 1 600 °C, alors que la température de cuisson pour la fabrication de la magnésie surcuite peut atteindre 2 200 °C. Le refroidissement de flamme n'est pas/ne peut pas être utilisé non plus en raison de ces températures élevées.

Pour permettre l'application dans l'industrie de la magnésie, une combustion étagée/une séparation de l'air doit/doivent être développée(s). En 2007, aucune combustion étagée n'était utilisée dans l'industrie de l'oxyde de magnésium.

Mesures/techniques secondaires

En 2008, dans l'UE des 27, la *réduction sélective non catalytique (SNCR)* n'était pas utilisée pour la réduction des NO_x dans l'industrie de la magnésie, car la technique SNCR nécessite des températures de l'ordre de 800 à 1 000 °C, alors que le procédé de fabrication de la magnésie surcuite est un procédé endotherme qui n'atteint pas ces températures. Pendant le procédé, lorsque la matière est désacidifiée, la température se situe entre 500 et 800 °C. Aucune température stable supérieure à 800 °C ne peut être atteinte sans utiliser des quantités importantes d'énergie pour pouvoir parvenir à la température de fonctionnement de la technique SNCR. En outre, une augmentation significative des coûts en énergie est à prévoir.

Suite à l'étude menée à la fin des années 90, il est apparu que la *réduction catalytique sélective (SCR)* des NO_x dans l'industrie de la magnésie surcuite était incertaine tant sur le plan technique que sur le plan économique. Cela était principalement dû à l'incertitude quant à la durée de vie des catalyseurs et à la nature extrêmement polluante des gaz de rejet [108, Commission européenne, 2006].

La technique SCR fonctionne à des températures de l'ordre de 300 à 400 °C. Le NO et le NO_2 sont réduits en N_2 à l'aide de NH_3 et d'un catalyseur. Le procédé nécessite un bon mélange du gaz résiduaire et de l'agent, une température d'injection optimisée et un temps de séjour suffisant aux températures optimales.

En 2008, dans l'UE des 27, la technique SCR n'était pas utilisée pour la réduction des NO_x dans l'industrie de la magnésie. Les catalyseurs sont très sensibles à la magnésie. En raison de la concentration élevée en poussières, les gaz d'exhaure doivent être dépoussiérés, comme par exemple à l'aide de filtres à manches, avant de passer dans les catalyseurs du SCR. Cependant, en raison de la température élevée nécessaire, les gaz d'exhaure doivent être refroidis à 250 °C maximum avant d'être dépoussiérés par des filtres à manches spéciaux. Pour utiliser la technique SCR, les gaz d'exhaure doivent ensuite être réchauffés à une température de l'ordre de 300 à 400 °C, à laquelle fonctionne la technique SCR. Cela nécessite une énergie supplémentaire et peut engendrer d'autres émissions, comme du CO_2 .

Aspects économiques

Les procédés catalytiques impliquent généralement des investissements importants.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines de fabrication de la magnésie situées dans l'UE des 27 et utilisant des mesures/des techniques primaires pour réduire les émissions de NO_x. [46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006], [85, CEMBUREAU, 2006], [108, Commission européenne, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.7.2 Réduction des émissions de CO

Description et avantages environnementaux obtenus

Le choix, si possible, de matières premières ayant une faible teneur en matières organiques réduit également les émissions de CO. La surveillance continue de la température de cuisson et l'ajout contrôlé de combustible peuvent également influencer les émissions de CO, comme par exemple :

- en utilisant des dispositifs de dosage et des vannes d'alimentation rotatives de précision pour le coke de pétrole ; et/ou
- en utilisant des débitmètres et des valves de précision pour la régulation de l'alimentation en fioul lourd ou en gaz du brûleur du four.

Une combustion complète et de qualité est essentielle pour réduire les émissions de CO. L'alimentation en air par le refroidisseur, l'air primaire et le tirage du ventilateur de la cheminée peuvent être régulés de façon à maintenir un niveau d'oxygène de l'ordre de 1 (clinkérisation) à 1,5% (caustique) pendant la combustion. Une analyse périodique des gaz résiduels permet de détecter les concentrations élevées en CO (150 mg/Nm³), tandis qu'une modification de la charge en air et en combustible peut les réduire.

Les émissions de CO peuvent également être réduites en changeant la profondeur du brûleur [108, Commission européenne, 2006]. Les émissions de CO sont mesurées afin d'optimiser le procédé (optimisation de procédé) et de vérifier la combustion (combustion complète) des combustibles.

Dans certains cas et dans certaines circonstances, la mesure/la technique de gestion des pics de CO qui a été développée pour les fours à ciment équipés d'ESP peut également s'appliquer à l'industrie de la magnésie. Pour plus d'informations sur le contrôle des pics de CO, se reporter au chapitre « Ciment » du présent document, Section 1.4.5.3 et Section 4.2.6.

Effets croisés

Aucun problème.

Données d'exploitation

Des émissions de CO de l'ordre de 33 à 1000 mg/Nm³ ont été signalées.

La quantité totale de CO₂ par tonne de produit de MgO correspond à la somme du CO₂ de procédé et du CO₂ lié au combustible. La proportion de CO₂ qui provient du combustible est, selon le produit, de l'ordre de 0,35 à 0,59 tCO₂/tMgO pour le gaz, et d'environ 0,8 à 13 tCO₂/tMgO pour le « mélange d'énergies primaires provenant des pays de l'OCDE ». La proportion de CO₂ qui provient du procédé est de 1 tCO₂/tMgO (calcination de la magnésite en oxyde de magnésium).

Applicabilité

Cette mesure/technique est, en principe, applicable à l'industrie de la magnésie.

Aspects économiques

Aucune donnée soumise.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines de fabrication de la magnésie situées dans l'UE des 27.

[46, Allemagne, 2006], [54, EuLA, 2006] [85, CEMBUREAU, 2006], [108, Commission européenne, 2006], [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.7.3 Réduction des émissions de SO₂

Description

Les émissions de SO₂ dépendent principalement de la teneur en soufre du combustible. Les émissions de soufre provenant de la matière première (magnésite) dépendent de la teneur en soufre de la matière première. Elles sont en principe peu élevées en raison de la faible teneur en soufre de la plupart des matières premières. Cependant, dans certains cas, les émissions de SO₂ par les matières premières peuvent représenter 50 à 100 % de la totalité des émissions de SO₂.

Dans l'industrie de la magnésie, différentes mesures/techniques de désulfuration des gaz résiduels sont utilisées pour réduire le SO₂, comme :

- des séparateurs de poussières par voie humide (laveurs de gaz) ;
- des épurateurs voie sèche à pulvérisation ;
- un procédé d'injection de sorbant (injection d'adsorbants solides ou liquides dans le flux de gaz résiduel) ;
- un procédé de régénération.

Pour plus d'informations et d'explications techniques sur le fonctionnement des épurateurs en voie humide, se reporter au chapitre « Ciment », Section 1.4.5.2.2.

En cas d'utilisation du procédé d'injection de sorbant, un temps de séjour suffisant du gaz entre le point d'injection et l'installation d'épuration est très important afin d'obtenir une absorption très efficace. Des classes de MgO réactive sont déjà utilisées comme sorbants pour le SO₂, de manière efficace, dans d'autres secteurs, comme les centrales thermiques. Malgré sa moins bonne efficacité par rapport aux autres mesures/techniques, l'utilisation de cette mesure/technique dans l'industrie de la magnésie présente un double avantage : un investissement plus faible et une absence de contamination des poussières filtrées par d'autres substances. Les poussières filtrées et collectées peuvent ensuite être réutilisées et ajoutées aux produits afin de minimiser la génération de déchets.

Pour plus d'informations et d'explications techniques sur le procédé d'injection de sorbant (ajout d'adsorbant) dans les autres secteurs, se reporter au chapitre « Ciment » de la Section 1.4.5.2.1 et au chapitre « Chaux » de la Section 2.4.6.2 du présent document.

Avantages environnementaux obtenus

Réduction des émissions de SO₂. Les substances volatiles, les émissions de poussières et les émissions de HCl et de SO₂ peuvent être réduites en utilisant des séparateurs de poussières par voie humide munis d'un épurateur Venturi.

Effets croisés

Minimisation de la génération de déchets (réutilisation des poussières filtrées).

L'utilisation de séparateurs de poussières par voie humide (épurateurs en voie humide) peut engendrer des rejets dans l'eau.

Données d'exploitation

En utilisant des combustibles riches en soufre, comme du coke de pétrole, et un épurateur en voie humide pour réduire le SO₂, des émissions de SO₂ de l'ordre de 17,1 à 50 mg/Nm³ sont observées en certains points. En utilisant du gaz naturel, des niveaux d'émissions de SO₂ de 10 mg/Nm³ ont pu être atteints [109, RHI AG, 2006].

En fabriquant la magnésie caustique dans un four rotatif, environ 40 % du dioxyde de soufre émis par le combustible sont récupérés par le filtre à poussières.

Applicabilité

Ces mesures/techniques peuvent en principe être appliquées à l'industrie de la magnésie. Comme cela est décrit dans la Section 3.4.6.2.3, les séparateurs de poussières par voie humide munis d'un épurateur Venturi, éliminent également les substances volatiles et les poussières, en plus du HCl et du SO₂. Cette mesure/technique est réputée efficace dans d'autres secteurs.

Afin d'obtenir une absorption très efficace à l'aide du procédé d'injection de sorbant, un temps de séjour suffisant du gaz entre le point d'injection et l'installation d'épuration est très important.

Aspects économiques

Dans l'industrie de la MgO, le recours à un épurateur en voie humide peut impliquer un investissement d'environ 2 à 3 millions d'euros. Pour des exemples de coûts pour les mesures/les techniques de réduction du SO_x dans l'industrie du ciment, se reporter aux Sections 1.4.5.2 et 1.4.8.3 du présent document.

Selon la mesure/la technique utilisée, les procédés de désulfuration des gaz résiduels peuvent impliquer un investissement conséquent.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines basées en Autriche, en Espagne et dans l'UE des 27.

[109, RHI AG, 2006] [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

3.4.8 Considérations générales concernant les pertes/déchets de traitement

Les pertes de procédé, comme les différents types de poussières de carbonate de magnésium collectées, doivent être recyclées dans les procédés de fabrication dans la mesure du possible, ou doivent être réutilisées dans des produits commercialisables. Les boues issues du procédé de désulfuration des gaz résiduels par voie humide (méthodes de décantation et/ou de filtration) doivent être réutilisées au sein du procédé ou dans d'autres secteurs, si possible, selon les spécifications.

D'autres usages sont possibles pour les matériaux qui ne peuvent pas être recyclés, comme les déchets d'emballages ou les déchets issus de la maintenance de certains dispositifs d'installation.

3.4.9 Bruit

Description et avantages environnementaux obtenus

L'extraction et le traitement des matières premières et la fabrication de la magnésie surcuite engendrent inévitablement des opérations bruyantes. Les émissions de bruit ont lieu sur la totalité du procédé et peuvent se produire à différentes étapes, comme au sein des unités de broyage et de préparation, des fours et des systèmes d'alimentation des fours, des convoyeurs à bandes, des unités de filtrage, des systèmes de refroidissement des fours, etc. Les machines lourdes et les ventilateurs de grande taille peuvent engendrer du bruit et/ou des vibrations. En appliquant des mesures/des techniques directement à la source du bruit, ces émissions peuvent souvent être réduites, comme :

- en enfermant les unités bruyantes ;
- utilisation de bâtiments insonorisés ;
- en garnissant les conduits et les souffleries qui se trouvent dans les bâtiments insonorisés ;
- en utilisant des murs antibruit ;
- en installant des silencieux pour les cheminées d'évacuation ;
- en utilisant des silencieux pour les ventilateurs de filtres ;
- en utilisant des modules insonorisés pour les dispositifs techniques (comme les compresseurs par exemple) ;
- en utilisant des écrans en caoutchouc pour les broyeurs (en évitant tout contact métal/métal).

Si les mesures/les techniques antibruit susmentionnées ne peuvent être appliquées et si aucun transfert des unités bruyantes n'est possible au sein d'un bâtiment, comme par exemple à cause des dimensions des fours et de leurs accessoires, des mesures/des techniques secondaires de protection contre le bruit, comme la construction de bâtiments ou la plantation d'arbres et de buissons entre la zone protégée et le site bruyant (le four ou la zone de stockage) doivent être mises en œuvre. Les portes et les fenêtres des zones protégées doivent être maintenues fermées pendant les opérations qui émettent du bruit.

Les barrières acoustiques naturelles, comme les immeubles de bureaux, les murs, les arbres ou les buissons peuvent être utilisées afin de réduire les émissions de bruit. Les usines doivent respecter les normes de réduction des émissions de bruit, conformément à la législation en vigueur dans le pays.

Pour plus d'informations sur la diminution du niveau sonore, se reporter au chapitre « Chaux » de la Section 2.4.10 du présent document.

Effets croisés

Un investissement et des coûts de maintenance supplémentaires peuvent s'imposer en raison des mesures/des techniques de protection contre le bruit.

Données d'exploitation

Aucune donnée.

Applicabilité

Les mesures/les techniques de réduction du bruit peuvent, en principe, s'appliquer à l'industrie de la magnésie (cf. Section 3.3.3.4).

Aspects économiques

Un investissement supplémentaire peut s'imposer en raison des mesures/des techniques de protection contre le bruit.

Motivation pour la mise en œuvre

Exigences légales.

Exemples d'installations et documentation de référence

Usines d'oxyde de magnésium (magnésie) basées en Autriche, en Espagne et dans l'UE des 27.
Pour plus d'informations sur la diminution du niveau sonore, se reporter au chapitre « Chaux » de la Section 2.4.10.

[45, Schorcht, 2006] [109, RHI AG, 2006], [110, producteurs espagnols de MgO, 2006/2008], [165, EUROMINES, 2006]

3.4.10 Outils de management environnemental

Les outils de management environnemental sont décrits dans le chapitre « Ciment », Section 1.4.12, du présent document.

3.5 Meilleures techniques disponibles pour la fabrication d'oxyde de magnésium en utilisant le procédé en voie sèche à partir de magnésite naturelle extraite en carrière

Pour bien comprendre la présente Section et son contenu, le lecteur est invité à se reporter à la préface du présent document, et notamment, à sa cinquième section : « Compréhension et utilisation du présent document ». Les mesures/techniques et les niveaux (ou séries de niveaux) d'émissions et/ou de consommation afférents, exposés dans la présente Section, ont été évalués au moyen d'un processus itératif comportant les étapes suivantes :

- recensement des principaux problèmes d'environnement liés au secteur ; pour la fabrication de l'oxyde de magnésium. Il s'agit de l'utilisation de l'énergie et des émissions dans l'air ;
- étude des mesures/des techniques les plus pertinentes pour résoudre ces grands problèmes ;
- détermination des meilleurs niveaux de performance dans le domaine environnemental, en s'appuyant sur les données disponibles dans l'Union européenne et dans le monde ;
- étude des conditions dans lesquelles ces niveaux de performance ont été atteints (coûts, effets croisés, motivations pour la mise en œuvre de ces mesures/techniques) ;
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émission ou/ou de consommation qui leur sont associés pour ce secteur, au sens général, conformément à l'article 2(12) et à l'annexe 4 de la Directive.

L'avis des experts du Bureau européen IPPC et celui du groupe de travail technique concerné (TWG ou GTT en français) ont joué un rôle déterminant dans chacune de ces phases et dans la présentation des informations dans le présent document.

Sur la base de cette évaluation, la présente Section expose les meilleures techniques disponibles et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émissions et de consommation associés à l'utilisation des MTD considérées comme adaptées à ce secteur dans son ensemble. Dans bien des cas, ceux-ci reflètent les performances actuelles d'installations de ce secteur. Lorsque des niveaux d'émission ou de consommation « associés à l'utilisation des MTD » sont énoncés, cela signifie que ces valeurs correspondent aux performances environnementales prévisibles en cas d'application des mesures/des techniques décrites, dans le secteur en question, compte tenu de l'équilibre entre les coûts et les avantages inhérents à la définition des MTD. Toutefois, il ne s'agit pas de valeurs limites de consommation ou d'émission et elles ne doivent en aucun cas être considérées comme telles. Certaines techniques permettent éventuellement, dans certaines situations, d'atteindre de meilleurs résultats en matière de consommation ou d'émission alors que, en raison des coûts ou des effets croisés impliqués, elles ne peuvent pas être reconnues comme MTD pour le secteur dans son ensemble. Ces niveaux peuvent toutefois être considérés comme justifiés dans des cas très spécifiques, caractérisés par des motivations particulières.

Les niveaux d'émission et de consommation associés à l'utilisation des MTD doivent toujours être envisagés en association avec les conditions de référence spécifiées (périodes de calcul des moyennes, par exemple).

Il faut distinguer la notion de « niveaux associés à l'utilisation des MTD » expliquée ci-dessus de la notion de « niveau pouvant être atteint » qui apparaît ailleurs dans le présent document. Lorsqu'il est question d'un niveau « pouvant être atteint » au moyen d'une mesure/technique ou d'une combinaison de mesures/techniques données, cela signifie que l'on peut prévoir, en utilisant ce type de techniques, d'atteindre ce niveau dans un délai substantiel sur un processus ou une installation bénéficiant de bonnes conditions d'entretien et d'exploitation.

Lorsqu'elles étaient disponibles, les données relatives aux coûts ont été indiquées à la Section 3.4, avec la description des mesures/techniques. Elles donnent alors une idée approximative des charges impliquées. Cependant, le coût réel de la mise en application d'une mesure/technique dépend étroitement de la situation en matière de taxes et de redevances, par exemple, et des caractéristiques techniques de l'installation concernée. Ces facteurs spécifiques à chaque site ne peuvent pas être évalués de manière exhaustive dans le présent document. En l'absence de données relatives aux coûts, les conclusions sur la viabilité économique des techniques sont établies à partir des observations effectuées sur les installations existantes.

Les MTD (y compris les niveaux d'émission et de consommation associés) mentionnées dans la présente Section sont des « MTD au sens général » (c'est à-dire qu'elles sont considérées comme adaptées au secteur dans son ensemble). Elles sont destinées à servir de référence pour évaluer les performances actuelles d'une installation existante, ou un projet de nouvelle installation. Elles aideront ainsi à définir des conditions d'autorisation appropriées pour chaque installation, ou à établir des prescriptions générales prévues à l'Article 9, Paragraphe 8 de la Directive IPPC. Il est prévu que les nouvelles installations peuvent être conçues de manière à parvenir à des performances d'un niveau équivalent, voire plus élevé, par rapport aux niveaux aux MTD citées ici. Il est également admis que, au bout d'un certain temps, les installations existantes pourraient atteindre, voire dépasser, les niveaux correspondants aux MTD cités dans la présente Section, en fonction de l'applicabilité technique et économique des mesures/techniques dans chaque cas.

Bien que les documents de référence sur les MTD ne fixent pas de normes juridiquement contraignantes, ils sont destinés à fournir des informations à l'usage de l'industrie, des États membres et du public en ce qui concerne les niveaux d'émission et de consommation pouvant être atteints au moyen de mesures/de techniques particulières. Pour tout cas spécifique, il faudra déterminer les conditions d'autorisation appropriées, compte tenu des objectifs de la Directive IPPC et des aspects locaux.

Dans le présent document, les MTD pour l'industrie de la fabrication de l'oxyde de magnésium (avec le procédé par voie sèche) prennent en considération les mesures/les techniques génériques et spécifiques applicables à l'industrie de la magnésie. Les « meilleures techniques disponibles » pour une installation spécifique sont généralement le recours à une ou plusieurs MTD citées dans la présente Section.

Lorsque des mesures/ des techniques identifiées individuellement comme des MTD peuvent être utilisées en combinaison, les effets desdites combinaisons doivent être pris en considération lors des conclusions sur les conditions d'autorisation pour chaque cas individuel.

Recommandation à l'attention des utilisateurs/des lecteurs du présent document :

Il est fortement recommandé de lire cette Section 3.5 en conjonction avec la Section 3.4, étant donné que les considérations afférentes à l'applicabilité des mesures/techniques citées dans la Section 3.4 doivent être prises en compte. Pour aider le lecteur, des références à la Section 3.4 ont été intégrées à la Section 3.5.

Les niveaux d'émission indiqués dans la présente Section sont exprimés comme une moyenne journalière, dans des conditions standard. Voir les définitions suivantes afférentes aux conditions standard pour les débits volumétriques et les concentrations de gaz d'exhaure des fours, qui figurent également dans le glossaire :

m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans la présente Section, le débit volumétrique correspond à 10% en volume d'oxygène et à l'état standard
mg/Nm ³	concentration : sauf indication contraire dans la présente Section, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux correspondent à des gaz résiduels secs à 10% en volume d'oxygène et à l'état standard
état normal	correspond à une température de 273 K, une pression de 1013 hPa et un gaz sec

Comme cela est décrit dans la préface, le présent document ne propose pas de valeurs limite d'émission. Les meilleures techniques disponibles et les niveaux d'émission ou de consommation qui y sont associés (niveaux NEA MTD) sont liés aux installations ayant différentes tailles de fours, différents modes de fonctionnement des fours (comme par exemple en continu ou en discontinu), et différents nombres d'heures de fonctionnement par an. Dans le présent document, les aspects locaux spécifiques ne peuvent pas être entièrement pris en considération. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de facteurs locaux inhérents au site, tels que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions locales de l'environnement. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent de faire des compromis entre différents types d'impacts sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales.

Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes évoqués, il ne pourra pas les traiter tous de manière exhaustive. Les mesures/les techniques présentées ici à la Section 3.5 ne seront donc pas forcément appropriés pour toutes les installations. Par ailleurs, l'obligation de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement, y compris la réduction de la pollution à longue distance ou transfrontière, suppose que les conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base de considérations purement locales. C'est pourquoi il est de la plus haute importance que toutes les informations présentées dans le présent document soient prises en compte.

3.5.1 Système de management environnemental (EMS)

Plusieurs techniques de management environnemental sont déterminées comme des MTD. La portée (comme par exemple le niveau de détail) et la nature de ce système (standardisé ou non standardisé, par exemple) sont généralement liées à la nature, à l'échelle et à la complexité de l'installation, et à ses impacts sur l'environnement.

55. Les MTD consistent à mettre en œuvre et à respecter un système de management environnemental (EMS) qui comprend, selon les conditions locales, les caractéristiques suivantes (cf. Section 1.4.12 du chapitre « Ciment ») :

- (a) un engagement de la part de la Direction générale (cet engagement est considéré comme un prérequis à la réussite de la mise en œuvre des autres caractéristiques de l'EMS) ;
- (b) la définition d'une politique environnementale qui comprend une amélioration continue de l'installation par la Direction générale ;
- (c) la planification et l'établissement des procédures et des objectifs nécessaires, en conjonction avec la planification financière et les investissements ;
- (d) la mise en œuvre des procédures, en veillant particulièrement :

- à la structure et aux responsabilités ;
 - à la formation, à la sensibilisation et aux compétences ;
 - à la communication ;
 - à l'implication des employés ;
 - à la documentation ;
 - à l'efficacité du contrôle des processus ;
 - au programme de maintenance ;
 - à la disponibilité et à la réactivité en cas d'urgence ;
 - au respect de la législation sur l'environnement.
- (e) le contrôle des performances et la mise en œuvre de mesures correctives, en veillant particulièrement : à la mesure et au suivi (se reporter également au document de référence sur les principes généraux de suivi [151, Commission européenne, 2003]) ;
- aux actions correctives et préventives ;
 - à la conservation des documents ;
 - aux audits internes indépendants (le cas échéant), afin de déterminer si le système de management environnemental est conforme ou non aux accords prévus, et a été correctement mis en œuvre et maintenu ou non ;
- (f) l'étude de l'EMS, de son adéquation et de son efficacité par la Direction générale.

Trois autres caractéristiques figurent ci-dessous. Bien qu'elles présentent des avantages, un EMS qui en serait dépourvu pourrait malgré tout être considéré comme une MTD :

- étude et validation du système de gestion et de la procédure d'audit par un organisme de certification agréé ou par un auditeur d'EMS externe ;
- préparation et publication (et éventuellement validation externe) d'une déclaration régulière sur le respect de l'environnement, décrivant l'ensemble des aspects environnementaux les plus significatifs de l'installation, et permettant une comparaison annuelle avec les objectifs en matière d'environnement, et avec les références du secteur le cas échéant ;
- mise en œuvre et respect d'un système de volontariat accepté à l'échelle internationale, comme EMAS et EN ISO 14001 : 2004. Ce volontariat pourrait renforcer la crédibilité de l'EMS. EMAS, qui comprend l'ensemble des caractéristiques susmentionnées, offre une crédibilité supplémentaire particulière. Cependant, les systèmes non standardisés peuvent, en principe, s'avérer tout aussi efficaces, à condition qu'ils soient correctement conçus et mis en œuvre.

En ce qui concerne plus particulièrement l'industrie de la fabrication de l'oxyde de magnésium, il est également important de prendre en considération les caractéristiques potentielles suivantes de l'EMS :

- l'impact environnemental lié à la mise à l'arrêt éventuelle de l'unité à l'étape de conception d'une nouvelle usine ;
- le développement de technologies plus propres, et le respect de ces technologies ;

- le cas échéant, l'application de références secteur par secteur, de manière régulière, comprenant les activités à haut rendement énergétique et à faible consommation d'énergie, le choix des matières entrant dans les fours, les rejets dans l'atmosphère, les rejets dans l'eau, la consommation d'eau et la génération de déchets.

3.5.2 Mesures/techniques primaires générales - Surveillance

56. Les MTD consistent à effectuer un suivi et une mesure des paramètres et des émissions du procédé de manière régulière, comme :

- (a) des mesures en continu des paramètres assurant la stabilité du procédé, comme la température, la teneur en O₂, la pression, le débit ;
- (b) le suivi et la stabilisation des paramètres critiques du procédé, c'est-à-dire l'alimentation en matières premières et en combustible, le dosage régulier et l'excédent d'oxygène ;
- (c) des mesures continues ou périodiques (au moins une fois par mois et au moment des émissions les plus importantes prévues) de la quantité de poussières et des émissions de NO_x, SO_x et de CO.

3.5.3 Consommation d'énergie

Pour des considérations générales concernant la consommation d'énergie, se reporter aux Sections 3.4.3 et 3.4.5.

57. Les MTD consistent à réduire la consommation d'énergie thermique, selon le procédé et les produits, à 6 à 12 GJ/t, en appliquant une combinaison des mesures/techniques suivantes :

- (a) l'application de systèmes de cuisson améliorés et optimisés et d'un procédé de cuisson régulier et stable à l'aide :
 - I. une optimisation de la conduite ;
 - II. d'une récupération de la chaleur des gaz d'exhaure du four et des refroidisseurs ;
- (b) l'utilisation de combustibles présentant des caractéristiques ayant une influence positive sur la consommation d'énergie thermique (cf. Sections 3.2.2 et 3.4.5) ;
- (c) la limitation de l'excédent d'air.

Ces valeurs reflètent uniquement les informations fournies pour le chapitre « Oxyde de magnésium » du présent document. Aucune autre information spécifique concernant les meilleures mesures/techniques et les produits fabriqués n'a été fournie (voir également la Section 3.7).

Dans ce contexte, se reporter aux Sections 3.4.3 et 3.4.5, qui présentent plusieurs mesures/techniques différentes applicables aux systèmes de cuisson, individuellement ou en combinaison. Se reporter également au document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour le rendement énergétique [181, Commission européenne, 2008].

58. Les MTD consistent à minimiser la consommation d'énergie électrique en appliquant les mesures/les techniques suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) le recours à des systèmes de gestion de l'énergie ;
- (b) l'utilisation d'installations de broyage et autres équipements électriques à haut rendement énergétique (cf. Section 3.4.3.).

3.5.4 Émissions de poussières

3.5.4.1 Émissions de poussières diffuses

Pour des considérations générales concernant les émissions de poussières diffuses, se reporter à la Section 3.4.6.1.

59. Les MTD consistent à minimiser/empêcher les émissions de poussières diffuses en appliquant les mesures/les techniques réservées aux opérations génératrices de poussières individuellement ou en combinaison.

Dans ce contexte, se reporter à la Section 3.4.6.1, qui présente plusieurs mesures/techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison.

3.5.4.2 Émissions de poussières canalisées provenant d'opérations génératrices de poussières

La présente section décrit les MTD destinées aux émissions de poussières dues aux opérations génératrices de poussières autres que les procédés de chauffe du four. Pour des considérations générales concernant les émissions de poussières canalisées, se reporter aux Sections 3.3.3.1 et 3.4.6.2.

60. Les MTD consistent à réduire les émissions de poussières canalisées dues aux opérations génératrices de poussières (cf. Section 3.4.6.2) à moins de 10 mg/Nm³ (NEA MTD), comme moyenne sur la période d'échantillonnage (mesure ponctuelle, pendant au moins une demi-heure), en épurant les gaz résiduels à l'aide d'un filtre.

Il convient de noter que, pour les sources à bas niveau d'émission (<10000 Nm³/h), une approche prioritaire doit être prise en compte.

Dans ce contexte, se reporter à la Section 3.4.6.2, qui présente plusieurs mesures/techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison.

3.5.4.3 Émissions de poussières provenant des procédés de chauffe du four

La présente Section décrit les MTD pour les émissions de poussières par les procédés de chauffe du four. Pour des considérations générales concernant les émissions de poussières canalisées, se reporter aux Sections 3.3.3.1 et 3.4.6.2.

61. Les MTD consistent à réduire les émissions de poussières (particules) dues aux gaz résiduels des procédés de chauffe du four à < 20 à 35 mg/Nm³ (NEA MTD), comme valeur moyenne journalière ou comme moyenne sur la période d'échantillonnage (mesure ponctuelle, pendant au moins une demi-heure), en appliquant l'épuration des gaz d'exhaure avec un filtre.

Dans ce contexte, se reporter à la Section 3.4.6.2, qui présente plusieurs mesures/techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison.

3.5.5 Composés gazeux

3.5.5.1 Mesures/techniques primaires générales de réduction des composés gazeux

Pour des considérations générales concernant les émissions de composés gazeux, se reporter aux Sections 3.3.3.1, 3.4.4, 3.4.5 et 3.4.7.

62. Les MTD consistent à réduire les émissions de composés gazeux (NO_x, HCl, SO_x, CO) dues aux gaz résiduels des procédés de chauffe du four en appliquant les mesures/techniques primaires suivantes individuellement ou en combinaison :

- (a) une sélection et un contrôle rigoureux des matières alimentant le four ;
- (b) une réduction des précurseurs de polluants dans les combustibles et/ou les matières premières, c'est-à-dire :
 - I. le choix de combustibles ayant une faible teneur en soufre, le cas échéant, en chlore et en azote (cf. Section 3.4.5) ;
 - II. le choix de matières premières ayant une faible teneur en matières organiques (cf. Section 3.4.7.2) ;
 - III. le choix de déchets combustibles pour le procédé et le brûleur (cf. Sections 3.2.2 et 3.4.5).
- (c) l'utilisation de mesures/de techniques d'optimisation de la conduite afin de garantir un procédé de chauffe du four régulier et stable, proche de l'air stœchiométrique requis (cf. Section 3.4.4).

3.5.5.2 Émissions de NO_x

Pour des considérations générales concernant les émissions de NO_x, se reporter aux Sections 3.3.3.1 et 3.4.7.1.

63. Les MTD consistent à réduire les émissions de NO_x dues aux gaz résiduels des procédés de chauffe du four à <500 à <1500 mg/Nm³ (NEA MTD), comme valeur moyenne journalière exprimée en NO₂, en appliquant une combinaison des mesures/techniques suivantes (cf. Section 3.4.7.1) :

- (a) sélection d'un combustible approprié ayant une teneur limitée en azote, le cas échéant (cf. Section 3.4.5) ;
- (b) optimisation de la conduite et technique de cuisson améliorée (cf. Sections 3.4.4 et 3.4.7.1) ;

Les valeurs NEA MTD les plus élevées sont liées au procédé de fabrication de la magnésie surcuite à haute température.

Dans ce contexte, se reporter à la Section 3.4.7.1, qui présente plusieurs mesures/techniques différentes. Cependant, au moment de la rédaction du chapitre sur l'industrie de l'oxyde de magnésium et de la présente Section sur les MTD (2008), il n'existait aucun exemple connu d'application de la technique SNCR ou SNR dans ce secteur.

Cela est dû au fait que le procédé de fabrication de l'oxyde de magnésium soit un procédé endotherme (500 à 800 °C) qui n'atteint pas la fenêtre de température d'environ 800 à 1 100 °C à laquelle fonctionne la technique SNCR. Un chauffage supplémentaire des gaz résiduels est nécessaire. De plus, la technique SCR n'est pas utilisée à cause d'incertitudes techniques et économiques, qui sont principalement dues à la méconnaissance de la durée de vie exacte des catalyseurs et à la nature extrêmement polluante des gaz de rejet. Un certain nombre de travaux de recherche et de développement doit être réalisé avant de pouvoir appliquer la technique SNCR ou SCR à l'industrie de l'oxyde de magnésium.

En raison de la température de cuisson élevée (jusqu'à 2 200 °C) nécessaire pour fabriquer l'oxyde de magnésium (magnésie surcuite), les brûleurs bas-NO_x ne sont pas utilisés. Ils ne fonctionnent qu'à des températures inférieures à 1 600 °C.

En 2008, la combustion étagée n'était pas utilisée dans l'industrie de la magnésie, et elle a dû être développée avant de pouvoir être utilisée.

3.5.5.3 Émissions de CO et pics de CO

3.5.5.3.1 Émissions de CO

Pour des considérations générales concernant les émissions de CO, se reporter à la Section 3.4.7.2.

64. Les MTD consistent à réduire les émissions de CO dues aux gaz résiduels des procédés de chauffe du four à <50 à <1 000 mg/Nm³ (NEA MTD), comme valeur moyenne journalière, en appliquant une combinaison des mesures/techniques suivantes :

- (a) la sélection, si possible, de matières premières ayant une faible teneur en matières organiques ;
- (b) une optimisation de la conduite ;
- (c) une alimentation contrôlée, constante et continue en combustible.

Dans ce contexte, se reporter à la Section 3.4.7.2, qui présente plusieurs mesures/techniques différentes applicables individuellement ou en combinaison.

3.5.5.3.2 Réduction des pics de CO

Pour des considérations générales concernant les pics de CO, se reporter à la Section 3.4.7.2.

65. En appliquant des filtres électrostatiques (ESP), les MTD consistent à minimiser le nombre de pics de CO à l'aide des mesures/des techniques suivantes (cf. Sections 3.4.6.2.1 et 3.4.7.2) :

- (a) réduction du temps d'arrêt des filtres électrostatiques ;
- (b) mesures continues et automatiques du CO ;
- (c) utilisation d'un équipement de mesure et de contrôle rapide, y compris d'un système de suivi du CO ayant un temps de réponse court et situé à proximité de la source de CO ;

Dans ce contexte, se reporter également au chapitre « Ciment » (Section 1.4.5.3) et au chapitre « Chaux » (Section 2.4.6.3), qui présentent plusieurs mesures/techniques différentes, et applicables individuellement ou en combinaison. Se reporter également à la Section 4.2.6, qui fournit des informations sur le contrôle des pics de CO.

3.5.5.4 Émissions de SO_x

Pour des considérations générales concernant les émissions de SO_x, se reporter aux Sections 3.3.3.1, 3.4.4, 3.4.5 et 3.4.7.3.

66. Les MTD consistent à réduire les émissions de SO_x dues aux gaz résiduaux des procédés de chauffe du four en appliquant une combinaison des mesures/des techniques primaires et secondaires suivantes :

- (a) l'utilisation de mesures/de techniques d'optimisation de la conduite (cf. Section 3.4.4.) ;
- (b) le choix de combustibles ayant une faible teneur en soufre, le cas échéant (cf. Section 3.4.5) ;
- (c) l'utilisation de techniques d'addition d'absorbants, comme l'addition d'absorbants, ou l'épuration des gaz résiduaux à l'aide d'un filtre, d'un épurateur en voie humide, de charbon actif (cf. Section 3.4.7.3).

Les niveaux d'émissions de SO_x suivants correspondent aux NEA MTD :

Paramètre	Unité	NEA-MTD1) ³⁾ (valeur moyenne journalière)
SO _x exprimé en SO ₂ Teneur en soufre de la matière première < 0,10%	mg/Nm ³	<50
SO _x exprimé en SO ₂ Teneur en soufre de la matière première : 0,10 à 0,25%	mg/Nm ³	50 – 250
SO _x exprimé en SO ₂ Teneur en soufre de la matière première : > 0,25	mg/Nm ³	250 – 400 ²⁾
1) Les fourchettes dépendent de la teneur en soufre des matières premières. Par exemple, pour utiliser des matières premières ayant une teneur en soufre plus faible, les niveaux les moins élevés correspondent aux MTD et, pour utiliser des matières premières ayant une teneur en soufre plus élevée, les niveaux plus élevés correspondent aux MTD. 2) Selon la composition des matières premières, les niveaux d'émissions de SO ₂ peuvent être supérieurs à 400 mg/Nm ³ dans certains cas exceptionnels 3) Les effets croisés doivent être pris en compte pour évaluer la meilleure combinaison possible de MTD afin de réduire les émissions de SO _x		

Tableau 3.11 : Niveaux d'émissions associés aux MTD pour les SO_x provenant des gaz résiduaux des procédés de chauffe du four dans l'industrie de la magnésie.

3.5.6 Pertes/déchets de traitement

Pour des considérations générales concernant les pertes/déchets de procédé, se reporter aux Sections 3.3.3.2 et 3.4.8.

- 67. Les MTD consistent à réutiliser les particules collectées (différents types de poussières de carbonate de magnésium) dans le procédé dans la mesure du possible.**
- 68. Lorsque différents types de poussières de carbonate de magnésium collectées ne sont pas recyclables, l'utilisation de ces poussières dans d'autres produits commercialisables, lorsque cela est possible, correspond à une MTD.**
- 69. La MTD consiste à réutiliser les boues résultant du procédé de désulfuration des gaz résiduaux par voie humide au cours du procédé ou dans d'autres secteurs.**

3.5.7 Bruit

Pour des considérations générales concernant le bruit, se reporter aux Sections 3.3.3.4 et 3.4.9.

70. La MTD consiste à réduire/minimiser les émissions de bruit dues aux procédés de fabrication de l'oxyde de magnésium en appliquant une combinaison des mesures/techniques suivantes (cf. Section 3.4.9) :

- (a) enfermement des opérations/des unités bruyantes ;
- (b) utilisation de bâtiments insonorisés ;
- (c) garnissage des conduits et des souffleries qui se trouvent dans les bâtiments insonorisés ;
- (d) utilisation de murs antibruit et/ou de barrières acoustiques naturelles ;
- (e) utilisation de silencieux pour les cheminées d'évacuation ;
- (f) utilisation de silencieux pour les ventilateurs de filtres ;
- (g) utilisation de modules insonorisés pour les dispositifs techniques (comme les compresseurs par exemple) ;
- (h) utilisation d'écrans en caoutchouc pour les broyeurs (en évitant tout contact métal/métal) ;
- (i) construction de bâtiments ou plantation d'arbres et de buissons entre la zone protégée et le site bruyant ;
- (j) fermeture des portes et des fenêtres des zones protégées.

3.5.8 Utilisation des déchets comme combustibles et/ou comme matières premières

Pour des considérations générales concernant l'utilisation des déchets, se reporter aux Sections 3.2.2 et 3.4.5. Dans ce contexte, se reporter également à la Directive sur l'incinération des déchets [59, Commission européenne, 2000].

71. En cas d'utilisation de déchets, la MTD consiste à :

- (a) choisir des combustibles adaptés pour le procédé et pour le brûleur (cf. Sections 3.2.2 et 3.4.5) ;
- (b) appliquer des systèmes d'assurance qualité afin de garantir les caractéristiques des déchets et d'analyser tous les déchets destinés à être utilisés en termes :
 - I. de disponibilité ;
 - II. de constance de la qualité ;
 - III. de critères physiques, comme la formation d'émissions, la granulométrie, la réactivité, l'inflammabilité, la valeur calorifique ;
 - IV. de critères chimiques, comme la teneur en chlore, en soufre, en alcalis, en phosphates, et en métaux pertinents ;

- (c) contrôler la quantité des paramètres concernés pour tout déchet destiné à être utilisé, comme la teneur totale en substances halogènes, en métaux (comme la teneur totale en chrome, en plomb, en cadmium, en mercure, en thallium) et en soufre.

Dans ce contexte, en cas de co-incinération de déchets, les exigences de la Directive sur l'incinération des déchets (WID) doivent être respectées [59, Commission européenne, 2000].

3.6 Techniques émergentes

Aucune technique émergente n'a encore été proposée pour l'industrie de l'oxyde de magnésium utilisant le procédé par voie sèche.

3.7 Conclusions et recommandations

Chronologie du procédé

La réunion de démarrage pour l'étude du document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour le ciment et la chaux s'est tenue en septembre 2005. Le groupe de travail technique a décidé d'étendre la portée du présent document et d'ajouter un autre secteur industriel de fabrication de l'oxyde de magnésium (MgO/magnésie) utilisant le procédé par voie sèche au BREF sur le ciment et la chaux. Après la période de collecte des informations et des données, une seconde réunion du groupe de travail technique s'est tenue en février 2007 afin de vérifier et de s'accorder sur les informations et les données à utiliser pour la révision du BREF. De plus, le groupe de travail technique a demandé une exception procédurale pour le procédé de révision du présent document de façon à séparer les débats sur les Sections 1 à 4 et sur les Sections MTD pour les trois chapitres relatifs au ciment, à la chaux et à l'oxyde de magnésium.

A partir de la demande du groupe de travail technique et en prenant en compte le calendrier générique pour l'étude des BREF (décembre 2005), le forum d'échange d'informations a décidé de séparer les débats sur les Sections 1 à 4 et sur les Sections MTD pour les trois chapitres relatifs au ciment, à la chaux et à l'oxyde de magnésium.

L'échange d'informations pour l'industrie de l'oxyde de magnésium utilisant le procédé par voie sèche a eu lieu entre 2006 et 2008 au sein du groupe de travail technique international. La rédaction du chapitre « MgO » du présent document a été basée sur les informations fournies et sur les commentaires ayant fait suite aux deux consultations et à la réunion finale.

La première version couvrant les Sections révisées 1 à 4 et 6 des trois chapitres « Ciment », « Chaux » et « Oxyde de magnésium » a été proposée à la consultation en septembre 2007. La seconde partie de la première version couvrant les sections relatives aux techniques à prendre en considération pour déterminer les MTD (Sections 1.4, 2.4 et 3.4) et les sections relatives aux MTD (Sections 1.5, 2.5 et 3.5) des trois chapitres ont été proposées à la consultation en mai 2008. La réunion finale du groupe de travail technique s'est tenue en septembre 2008.

Le projet sur la première révision du présent document, qui a lancé l'étude de la première série de BREF, a suscité un énorme intérêt. Au moment de la dernière réunion plénière, il y avait plus de 110 membres du groupe de travail technique.

Sur la base du calendrier générique d'étude des BREF (décembre 2005), la révision du BREF sur le ciment et la chaux n'a pas entraîné de refonte totale du premier document adopté en décembre 2001, mais celui-ci a été mis à jour, et les informations supplémentaires qui ont été révisées ont été ajoutées (en ce qui concerne les techniques, par exemple), étant donné qu'elles auraient pu avoir un impact sur les conclusions des MTD. L'échange d'informations et la collecte de données ont été basés sur les attentes du groupe de travail technique et sur les conclusions de la seconde réunion du groupe de travail (janvier 2007). Le document de référence sur la collecte de données convenu par l'IEF en avril 2008 n'a pas été utilisé pour ce processus.

Sources d'informations, rédaction du présent chapitre sur la MgO, et lacunes en matière d'information

Le chapitre sur la MgO a été rédigé en partant de zéro et se base sur six documents et sur cinq sources d'informations recueillies auprès du secteur et d'un État membre. Les rapports ont été soumis par EUROMINES, l'association industrielle représentant les fabricants européens de MgO et l'Autriche en tant qu'État membre. Ces documents peuvent être considérés comme la base du chapitre « MgO » du présent document.

D'autres informations utiles ont été obtenues en visitant un site de fabrication de MgO en Autriche.

Il convient de noter que, en 2008, dans l'UE des 27, à partir des informations disponibles, il n'y avait que neuf producteurs d'oxyde de magnésium connus utilisant 14 usines, si bien que le nombre d'usines fabriquant de l'oxyde de magnésium clinkérisé est donc faible.

Malgré l'existence d'un grand nombre d'informations très utiles et de nombreux commentaires concernant plusieurs points, certains problèmes liés aux informations et aux données et certaines conséquences pour le présent chapitre sur la MgO doivent être mis en exergue :

- il manque des informations sur la consommation d'énergie pour différents types de fours et des produits spécifiques, et des données sur les meilleures performances obtenues. En ce qui concerne les conclusions des MTD sur la consommation d'énergie (MTD 58, Section 3.5.3), elles reflètent uniquement les informations fournies pour le présent BREF. Aucune autre information spécifique concernant les meilleures techniques et les produits fabriqués n'a été fournie ;
- il manque des informations sur le suivi et la fréquence de suivi, comme par exemple pour les mesures périodiques ;
- pour la réduction des émissions de NO_x, en 2008, seules des mesures/des techniques primaires ont été utilisées. Les mesures/les techniques secondaires, comme le SCR, le SNCR, n'étaient pas encore applicables à l'industrie de la MgO pour diverses raisons techniques ; cependant, ce problème doit être étudié. En ce qui concerne ce point, une explication a été ajoutée à la conclusion MTD sur les émissions de NO_x (MTD 63, Section 3.5.5.2) ;
- il manque des informations sur les émissions de SO_x dues aux matières premières et aux combustibles, et sur les techniques de réduction ;
- il manque des informations sur la fréquence et la durée des pics de CO lorsque des filtres électrostatiques sont utilisés, afin que la conclusion sur les MTD correspondantes soit basée sur une approche qualitative ;
- il n'y a aucune information sur les techniques émergentes.

Niveau de consensus lors de la réunion finale du groupe de travail technique

Les conclusions des travaux relatifs au chapitre sur la MgO ont été convenues lors de la réunion finale du groupe de travail technique qui s'est tenue en septembre 2008. Les principaux sujets de discussion de cette réunion finale ont été les conclusions relatives aux MTD. Les propositions de MTD pour l'industrie de la MgO ont été débattues au cas par cas.

L'un des autres points abordés a été le fait de mentionner explicitement, dans la section « Conclusions et recommandations », les difficultés liées à la gestion des informations qui ont été reçues très tardivement au cours de la dernière réunion du groupe de travail technique, et après cette dernière réunion. Cela concerne plus particulièrement les informations et les données relatives à l'utilisation du coke de pétrole riche en soufre, aux émissions initiales de SO_x correspondantes, et à la disponibilité et à l'applicabilité des techniques de réduction des SO_x. Le groupe de travail technique a noté et a conclu que, en règle générale, pour réduire les composés gazeux, les MTD consistent à appliquer des mesures/des techniques primaires générales individuellement ou en combinaison (cf. Section 3.5.5.1, MTD 62). Le groupe de travail est également parvenu à la conclusion que, pour réduire les émissions de SO_x, les MTD consistaient à appliquer une combinaison de mesures/de techniques primaires et secondaires (cf. Section 3.5.5.4, MTD 66).

Lors de la dernière réunion, les débats ont également porté sur les NEA MTD pour les émissions de SO_x, plus particulièrement en cas de teneur en soufre > 0,25% dans les matières premières (cf. MTD 66, Section 3.5.5.4). Plusieurs membres du groupe de travail technique représentant l'industrie de l'oxyde de magnésium ont considéré que cette NEA MTD ne pouvait être mise en œuvre en raison des niveaux initiaux de SO_x très élevés, principalement dus à l'utilisation de combustibles riches en soufre. Cependant, des arguments techniques détaillés et particulièrement convaincants précisait que, en utilisant une combinaison de mesures/de techniques primaires et secondaires (cf. MTD 62 et MTD 66), des niveaux d'émissions de SO_x de 400 mg/Nm³ (comme valeur moyenne journalière) pouvaient être obtenus. Aucune bonne raison de soutenir une NEA MTD d'émissions de SO_x supérieures à 400 mg/Nm³ n'a pu être fournie par les membres du GTT. Cependant, le GTT a convenu que, dans certains cas exceptionnels, en raison de la composition des matières premières, les niveaux d'émissions de SO₂ pouvaient être supérieurs à 400 mg/Nm³. Les membres du GTT représentant l'industrie de l'oxyde de magnésium ont fait référence aux niveaux de SO_x initiaux très élevés avant leur réduction en utilisant du coke de pétrole riche en soufre comme unique combustible.

Il a été mentionné que plusieurs types de coke de pétrole étaient disponibles sur le marché. Pour plus d'informations sur la sélection du combustible, et pour comparer les combustibles en fonction de leurs coûts spécifiques et de leur teneur en soufre, se reporter au BREF (cf. Section 3.4.5, figure 3.13). Cependant, aucune information relative aux différents types de coke de pétrole contenant diverses quantités de soufre n'a été fournie. De plus, en utilisant un combustible autre que le coke de pétrole, ou un type de coke de pétrole contenant moins de soufre, si possible, le niveau initial de SO_x peut être réduit (cf. Section 3.5.5.1, MTD 62). Une combinaison de mesures/de techniques primaires et secondaires doit être appliquée, conformément aux MTD 66 (cf. Section 3.5.5.4). Les effets croisés doivent également être pris en compte pour évaluer la meilleure combinaison possible de MTD afin de réduire les émissions de SO_x. L'article 9(4) de la Directive IPPC (2008/1/CE) peut être utilisé en relation avec les aspects locaux pouvant justifier les conditions d'autorisation.

Lors de la dernière réunion du GTT qui s'est tenue en septembre 2008, un degré élevé de consensus a été atteint sur les MTD (meilleures techniques disponibles) pour l'industrie de la MgO, et aucune divergence n'a été enregistrée. Par conséquent – et de manière rétrospective sur l'ensemble de la période d'échange d'informations – le processus d'échange d'informations peut être considéré comme une réussite.

Recommandations pour les travaux futurs

L'échange d'informations et ses conséquences pour l'industrie de l'oxyde de magnésium, c'est-à-dire le chapitre « Oxyde de magnésium » du présent document, constituent une étape importante vers l'intégration de la prévention et du contrôle de la pollution due à la fabrication de l'oxyde de magnésium. D'autres travaux portant sur les points suivants peuvent poursuivre le processus :

- collecte de données en tenant compte des informations mentionnées dans le document de référence du forum d'échange d'informations publié en avril 2008 afin de permettre l'évaluation des performances de certaines mesures/techniques au niveau de l'usine, notamment les MTD potentielles ;
- collecte des données relatives aux coûts (investissement, coûts d'exploitation) pour l'ensemble des mesures/techniques à prendre en considération lors de la détermination des MTD ;
- collecte des données relatives aux coûts et à l'efficacité des mesures/des techniques de réduction ;
- collecte des informations et des données relatives aux options de minimisation de la consommation d'énergie ou d'augmentation du rendement énergétique ;
- collecte des informations relatives au suivi et à la fréquence de suivi, et étude de ces informations (comme par exemple pour les mesures périodiques), afin que les autorités puissent vérifier les conditions/les obligations d'autorisation ;
- étude de la révision du document de référence sur les principes généraux de suivi ;

- collecte des informations sur la consommation d'énergie pour différents types de fours et des produits spécifiques ;
- recherche & développement sur les mesures/les techniques primaires de réduction des NO_x ;
- recherche & développement de façon à appliquer la technique SNCR ou SCR de réduction des émissions de NO_x à l'industrie de l'oxyde de magnésium, et collecte des informations et des données relatives à ce sujet ;
- collecte des informations relatives à la teneur en soufre des matières premières et des combustibles, et des données économiques ;
- étude et collecte d'autres informations relatives à l'applicabilité des mesures/des techniques de réduction des SO_x (mesures/techniques primaires et secondaires), à leurs effets croisés potentiels, à la disponibilité des combustibles ayant une faible teneur en soufre, à l'applicabilité de l'utilisation d'un autre combustible ayant une faible teneur en soufre, et collecte des informations sur les émissions de SO_x dues aux matières premières et/ou aux combustibles ;
- étude et collecte des données relatives à la fréquence et à la durée des pics de CO en cas d'utilisation de filtres électrostatiques ;
- étude de la disponibilité des techniques émergentes.

Suggestions de sujets pour les futurs travaux de R&D

En ce qui concerne plus particulièrement la Section « Techniques émergentes » (Section 3.6), d'autres travaux de R & D seront nécessaires et utiles pour savoir si des techniques émergentes seront disponibles ou non pour l'industrie de l'oxyde de magnésium, afin que ces techniques puissent être prises en considération à l'avenir lors de la détermination des MTD pour l'industrie de l'oxyde de magnésium.

En outre, la CE est en train de lancer et de soutenir, par le biais de ses programmes de recherche technologique, une série de projets portant sur les technologies « propres », les technologies émergentes de traitement et de recyclage des eaux usées, et les stratégies de prise en charge. Ces projets pourraient contribuer de manière significative aux futures révisions des BREF. Les lecteurs sont donc invités à informer le Bureau européen pour la prévention et la réduction intégrées de la pollution des éventuelles conclusions de recherches qui pourraient s'avérer utiles au présent document (voir également la préface du présent document).

REFERENCES

- 3 Austria, U. (1997). "Basic criteria for BAT cement/Information for cement and lime BREF 2001", UBA-IB-560 September 1997.
- 4 Austria, U. (1998). "BAT bei Anlagen zur Zementherstellung M-105 (1998) / Information for cement and lime BREF 2001", M-105 (1998).
- 8 CEMBUREAU (2001). "Information for cement industry/Information for cement and lime BREF 2001".
- 9 CEMBUREAU (1997 November). "BAT for the cement industry, November 1997 / Information for cement and lime BREF 2001".
- 10 Cementa AB/Hagström, P. (1994). "Underlag för omprövning av utsläppsvillor / Information for reconsideration and updating of permit conditions 1994 obtained during a plant visit 1997 and information communicated at other occasions / Information for cement and lime BREF 2001".
- 11 Coulburn, D. (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 12 Netherlands (1997). "Dutch notes on BAT for the production of cement clinker/Information for cement and lime BREF 2001".
- 16 EuLA (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 18 Göller (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 19 Haugh (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 20 Rother, W. (1996 January,). "International Cement Review/Exhaust gas emissions/Available control technology for gaseous emissions in cement plants / Information for cement and lime BREF 2001".
- 21 BCA (1997 October). "International Cement Review/Information for cement and lime BREF 2001".
- 22 Japan, C. A. (1996). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 23 de Jonge, L. (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 24 Junker, P. (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 27 University of Karlsruhe, G. (1996). "Emission Control at Stationary Sources in the Federal Republic of Germany - Volume II, Heavy Metal Emission Control (August 1996), (UBA Research report 104 02 360 (January 1997))", UBA Research report 104 02 360 (January 1997).
- 29 Lohse, J. (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 30 Marchal, F. (2001). "Information for cement and lime BREF 2001".
- 31 LUA NRW, G. (1997). "LUA-Materialien No. 43, Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans in Europe, The European Dioxin Inventory, (1997)".
- 37 UK (1996). "UK IPC Note : Cement Manufacture, Lime Manufacture and Associated Processes, IPC Guidance Note S2 3.01 (1996) / Information for cement and lime BREF 2001". 38UK (1996). "Technical and Economic Review of Cement and Lime Processes (1996), Contract Ref : HMIP/CPR2/41/197 / Information for cement and lime BREF 2001".
- 39 Ullmann's (1986). "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th edition, Vol. A 5, 489-537 (1986), Cement and Concrete / Information for cement and lime BREF 2001".
- 40 Ullmann's (1990). "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th edition, Vol. A 15, 317-345 (1990), Lime and Limestone / Information for cement and lime BREF 2001".
- 41 Kupper/Brenttrup (1992). "SNCR technology for NOx reduction in the cement industry, World Cement, p. 4-8, March 1992 / Information for cement and lime BREF 2001".

- 42 Billhardt/Kuhlmann/Ruhland/Schneider/Xeller (1996 October). "Current state of NOx abatement in the cement industry/Information for cement and lime BREF 2001", ZKG International, Volume 49, No. 10, p. 545-560, (1996).
- 43 Wulf-Schnabel/Lohse (1998). "Economic evaluation of NOx abatement techniques in the European Cement Industry, Report compiled for DG XI, Contract N° B4-3040/98/000232/MAR/E1 / Information for cement and lime BREF 2001".
- 44 EuLA (2006). "Draft lime sector Chapter 2.1 and 2.2".
- 45 Schorcht, F. (2006). "Personal Communication by site visits".
- 46 Germany (2006). "German contribution part I: Lime manufacturing industries", Compilation by German National Working group and German lime industry.
- 47 European Commission (2004). "Reference Document on Best Available Technique for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities".
- 48 European Commission (2005). "Reference Document on Best Available Techniques for Management of the Waste Treatments Industries".
- 49 European Commission (2000). "European waste catalogue", 2000/532/EC2, (2001/573/EC).
- 50 Germany (2006). "German contribution : Use of alternative fuels in lime manufacturing", Compilation by German National Working group and German lime industry.
- 51 EuLA (2006). "Use of alternative fuels in lime manufacturing".
- 53 Norsk Hydro Norway (2001). "Performance figures for a gas suspension calcination lime plant (GSC plant)".
- 54 EuLA (2006). "Draft lime sector Chapter 2.3 and 2.4 and additional information on these chapters".
- 55 Spain (2006). "Energy consumption by various types of lime kilns".
- 56 EuLA (2006). "Metals database EuLA".
- 57 European Commission (2005). "Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration Industries".
- 58 European Commission (2003). "Reference Document on Best Available Technique for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector".
- 59 European Commission (2000). "Council Directive 2000/76/EC on the incineration of waste", 2000/76/EC.
- 60 VDI 2094 Germany (2003). "Emissionsminderung Zementwerke/Emission control cement industry, VDI 2094, March 2003".
- 61 France (2006). "Cost calculation regarding abatement techniques in lime industry (ESP, fabric filter, deduster)", contribution for review.
- 62 France/DFIU/IFARE Karlsruhe (2004). "EGTEI - Draft background document on lime sector".
- 63 Finland (2006). "Contributions : Information and emissions from Finnish cement and lime plants".
- 64 Czech Republic (2006). "The lime industry in the Czech Republic".
- 65 Finland (2006). "Template Emission components - Saxo Mineral Finland - lime".
- 66 Austria (2006). "The Austrian lime industry".
- 67 Austria (2006). "Plant visit report Austria May 2006".
- 68 EuLA (2006). "Database emissions lime manufacturing".
- 70 Hungary (2006). "Raw material characteristics from Labatlan lime plant in Hungary".

Références

- 71 Hungary (2006). "Information regarding Hungarian lime industry and measurements".
- 72 CEMBUREAU (2006-2008,). "General information about cement industry, updates 2006, 2007 and 2008".
- 73 CEMBUREAU (2006). "Existing national and international legislation and emission limits".
- 74 CEMBUREAU (2006). "2004 and 2005 statistics on the use of alternative fuels and materials in the clinker production in the European cement industry".
- 75 Estonia (2006). "Review to BREF for Kunda, cement manufacturing and annexes".
- 76 Germany, V. (2006). "Cement manufacturing industries, German contribution".
- 78 E. Baatz + G. Heidt (2000). "First waste heat power generating plant using the Organic Rancine Cycle Process for utilizing residual clinker cooler exhaust air".
- 79 Germany (2001). "Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG, Messergebnisse".
- 80 Alvaro A. Linero (2006). "Trip report on SCR experiences at Solnhofer Portland Zementwerke, Cementeria de Monselice and ASM Brescia waste-to energy plant".
- 81 Castle Cement UK (2006). "Presentations and contributions from British cement plants during site visits".
- 82 CEMEX Rugby UK (2006). "Presentations and contributions from British cement plants during site visits".
- 83 CEMBUREAU (2006). "Guideline on CO trips".
- 84 CEMBUREAU (2006). "Specific energy consumption".
- 85 CEMBUREAU (2006). "Contributions on NOx abatement".
- 86 EURITS (2006). "Contribution : Template for the review of the cement and lime BREF".
- 87 European Commission (2001). "Reference Document on Best Available Technique on the Production of Iron and Steel".
- 88 SINTEF (2006). "Formation and Release of POPs in the Cement Industry".
- 89 ERFO, T., Glorius, Scorigel, (2005). "Classification of solid recovered fuels".
- 90 Hungary (2006). "Hungarian cement industry".
- 91 CEMBUREAU (2006). "Air emissions and alternative fuels in the European cement industry".
- 92 Austria (2006). "Austrian cement industry", Contribution with Annexes 1,2 and 3.
- 93 EuLA (2006). "NOx abatement in the lime industry".
- 94 European Commission (2004). "Directive 2004/8/EC on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the integral energy market and amending Directive 92/42/EEC".
- 95 Sweden (2006). "SNCR principle of selective non-catalytic reduction of nitrogen oxides (NO, NOx)".
- 96 European Commission (2006). "Reference Document on Best Available Technique on emissions from storage of bulk or dangerous materials".
- 97 CEMBUREAU (2007). "Behaviour of SO2 in the clinker burning process".
- 98 European Commission (2000). "Commission Decision 2000/532/EC of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste (notified under document number C(2000) 1147) (Text with EEA relevance)".

- 99 European Commission (2003). "Directive 2003/87/EC of the European Parliament and the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC".
- 100 France (2006). "Cost calculation regarding abatement techniques in cement industry (ESP, bag filter, deduster, SNCR, NOx primary technologies, absorbent injection, wet scrubber)", contribution for review.
- 101 France/ADEME/MEDD (2002). "The French Cement Industry Guide to NOx Emission reduction Measures", contribution for review.
- 102 France/DFIU/IFARE Karlsruhe (2003). "EGTEI - Draft background document on cement sector", contribution for review.
- 103 CEMBUREAU (2006). "Additional contributions, e.g. types of cement and composition, information on chromates, information on why the cement industry has started to use AFR, contributions to the pre-draft of the revised CL BREF, composition information for grey cement", contribution for BREF review.
- 104 HOLCIM/GTZ (2006). "Guidelines on Co-processing Waste Materials in Cement Production".
- 105 YARA, M. R. L. (2006). "Contribution on cement industry, NOx abatement".
- 107 Belgium (2006). "Presentations and contributions from Belgium cement plant in Lixhe during site visit".
- 108 European Commission (2006). "Reference Document on Best Available Technique for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Solids and Others Industry (LVIC-S) : Chapter 7.7 Magnesium compounds".
- 109 RHI AG (2006). "Magnesia production from magnesite (natural process)".
- 110 Spanish MgO producers (2006/2008). "Magnesia production from magnesite (natural process) and information regarding CO, noise emissions and sulphur content in the raw materials as well as additional information regarding dust emission levels achieved in a Spanish MgO plant by using fabric filters".
- 111 European Commission (2003). "Directive 2003/53/EC of the European Parliament amending the 26th time Council Directive 76/769/EEC relating to restrictions on the marketing and use of certain dangerous substances and preparations (nonylphenol, nonyl ; phenol ethoxylate and cement)".
- 112 Czech Republic (2006). "The cement industry in the Czech Republic".
- 113 Ireland (2007). "Report of PM 10's and PM 2.5's from air emission point".
- 114 Sweden (2006). "SNCR technique and NOx emissions in Swedish cement plants".
- 116 France (2002). "The French Cement Industry Guide to NOx Emission Reduction Measures".
- 117 Germany (2000). "Grundsatzuntersuchung über die Ermittlung der Korngrößenverteilung im Abgas verschiedener Emittenten".
- 118 Germany (2007). "Additional contributions regarding cement production, e.g. white cement manufacture, dedusting cement kilns with fabric filters, surface filters, sintered lamella filters".
- 119 Sobolev, K. (2001). "White cement : Problems of production and quality", Cement and Concrete World, Turkey, pp. pp. 34-42.
- 120 Spain (2007). "Information on white cement production".
- 122 European Commission (2004). "European Commission's Decision of 29 January 2004 establishing guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council".
- 123 Ireland (2005). "Contributions regarding summary statement following short term SNCR

- trials at Limerick Works of Irish Cement".
- 124 European Commission (2001). "Reference Document on the Best Available Technique in the Pulp and Paper Industry".
- 125 European Commission (2006). "Reference Document on the Best Available Technique in the Food, Drink and Milk Industry".
- 126 Oates, J. A. H. (1998). "Lime and Limestone : Chemistry and Technology, Production and Uses", ISBN-10 : 3527295275/ ISBN-13 : 978-3527295272.
- 127 Portugal (2007). "Portuguese Natural Hydraulic Lime Plants - volatile organic carbon emissions".
- 128 Portugal (2007). "Portuguese Natural Hydraulic Lime Plants - carbon monoxide emissions".
- 129 EuLA (2006). "Database emissions from lime kilns".
- 130 Drnek/Maier (2007). "The impact of environmental legislation on the economics of magnesita production".
- 131 YARA, M. R. L. (2007). "Contribution on cement and lime industries, SNCR in cement and lime production - reducing agents".
- 132 CEMBUREAU/Federhen (2007). "Contribution : Dry scrubber".
- 133 CEMBUREAU/Federhen (2007). "Co-generation of power from waste heat".
- 134 CEMBUREAU/Federhen (2007). "Technical application of fibres in cement manufacturing process and cement works".
- 135 CEMBUREAU/Federhen (2007). "Contribution : Hybrid dust collector".
- 136 European Commission, C., March Consulting Group, MAIN Management e Ingeniería Consultores (1993). "Energy Technology in the Cement Industrial Sector", Final Report, Contract No XVII/4. 1 000/E/9 1-16.
- 137 Klein/Hoenig (2006). "Model calculation of the fuel requirement for the clinker burning process", Cement International, reprint from 3/2006, FIZ 2006, pp. 44-63.
- 138 Italy (2007). "Raw materials for white clinker production in Italy".
- 139 Italy (2007). "Italian lime production".
- 140 Italy (2007). "Cement plant-Monselice Cement Works, SCR installation".
- 141 Leibacher/Bellin/Linero (2007). "High dust SCR succeeds at Cementeria di Monselice".
- 142 EnvNGO/Tebert (2007). "CO-Minderung bei Kalköfen".
- 143 Williams, P. T. (2005). "Waste Treatment Disposal", 0470849126.
- 144 Adlhoch, H.-J. (1996). "Sinterlamellenfilter in der Zementindustrie", ZKG International, Nr. 10/1996, pp. 594-601.
- 145 Leibinger/Köberl (2001). "Neuartiges Energie-Minimierungskonzept für Ofenfilter in der Zementindustrie", ZKG International, No. 11/2001, pp. 618-629.
- 146 Leibinger/Neumann (2003). "Kostenreduktion durch höheres Leistungspotential bei Prozessfiltern in der Zementindustrie", ZKG International, No. 2/2003, pp. 44-52.
- 147 Marmor/Petzold (2006). "Wirtschaftliche Entstaubung mit Oberflächenfiltern, Teil 3", ZKG International, No. 10/2006, pp. 82-87.
- 148 Reitemeier (2005). "Neue Hochleistungs-Entstaubungsanlagen im Holcim-Zementwerk Dudfield", ZKG International, No. 8/2005, pp. 75-79.
- 149 CEN/EN 197-1 (2000). "Cement-Part 1 : European Norm on composition, specifications and conformity criteria for common cements".
- 150 Fabrellas/Larrazabal/Martinez/Sanz/Ruiz/Abad/Rivera (2004). "Global Assessment of

-
- PCDD/F emissions from the Spanish cement sector. Effect of conventional/alternative fuels".
- 151 European Commission (2003). "Reference Document on the General Principles of Monitoring".
 - 152 Germany (2007). "Lime Manufacturing Industries - Reduction of NO_x emissions at a rotary kiln with preheater by using the SNCR technique (practical experience)".
 - 153 Castle Cement UK, P. W. (2007). "Application for variation to IPPC permit BL 1096, Solid Recovered Fuel (SRF) on kiln 4".
 - 154 CEMEX UK (2006). "Application for a variation under PPC to allow use of a fuel known as Climafuel", Permit BL 7248.
 - 155 Germany (2007). "Lime manufacturing industries - Co-incineration of waste".
 - 156 Germany (2007). "Lime manufacturing industries - German example for the use of solid wastes as fuels in a rotary kiln (additions)".
 - 157 Germany (2007). "Lime manufacturing industries - Minimisation of nitrogen oxide emissions by low NO_x burners at annular shaft kilns".
 - 158 Germany (2007). "Cement Manufacturing Industries - Duration and frequency of CO trips".
 - 159 Ireland (2006). "Reports of CO emissions because of CO trips from cement plants in Ireland".
 - 160 Germany (2007). "German experience with a 6 months SNCR performance test".
 - 161 Austria (2006). "Operation and permit data from EIA from Austrian cement plants Wietersdorf (Wietersdorfer&Peggauer Zementwerke GMBH) and Retznei (Lafarge Perlmooser AG)".
 - 162 A TEC (2006). "Modernisation of Wietersdorfer and Peggauer Zementwerke GmbH (CEMTECH Conference Rome 2006)".
 - 163 Castle Cement UK (2006). "Information on energy demand at Padeswood plant, Castle Cement UK".
 - 164 Rheinkalk, W. F. (2007). "Beurteilung der Messungen von Emissionen und Verbrennungsbedingungen für den Zeitraum 01.01.2006 bis 31.12.2006, Kalk-Drehrohrofenanlage-Werk Flandersbach".
 - 165 EUROMINES (2006). "Magnesia production from magnesite (natural process)".
 - 166 European Commission (1995). "Council Regulation (EC) no 384/96 of 22 December 1995 on protection against dumped imports from countries not members of the European Community", Official Journal L 056, 06/03/1996 P. 0001 - 0020.
 - 167 European Commission (2005). "Council Regulation (EC) No 778/2005 of 23 May 2005 imposing a definitive anti-dumping duty on imports of magnesia oxide originating on the People's Republic of China", Official Journal L 131, 25/05/2005 P. 0001 - 0017.
 - 168 TWG CLM (2007). "Merged and sorted comments master spread sheet on draft 1 and information".
 - 169 Italy (2007). "Information on costs for PFRK (lime) provided with the comments for draft 1 of the revised BREF".
 - 170 Austria (2007). "Contribution on waste input criteria 2007".
 - 171 A TEC (2007). "Statement regarding energy use in the cement plant W&P in Austria".
 - 172 France (2007). "Emissions of particles (PM 10 and PM 2.5) in the cement industry".
 - 173 Germany (2007). "Abschlussbericht zum Forschungsprojekt : "Möglichkeit und Grenzen der SNCR Technik bei einer klassischen Drehofenanlage der Zementindustrie" im Zementwerk Harburg der Märker Zement GmbH".

Références

-
- 174 EUCOPRO (2007). "Examples of waste input criteria from several EU Member States".
- 175 Lafarge (2007). "Information regarding SOx emissions at Retznei works in Austria".
- 176 France (2008). "Contributions regarding emerging techniques in the cement industry (reduction of SOx, dust emissions)".
- 177 EULA (2008). "Updated contributions regarding lime manufacturing, e.g. improvement on energy efficiency in lime kilns, figure on the lime manufacturing process, dust emissions data from UK (using wet scrubbers)".
- 178 CEMBUREAU (2008). "Use of waste fuels in cement kilns (Co-processing of waste in cement kilns) - Ökopol Waste Incineration Assessment".
- 179 European Commission (2006). "Reference Document on Economics and Cross-Media Effects".
- 180 Mauschitz (2004). "Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie V".
- 181 European Commission (2008). "Reference Document on the Best Available Techniques in Energy Efficiency".
- 182 TWG CLM (2008). "Merged and sorted comments master spread sheet on second part of draft 1 and information".
- 183 Szednyj/Schindler (2005). "Minderungspotentiale der NEC-Gase und Staub bis 2010 der Österreichischen Zementindustrie", Berichte BE-261.
- 184 CEN standard EN-1948 (2007). "Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of PCDDs/PCDFs and dioxin-like PCBs - Part 4 : Sampling and analysis of dioxin-like PCBs".
- 185 Hackl und Mauschitz (2003). "Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie IV".

GLOSSAIRE DE TERMES ET ABREVIATIONS

TERME OU ABREVIATION	SIGNIFICATION
% /p	pourcentage en poids
% /v	pourcentage en volume
µm	micromètre (1 µm= 10 ⁻⁶ m)
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AEE	Agence européenne pour l'environnement
AELE	Association européenne de libre échange (créée le 3 mai 1960)
AFR	combustibles et matières premières de substitution
air de fuite	Air qui pénètre dans le four par suite d'une fuite
alliage	métal correspondant à l'association, en solution ou sous forme de composé, de deux ou plusieurs éléments dont au moins un métal, et où la matière obtenue possède des propriétés métalliques
ATILH	Association Technique de l'Industrie des Liant Hydrauliques
ASK	Four vertical annulaire
atm	atmosphère normale (1 atm = 101 325 N/m ²)
Avantages pour l'environnement	le ou les principaux impacts environnementaux ciblés par une technique (procédé ou réduction), y compris les valeurs d'émission obtenues et les performances en terme d'efficacité. Avantages environnementaux de cette technique par rapport à d'autres
AWDF	combustibles issus de déchets agricoles
bar	bar (1,013 bar = 1 atm)
BREF	document de référence sur les meilleures techniques disponibles
BUWAL	<i>Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft</i> /Office fédéral de l'environnement (Suisse)
°C	Degré Celcius
calcaire	roche minérale constituée principalement de CaCO ₃ et utilisée telle quelle ou comme matière première pour produire de la chaux vive (oxyde de calcium) par décarbonatation et de la chaux éteinte (hydroxyde de calcium) par hydratation de la chaux vive
calcaire siliceux	calcaire contenant du dioxyde de silicium (SiO ₂)
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique
CED	Catalogue européen des déchets – liste hiérarchique des déchets par description. Ce catalogue classe les déchets par catégorie selon leur mode de production et leurs caractéristiques. Plusieurs Directives européennes et Décisions de la Commission en matière de gestion des déchets y font référence.
CEI	Communauté des états indépendants : Azerbaïdjan, Arménie, Bélarus, Russie, Kazakhstan, Kirghizistan, Tadjikistan, Turkménistan, Ouzbékistan, Ukraine
CEN/TC 343	Comité européen de normalisation Groupe de travail CEN/TC 343 « Combustibles solides de récupération » mandaté par la Commission européenne pour élaborer et produire l'ensemble des normes nécessaires relatives aux combustibles solides de récupération (CSR), notamment les spécifications techniques qui seront transformées en normes (normes européennes (EN)) après validation.
chaux hydratée	Hydroxyde de calcium, Ca(OH) ₂
chaux vive	oxyde de calcium, CaO
ciment pouzzolanique	Les ciments pouzzolaniques sont des mélanges de ciment Portland et d'un matériau pouzzolanique, naturel ou artificiel. Les pouzzolanes naturelles comptent surtout des matériaux d'origine volcanique, ainsi que certaines terres à diatomées. Les pouzzolanes artificielles contiennent des cendres volantes, des argiles calcinées et des schistes.
CKD	Poussière de four cimentier
CL 70 – 80	norme de classification : CL 70 = chaux définie dans la norme EN 459 « chaux de construction » comme ayant une teneur en CaO + MgO supérieure à 65 % CL 80 = chaux définie dans la norme EN 459 « chaux de construction » comme ayant une teneur en CaO + MgO supérieure à 75 %
conditions de référence pour les industries du ciment et de	correspondent à une température de 273,15 K, une pression de 1 013 hPa et une teneur en oxygène de 10 %

Glossaire

TERME OU ABBREVIATION	SIGNIFICATION
l'oxyde de magnésium	
conditions de référence pour l'industrie de la chaux	correspondent à une température de 273,15 K, une pression de 1 013 hPa et une teneur en oxygène de 11 %
COT	carbone organique total
COV	composés organiques volatils
craie	carbonate de calcium de type amorphe
cSt	centistoke (viscosité)
dB(A)	Décibel, unité utilisée pour décrire et mesurer des niveaux sonores (bruit) au moyen d'un filtre de niveau sonore à échelle A (correspondant à l'inverse de la courbe isosonique de 40 dB (à 1 kHz)).
DBM	Magnésie calcinée à mort
diagenèse	processus physiques, chimiques ou biologiques par lesquels des sédiments sont transformés en roche sédimentaire par modification de leur minéralogie et/ou de leur texture.
DL 80 – 85	Norme de classification : DL 80 = chaux dolomitique définie dans la norme EN 459 « chaux de construction » comme ayant une teneur en CaO + MgO supérieure à 75 % DL 85 = chaux dolomitique définie dans la norme EN 459 « chaux de construction » comme ayant une teneur en CaO + MgO supérieure à 80 %
dolomie	type de calcaire dont la fraction carbonatée est dominée par la dolomie minérale, carbonate de calcium et de magnésium [CaMg(CO ₃)]
DSM	déchets solides municipaux
effets croisés	calcul des effets sur l'environnement des émissions dans l'eau/l'air/le sol, de la consommation d'énergie, de la consommation de matières premières, du bruit et du soutirage de l'eau (soit la totalité des exigences de la directive IPPC)
EGTEI	Groupe d'experts européen sur les aspects technico-économiques
EINICS	Inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes ; il s'agit d'un numéro d'enregistrement attribué à chaque substance chimique commercialisée dans l'Union européenne entre le 1er janvier 1971 et le 18 septembre 1981. Cet inventaire a été remplacé par l'ELINCS.
EIPPCB	Bureau européen pour la prévention et le contrôle intégrés de la pollution
ELINCS	Le 19 septembre 1981, l'inventaire européen des substances chimiques signalées était remplacé par ELINCS. Toute « nouvelle » substance introduite sur le marché européen reçoit un numéro ELINCS après avoir été signalée auprès de la Commission européenne.
émissions canalisées	rejets de substances polluantes dans l'environnement par n'importe quel type de canalisation, indépendamment de la forme de sa section [151, Commission européenne, 2003]
émissions diffuses	émissions résultant d'un contact direct entre des substances volatiles ou des poussières légères et l'environnement (l'atmosphère, dans des conditions normales d'exploitation). Ces émissions peuvent résulter : de la conception intrinsèque du matériel (filtres, séchoirs, etc.), des conditions d'exploitation (par exemple le transfert de matières entre différents réceptacles), du type d'opération (par exemple des activités d'entretien), ou d'un rejet progressif vers d'autres milieux (par exemple dans de l'eau de refroidissement ou dans des eaux usées) [151, Commission européenne, 2003]. Les émissions fugitives sont un sous-ensemble des émissions diffuses.
émissions fugitives	Emissions provoquées par un matériel non étanche ou une fuite : rejets dans l'environnement dus à une perte progressive d'étanchéité d'un matériel destiné à contenir un fluide captif (gazeux ou liquide) essentiellement provoquée par une différence de pression et par la fuite qu'elle engendre. Exemples d'émissions fugitives : fuite d'une vanne, d'une pompe, d'un matériel étanché ou serré, etc. [151, Commission européenne, 2003]
EPA	Agence américaine de protection de l'environnement
eqC	équivalent carbone
ESP	filtre électrostatique
état normal - standard	correspond à une température de 273,15 K et une pression de 1 013 hPa
EUR	Euro – devise européenne
EURITS	Union européenne du traitement par incinération des déchets industriels spéciaux
FGD	désulfuration des gaz de carneau

TERME OU ABBREVIATION	SIGNIFICATION
FGT	traitement des gaz de carneau
fioul EL	fioul extra léger
GAINS	Modèle des interactions et synergies entre les gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique
gaz de carneau	effluents gazeux rejetés au cours des procédés de cuisson ou de combustion
gaz d'exhaure	effluents gazeux rejetés au cours des procédés de cuisson ou de combustion
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GSC	Calcination avec mise en suspension par le gaz
GTT	groupe de travail technique
IEF	Forum d'échange d'informations (organe consultatif informel dans le cadre de la directive IPPC)
immission	Présence et niveau d'une substance polluante, d'odeurs ou de bruit dans l'environnement
installation	unité technique fixe où se déroulent une ou plusieurs des activités figurant à l'annexe I de la directive IPPC ainsi que toutes les autres activités directement associées, qui sont liées du point de vue technique aux activités exercées sur le site et susceptibles d'influer sur les émissions et la pollution
installation existante	installation qui, au 30 octobre 1999, dans le cadre de la législation existante avant cette date, était en service ou avait reçu une autorisation ou encore, de l'avis de l'autorité compétente, faisait l'objet d'une demande complète d'autorisation, à condition que cette installation soit mise en service au plus tard le 30 octobre 2000 [Directive IPPC (2008/1/CE)].
IPPC	prévention et contrôle intégrés de la pollution
I-TEQ	équivalent toxique international
IUPAC	Union internationale de chimie pure et appliquée
K	potassium ; degré Kelvin (0 °C = 273,15 K)
kcal	kilocalorie (1 kcal = 4,19 kJ)
kg	kilogramme (1 kg = 1 000 g)
kJ	kilojoule (1 kJ = 0,24 kcal)
KOH	hydroxyde de potassium
kWh	kilowatt-heure (1 kWh = 3 600 kJ = 3,6 MJ)
L.O.I./LOI	<i>loss on ignition</i> - perte au feu ; technique permettant le dosage, par exemple, d'une matière organique, des carbonates, du CO ₂
LRK	Four long rotatif
m	mètre
m/min	mètre/minute
m ²	mètre carré
m ³	mètre cube
m ³ /h	débit volumétrique : sauf indication contraire dans le présent document, le débit volumétrique correspond à 10 % en volume d'oxygène et à l'état standard
magnésie	oxyde de magnésium (MgO)
magnésite	carbonate de magnésium (MgCO ₃)
MEB	micrographe électronique à balayage
MFSK	Four vertical à alimentation mixte
meilleures techniques disponibles	MTD (Directive IPPC) – stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base de valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble
mesure ponctuelle	prélèvement d'échantillons en plusieurs points et non de façon continue
mesures/techniques	voir technique
mg	milligramme (1 mg = 10 ⁻³ gramme)
mg/m ³	Concentration : sauf indication contraire dans le présent document, les concentrations de substances ou de mélanges gazeux se réfèrent à des gaz de carneau secs à 10 % en volume d'oxygène et à l'état standard.
MJ	mégajoule (1 MJ = 1 000 kJ = 10 ⁶ joules)

Glossaire

TERME OU ABBREVIATION	SIGNIFICATION
mm	millimètre (1 mm = 10 ⁻³ m)
mmWG	millimètre de colonne d'eau
morphologie	étude de la structure et de la forme des particules
Mt	mégatonne (1 Mt = 10 ⁶ tonnes)
MTD (BAT)	meilleures techniques disponibles
MW	mégawatt
NEA MTD (BAT AEL)	niveaux d'émission associés aux meilleures techniques disponibles
ng	nanogramme (1 ng = 10 ⁻⁹ gramme)
Nm ³	mètre cube normal (101,3 kPa, 273 K)
Numéro CAS	Numéro d'enregistrement auprès du Chemical Abstract Service, une division de l'American Chemical Society ; ce numéro donne accès à de très nombreuses informations relatives à telle ou telle substance chimique ; c'est un identifiant numérique unique utilisé pour les composés chimiques, polymères, séquences biologiques, mélanges et alliages et qui désigne une seule substance.
numéro CE	Désigne un code à sept chiffres qui a été attribué par la Commission des Communautés européennes aux substances chimiques commercialisées au sein de l'Union européenne. L'appellation « numéro CE » remplace les appellations « numéro EINECS » et « numéro ELINCS », et ce code inclut les substances de la liste dite des « ex-Polymères », une liste de substances qui se trouvaient sur le marché européen entre le 18 septembre 1981 et le 31 octobre 1993 et étaient considérés à cette époque comme des polymères, mais qui ne le sont plus.
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OECD Mix	mélange d'énergies primaires provenant des pays de l'OCDE
ORC	Cycle organique de Rankine
OSK	Autre four vertical
oxyde de magnésium	MgO/magnésie
PCB	polychlorobiphényles
PCC	carbonate de calcium précipité
PCDD	polychlorodibenzo-p-dioxine
PCDF	polychlorodibenzofurane
PCN	pouvoir calorifique (net)
PCP	pentachlorophénol
PCT	polychloroterphényles
PET	polyéthylène téréphtalate
PF	combustible pulvérisé
PFRK	Four vertical à cycles alternés
pH	symbole de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution. Il s'agit d'un nombre équivalent au logarithme en base 10 de la réciproque de la concentration en ions hydrogène dans une solution aqueuse
PLC	Contrôleur à logique programmable : ordinateur numérique utilisé pour l'automatisation des procédés industriels.
PM	particules/poussières en suspension
podzol	argile décolorante
polluant	substance individuelle ou groupe de substances susceptible de porter atteinte à l'environnement
POP	polluants organiques persistants
pouvoir calorifique	exprimé, dans le présent document, en pouvoir calorifique net
pouzzolane	Bien que n'étant pas hydrauliques à proprement parler, les pouzzolanes sont des matériaux qui contiennent de la silice (et de l'alumine) sous une forme réactive, laquelle permet une combinaison avec de la chaux en présence d'eau afin de former des composés aux propriétés hydrauliques. Une pouzzolane naturelle se compose essentiellement d'une terre volcanique fine d'un rouge chocolaté. Il a été mis au point une pouzzolane artificielle qui combine de la cendre volante et du laitier de haut-fourneau refroidi par trempé.
ppm	parties par million
PRK	Four rotatif avec préchauffeur

TERME OU ABBREVIATION	SIGNIFICATION
PTFE	polytétrafluoroéthylène
PVC	chlorure de polyvinyle
RAINS	Modèle régional d'information et de simulation de la pollution atmosphérique
RD de Corée	République démocratique de Corée
RDF	combustible issu de déchets ; déchet combustible issu de fractions de déchets prétraitées et triées.
RK	Four rotatif
RK burner	Brûleur de four rotatif
SCR	réduction catalytique sélective
SME	système de management environnemental
SNCR	réduction non catalytique sélective
sources d'émissions diffuses	sources d'émissions similaires diffuses ou directes qui sont multiples et réparties à l'intérieur d'une zone définie ; ces sources peuvent être ponctuelles, linéaires, superficielles ou volumiques [151, Commission européenne, 2003].
SSCE	systèmes de surveillance continue des émissions
StDev	écart-type
surveillance	procédé destiné à évaluer ou à déterminer la valeur réelle et les variations d'une émission ou d'un autre paramètre, en se basant sur des opérations systématiques, périodiques ou ponctuelles de surveillance, de contrôle, de prélèvement et de mesure, ou autre méthode d'évaluation destinée à fournir des indications sur les quantités émises et/ou sur les tendances des polluants rejetés
t	tonne (métrique)
t60	réactivité de la chaux ; indique le temps que met la chaux vive pour chauffer de 20 à 60 °C en réaction avec de l'eau
TCDD	tétrachlorodibenzodioxine
TE	équivalents de toxicité (dioxines et furanes)
technique	aussi bien les différentes utilisations de la technologie que la façon dont l'installation est conçue, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt
TEQ	équivalents internationaux de toxicité (dioxines et furanes)
UBA	<i>Umweltbundesamt</i> /Agence fédérale de l'environnement
UE	Union européenne
UE des 23+	États membres du Cembureau : Autriche, Belgique, Croatie, République tchèque, Danemark, Estonie, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Luxembourg, Pays-Bas, Norvège, Pologne, Portugal, Roumanie, Slovénie, Espagne, Suède, Suisse, Turquie et Royaume-Uni.
UE des 25	Etats membres de l'Union européenne du 1 ^{er} mai 2004 au 31 décembre 2006
UE des 27	Etats membres de l'Union européenne depuis le 1 ^{er} janvier 2007
UE des 15	Etats membres de l'Union européenne avant le 1 ^{er} mai 2004
VDZ	<i>Verein Deutscher Zementwerke</i> /Association allemande des producteurs de ciment
VLE	valeur limite d'émission
WDF	combustible issu de déchets ; déchet combustible issu de fractions de déchets prétraitées et triées
WID	Directive sur l'incinération des déchets
Ωcm	ohm centimètre, unité de résistivité

SYMBOLES CHIMIQUES

Ag	argent
Al	aluminium
Al ₂ O ₃	oxyde d'aluminium
As	arsenic
Ba	baryum
Be	béryllium
Ca	calcium
CaCO ₃	carbonate de calcium
CaO	oxyde de calcium
Ca(OH) ₂	hydroxyde de calcium
CaMg(OH) ₄	hydroxyde de calcium et de magnésium
Cd	cadmium
CH ₄	méthane
CN	cyanure
Co	cobalt
CO	monoxyde de carbone
CO ₂	dioxyde de carbone
Cr	chrome
Cu	cuivre
F	fluor
Fe	fer
Fe ₂ O ₃	oxyde de fer
HCl	acide chlorhydrique
HF	acide fluorhydrique
Hg	mercure
H ₂ O	eau
H ₂ S	sulfure d'hydrogène
MgCO ₃	carbonate de magnésium
MgO	oxyde de magnésium/magnésie
Mn	manganèse
Mo	molybdène
N ₂	azote
Na	sodium
Ni	nickel
NH ₃	ammoniac
NH ₄	ammonium
NO	monoxyde d'azote
NO ₂	dioxyde d'azote
NO _x	oxydes d'azote
O	oxygène
Pb	plomb
Pd	palladium
Pt	platine
Rh	rhodium
Sb	antimoine (stibine)
Se	sélénium
SiO ₂	dioxyde de silicium
Sn	étain

SO ₂	dioxyde de soufre
SO ₃	trioxyde de soufre
SO _x	oxydes de soufre
Te	tellure
Ti	titane
Tl	thallium
V	vanadium
Zn	zinc

4 ANNEXES

4.1 Législation sur l'environnement (CE) applicable à la production de ciment et de chaux dans l'UE des 27

- Directive 2000/76/CE du Conseil sur l'incinération des déchets (4 décembre 2000) ;
- Catalogue européen des déchets (CED), qui a été développé en vertu de l'article 1(a) de la Directive 75/442/CEE du Conseil sur les déchets :
 - Décision de la Commission 2000/532/CE en date du 3 mai 2000 remplaçant la Décision 94/3/CE établissant une liste de déchets en vertu de l'article 1(a) de la Directive 75/442/CEE du Conseil sur les déchets et la Décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux en vertu de l'article 1(4) de la Directive 91/689/CEE du Conseil sur les déchets dangereux (notification sous la référence de document C(2000) 1147) (Texte ayant une pertinence dans le cadre de la Zone économique européenne)
- Directive 2004/8/CE du Conseil sur la promotion de la cogénération basée sur les besoins en chaleur utile sur la totalité du marché de l'énergie, et amendant la Directive 92/42/CEE (11 février 2004).

4.2 Annexe : Fabrication du ciment

4.2.1 Regroupements des déchets combustibles selon le CEMBUREAU et selon le CED

Groupe 1 : bois, papier, carton		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 02	Déchets issus de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche, de la préparation et de la transformation des aliments	
02 01 07	Déchets issus de l'exploitation forestière	
Catégorie 03	Déchets issus de la transformation du bois et de la fabrication des panneaux et des meubles, de la pâte à papier, du papier et du carton	
03 01 02	Sciure	
03 01 03	Copeaux, chutes, gros bois endommagé/aggloméré/placage	
03 03 07	Rejets issus du recyclage du papier et du carton	
Catégorie 15	Déchets d'emballage ; absorbants, chiffons, matériaux filtrants et vêtements de protection autres	
15 01 01	Emballages en papier et en carton	
15 01 03	Emballages en bois	
Catégorie 17	Déchets de construction et de démolition (y compris les déblais de sites contaminés)	
17 02 01	Bois	
Catégorie 20	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets commerciaux, industriels et institutionnels similaires), y compris les fractions collectées séparément	
20 01 01	Papier et carton	
20 01 37	Bois contenant des substances dangereuses	*
Groupe 2 : Textiles		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 04	Déchets issus de l'industrie du cuir, de la fourrure et du textile	
04 02	Déchets issus de l'industrie textile	
Catégorie 15	Déchets d'emballage ; absorbants, chiffons, matériaux filtrants et vêtements de protection autres	
15 01 09	Emballages textiles	
Catégorie 19	Déchets issus des installations de management de déchets, des usines de traitement des eaux usées hors site, et du traitement de l'eau destinée à la consommation par l'homme, et de l'eau destinée à un usage industriel	
19 12 08	Textiles	
Catégorie 20	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets commerciaux, industriels et institutionnels similaires), y compris les fractions collectées séparément	
20 01 10	Vêtements	
Groupe 3 : Plastiques		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 02	Déchets issus de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche, de la préparation et de la transformation des aliments	
02 01 04	Déchets plastiques	
Catégorie 12	Déchets issus de la mise en forme et du traitement de surface physique et mécanique des métaux et des plastiques	
12 01 05	Particules de plastique	
Catégorie 15	Déchets d'emballage ; absorbants, chiffons, matériaux filtrants et vêtements de protection autres	
15 01 02	Emballages en plastique	
Catégorie 20	Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets commerciaux, industriels et institutionnels similaires), y compris les fractions collectées séparément	
Groupe 4 : Combustibles dérivés de déchets		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 15	Déchets d'emballage ; absorbants, chiffons, matériaux filtrants et vêtements de protection autres	

Annexes

15 01 06	Emballages mixtes	
Catégorie 19	Déchets issus du traitement physico-chimique des déchets (y compris le déchromage, la décyanuration, la neutralisation)	
19 02 10	Déchets combustibles autres que ceux mentionnés en 19 02 08 en 19 02 09	
19 12 10	Déchets combustibles (combustibles dérivés de déchets)	
Catégorie 20	Déchets municipaux et déchets commerciaux, industriels et institutionnels similaires, y compris les fractions collectées séparément	
20 03 01	Déchets mixtes	
Groupe 5 : Caoutchouc/pneumatiques		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 16	Déchets autres que ceux mentionnés dans la liste	
16 01 03	Pneumatiques en fin de vie	
16 01 04	Déchets en caoutchouc (courroies transporteuses, etc.)	
16 02 16	Composants retirés des équipements mis au rebut et autres que ceux mentionnés en 16 02 15	
Groupe 6 : Boues industrielles (gâteaux de filtres, boues centrifugées, séchées, etc.)		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 03	Déchets issus de la transformation du bois et de la fabrication du papier, du carton, de la pâte à papier, des panneaux et des meubles	
03 03 02	Boues de liqueurs vertes	
Catégorie 04	Déchets issus de l'industrie du cuir, de la fourrure et du textile	
04 02 19	Boues issues du traitement des eaux usées sur site et contenant des substances dangereuses	*
04 02 20	Boues issues du traitement des eaux usées sur site et autres que celles mentionnées en 04 02 19	
Catégorie 05	Déchets issus du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon	
05 01 09	Boues issues du traitement des eaux usées sur site et contenant des substances dangereuses	*
05 01 10	Boues issues du traitement des eaux usées sur site et autres que celles mentionnées en 05 01 09	
Catégorie 06	Déchets issus des processus chimiques inorganiques	
06 05	Boues issues du traitement des eaux usées sur site	
Catégorie 07	Déchets issus des processus chimiques organiques	
07xx 11	Boues issues du traitement des eaux usées sur site et contenant des substances dangereuses	*
07xx 12	Boues issues du traitement des eaux usées sur site et autres que celles mentionnées en 07 xx 11	
Catégorie 08	Déchets issus de la fabrication, de la formulation, de la fourniture et de l'utilisation (MFSU) des revêtements (peintures, vernis et émail vitrifié), des adhésifs, des mastics et des encres d'impression	
Catégorie 10	Déchets inorganiques issus des processus thermiques	
Catégorie 11	Déchets contenant des métaux inorganiques et issus du traitement du métal et du revêtement des métaux, et de l'hydrométallurgie non ferreuse	
Catégorie 12	Déchets issus de la mise en forme et du traitement de surface des métaux et des plastiques	
Catégorie 13	Déchets pétroliers (à l'exception des huiles alimentaires, 05 et 12)	
Catégorie 14	Déchets issus des substances organiques utilisées comme solvants (excepté 07 et 08)	
Groupe 7 : Boues issues des stations urbaines		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 19	Déchets issus des installation de traitement des déchets, des sites de traitement des eaux usées hors site, et de l'eau industrielle	
19 03 07	Déchets solidifiés autres que ceux mentionnés en 19 03 06 (utilisés pour les eaux d'égout traitées)	
19 02 05	Boues issues du traitement physico-chimique et contenant des substances dangereuses*	
19 02 06	Boues issues du traitement physico-chimique et autres que celles mentionnées en 19 02 05	
19 08 05	Boues issues du traitement des eaux usées urbaines	
Groupe 8 : Farines et graisses animales		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 02	Déchets issus de l'agriculture, de l'horticulture, de la chasse, de la pêche et de la production primaire	

	aquacole, de la préparation et de la transformation des aliments	
02 01 02	Farines animales	
02 02 02	Graisses animales	
Groupe 9 : Déchets issus du charbon/du carbone		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 05	Déchets issus du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon	
05 06 01	Goudrons	*
05 06 02	Asphalte	
Catégorie 19	Déchets issus des installations de traitement de déchets, des sites de traitement des eaux usées hors site, et de l'industrie de l'eau	
19 01 10	Charbon actif usagé issu du traitement des gaz résiduels	
19 01 17	Déchets de pyrolyse	*
19 09 04	Charbon actif usagé	
Groupe 10 : Déchets agricoles		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 02	Déchets issus de l'agriculture, de l'horticulture, de la chasse, de la pêche et de la production primaire aquacole, de la préparation et de la transformation des aliments	
02 01 03	Déchets agrochimiques	
02 01 05	Déchets issus des pesticides	*
02 01 07	Déchets issus de l'exploitation forestière	
Catégorie 03	Déchets issus de la transformation du bois et de la fabrication du papier, du carton, de la pâte à papier bois, des panneaux et des meubles	
03 01 01	Déchets d'écorces et de liège	
03 03 01	Écorces	
Groupe 11 : Déchets combustibles solides (sciure imprégnée)		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 03	Déchets issus de la transformation du bois et de la fabrication du papier, du carton, de la pâte à papier, des panneaux et des meubles	
03 01 02	Sciure imprégnée	
Catégorie 19	Déchets issus des installations de traitement de déchets, des sites de traitement des eaux usées hors site, et de l'industrie de l'eau	
19 12 11	Autres déchets (y compris les mélanges de matériaux) issus du traitement mécanique des déchets contenant des substances dangereuses	*
Groupe 12 : Solvants et déchets connexes		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 02	Déchets issus de l'agriculture, de l'horticulture, de la chasse, de la pêche et de la production primaire aquacole, de la préparation et de la transformation des aliments	
02 03 03	Déchets issus de l'extraction de solvants	
Catégorie 07	Déchets issus des processus chimiques organiques	
07 01 04	Autres solvants organiques, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 01 08	Autres résidus et résidus de réactions	*
07 03 04	Autres solvants organiques, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 03 07	Résidus et résidus de réactions halogénés	*
07 03 08	Autres résidus et résidus de réactions	*
07 04 03	Solvants organiques halogénés, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 04 04	Autres solvants organiques, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 04 07	Résidus et résidus de réactions halogénés	*
07 04 08	Autres résidus et résidus de réactions	*
07 05 03	Solvants organiques halogénés, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 05 04	Autres solvants organiques, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 05 07	Résidus et résidus de réactions halogénés	*

Annexes

07 05 08	Autres résidus et résidus de réactions	*
07 06 03	Solvants organiques halogénés, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 06 04	Autres solvants organiques, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 06 07	Résidus et résidus de réactions halogénés	*
07 06 08	Autres résidus et résidus de réactions	*
07 07 03	Solvants organiques halogénés, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 07 04	Autres solvants organiques, liquides de nettoyage et liqueurs mères	*
07 07 07	Résidus et résidus de réactions halogénés	*
07 07 08	Autres résidus et résidus de réactions	*
Catégorie 08	Déchets issus de la fabrication, de la formulation, de la fourniture et de l'utilisation (MFSU) des revêtements (peintures, vernis et émail vitrifié), des adhésifs, des mastics et des encres d'impression	
08 01 11	Déchets de peintures et de vernis contenant des solvants organiques ou d'autres substances dangereuses	*
08 01 12	Déchets de peintures et de vernis autres que ceux mentionnés en 08 01 11	
08 01 21	Déchets de peintures ou de décapants pour vernis	*
08 03 01	Déchets d'encres contenant des solvants halogénés	*
08 03 02	Déchets d'encres contenant des solvants non halogénés	*
08 03 10	Déchets de solvants organiques utilisés pour le nettoyage	*
08 04 09	Déchets d'adhésifs et de mastics contenant des solvants organiques ou d'autres substances dangereuses	*
08 05 01	Déchets d'isocyanures	*
Catégorie 09	Déchets issus de l'industrie de la photographie	
09 01 03	Révélateurs à base de solvants	*
Catégorie 14	Déchets issus des substances organiques utilisées comme solvants (excepté 07 et 08)	
14 01 02	Autres solvants et mélanges de solvants halogénés	*
14 01 03	Autres solvants et mélanges de solvants	*
14 02 01	Solvants et mélanges de solvants halogénés	*
14 02 02	Mélanges de solvants ou liquides organiques exempts de solvants halogénés	*
Catégorie 19	Déchets issus des installations de traitement de déchets, des sites de traitement des eaux usées hors site, et de l'industrie de l'eau	
19 02 08	Déchets combustibles liquides contenant des substances dangereuses	*
Catégorie 20	Déchets municipaux et déchets commerciaux, industriels et institutionnels similaires, y compris les fractions collectées séparément	
20 01 13	Solvants	*
20 01 27	Peintures, encres, adhésifs et résines contenant des substances dangereuses	*
20 01 28	Peintures, encres, adhésifs et résines autres que ceux mentionnés en 20 01 27	
Groupe 13 : Huiles et déchets huileux		
Catégorie de déchets	Description des déchets	Dangereux
Catégorie 01	Déchets issus de l'exploration, de l'extraction, de la préparation et de tout autre traitement des minéraux et des carrières	
Catégorie 04	Déchets issus de l'industrie du cuir, de la fourrure et du textile	
Catégorie 05	Déchets issus du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon	
Catégorie 12	Déchets issus de la mise en forme et du traitement de surface des métaux et des plastiques	
Catégorie 13	Déchets pétroliers (à l'exception des huiles alimentaires, 05 et 12)	
13 01 01	Huiles (y compris les émulsions), liquides de freins, etc.	*
13 01 02	Autres huiles hydrauliques chlorées (à l'exception des émulsions)	*
13 01 03	Huiles hydrauliques non chlorées (à l'exception des émulsions)	*
13 01 04	Émulsions chlorées	*
13 01 05	Émulsions non chlorées	*
13 01 06	Huiles hydrauliques contenant uniquement de l'huile minérale	*
13 01 07	Autres huiles hydrauliques	*

13 01 08	Liquides de freins	*
13 02 01	Huiles moteur, huiles pour engrenages et huiles de graissage chlorées	*
13 02 02	Huiles moteur, huiles pour engrenages et huiles de graissage non chlorées	*
13 02 03	Autres huiles moteur, huiles pour engrenages et huiles de graissage	*
13 03 01	Huiles isolantes ou huiles caloporteuses et autres liquides contenant des PCB	*
	ou des PCT	
13 03 02	Autres huiles isolantes et huiles caloporteuses chlorées et autres liquides	*
13 03 03	Huiles isolantes et huiles caloporteuses non chlorées et autres liquides	*
13 03 04	Huiles isolantes et huiles caloporteuses synthétiques et autres liquides	*
13 03 05	Huiles isolantes et huiles caloporteuses minérales	*
13 04 01	Huiles de fond de cale issues de la navigation intérieure	*
13 04 02	Huiles de fond de cale issues des égouts de jetées	*
13 04 03	Huiles de fond de cale issues des autres navigations	*
13 05 01	Solides de séparation de l'huile et de l'eau	*
13 06 01	Autres déchets d'huiles non spécifiés par ailleurs	*
Groupe 14 : Autres		

Tableau 4.1 : Regroupements des déchets combustibles selon le CEMBUREAU en fonction de ceux du CED

[91, CEMBUREAU, 2006]

4.2.2 Fabrication du ciment – données spécifiques aux unités

4.2.2.1 Exemples de types de déchets utilisés, influence sur les émissions et concentrations de substances dans les déchets (critères d'entrée)

Le tableau 4.2 contient des exemples de types et de quantités de déchets utilisés dans les fours à ciment allemands. Ces types de déchets comprennent souvent des composants dangereux.

Type de combustible dérivé de déchets	Quantité utilisée en 2004 (en kt/an)
Pneumatiques/caoutchouc	290
Huiles usagées	100
Fractions traitées de déchets industriels/commerciaux	863
Fractions traitées de déchets ménagers	157
Farines et graisses animales	439
Fragments de bois	42
Solvants	72
Podzol ¹⁾	11
Boues d'égouts	48
Autres	20
Total	2042
1) Argile décolorante	

Tableau 4.2 : Types et quantités de déchets et de déchets combustibles utilisés dans les fours à ciment allemands en 2004

[76, Allemagne, 2006]

Ces différents types de déchets combustibles solides et liquides comprennent également souvent des composants dangereux, comme cela est indiqué dans le tableau 4.3.

Types de combustibles		Quantité (kt/an)	
		2003	2004
Déchets combustibles liquides			
Huiles usagées	Déchets mélangés (dangereux)	116	100
Solvants usagés	Déchets mélangés – les mono-déchets inclus doivent être déclarés avec un code déchet (déchet dangereux)	48	72
Déchets combustibles solides			
Pneumatiques en fin de vie	Mono-déchets	247	290
Bois	Déchets mélangés – les mono-déchets inclus doivent être déclarés avec un code déchet (déchet pouvant être dangereux)	48	42
Farines animales	Mono-déchets	452	439
Boues d'égouts	Mono-déchets	4	48
Terre décolorante	Mono-déchets (dangereux)	20	11
Déchets spécifiques à une production	Déchets mélangés – les mono-déchets inclus doivent être déclarés avec un code déchet	626	862
Fractions séparées de déchets municipaux mixtes	La qualité du combustible dépend des étapes de traitement utilisées	155	157

Tableau 4.3 : Quantités de différents types de déchets combustibles utilisés dans l'industrie allemande du ciment [76, Allemagne, 2006]

En 2006, certaines cimenteries allemandes avaient déjà atteint des taux de substitution des déchets de plus de 80 % ; et jusqu'à 100 % de la consommation d'énergie peuvent être utilisés par les déchets combustibles. Les déchets combustibles sont utilisés depuis de nombreuses années avec les systèmes de fours par procédé sec, qui se composent d'un four rotatif muni d'un préchauffeur à quatre étages et à deux tronçons, et d'un refroidisseur planétaire. Ce sont surtout les pneumatiques, les huiles usagées, le bois, les fractions traitées de déchets industriels (comme le plastique, le papier ou les textiles) et les solvants qui sont utilisés comme combustibles. Le tableau 4.4 indique en exemple les valeurs acceptées pour l'utilisation de déchets industriels et de solvants dans cette usine.

Paramètre	Unité	Valeurs acceptées pour les déchets industriels	Valeurs acceptées pour les solvants
S	%	2	3 ¹⁾
Cl	%	1	1
Cd	mg/kg	10	10 ²⁾
Tl	mg/kg	1	0,5
Hg	mg/kg	0,5	1
Sb	mg/kg	75	5
As	mg/kg	10	20
Pb	mg/kg	100	700 ³⁾
Cr	mg/kg	100	100
Co	mg/kg	20	300
Cu	mg/kg	300	5
Mn	mg/kg	100	1000
Ni	mg/kg	100	10
V	mg/kg	25	0,5
Sn	mg/kg	75	1
1) Moyenne annuelle 1 mg/kg 2) Moyenne annuelle 5 mg/kg 3) Moyenne annuelle 300 mg/kg			

Tableau 4.4 : Exemples des valeurs acceptées de différents paramètres pour l'utilisation de déchets industriels et de solvants [76, Allemagne, 2006]

Les conditions et les résultats du suivi des émissions annuelles sont indiqués dans le tableau 4.5 et le tableau 4.6. Pendant les mesures, les déchets combustibles représentaient plus de 80% de l'énergie. Des niveaux d'émissions stricts peuvent être atteints.

Paramètre	Unité	Nombre et période des mesures		
		1	2	3
		08 :00 – 18 :00	08 :00 – 18 :00	08 :00 – 18 :00
Combustibles fossiles				
Cuisson principale (poussières de charbon)	t/h	2,9	3,3	2,4
Déchets combustibles				
Pneumatiques	t/h	3,4	3,4	3,4
Solvants – ligne 1	t/h	3,0	3,0	3,0
Solvants – ligne 2	t/h	3,0	3,0	3,0
Plastique/bois	t/h	6,3	6,3	6,3
Alimentation du four				
Cru	t/h	200	200	200
Valeurs calorifiques				
Charbon	MJ/kg	26,8	26,8	26,8
Pneumatiques	MJ/kg	26,0	26,0	26,0
Solvants – ligne 1 ¹⁾	MJ/kg	27,7	27,7	27,7
Solvants – ligne 2 ²⁾	MJ/kg	26,6	26,6	26,6
Plastique/bois	MJ/kg	19,0	19,0	19,0
% de la consommation d'énergie				
Charbon	%	17	19	15
Pneumatiques	%	20	19	20
Solvants – ligne 1 ¹⁾	%	19	18	19
Solvants – ligne 2 ²⁾	%	18	17	18
Plastique/bois	%	27	28	27
Total déchets combustibles	%	83	81	85
Total	%	100	100	100
Produit				
Clinker	t/h	121	121	121
Capacité	%	97	97	97

Tableau 4.5 : Données d'exploitation d'un four à ciment allemand utilisant des déchets combustibles (moyenne des données sur trois jours)
[76, Allemagne, 2006]

Composante	Unité	Résultats ¹⁾	
		Broyage en moyenne	Sans broyage en moyenne
Température	°C	106	151
Humidité	% en volume	17	17
Débit volumétrique	m ³ /h	275900	2391000
Poussières	mg/Nm ³	3 ²⁾	
NO _x	mg/Nm ³	385 ²⁾	
SO _x	mg/Nm ³	18 ²⁾	
HCl	mg/Nm ³	n.d. ³⁾	n.d. ³⁾
HF	mg/Nm ³	0,09 ⁴⁾	0,06 ⁴⁾
Hg	mg/Nm ³	0,009 ⁴⁾ <0,01 ²⁾	0,033 ⁵⁾ <0,002 ²⁾
Σ (Cd, TI)	mg/Nm ³	n.d. ³⁾	n.d. ³⁾

Annexes

Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	mg/Nm ³	0,055 ⁴⁾	0,071 ⁴⁾
Σ (As, Benzo-a-pyren, Cd, Co, Cr)	mg/Nm ³	n.d. ³⁾	n.d. ³⁾
Carbone organique total	mg/Nm ³	8	9
PCDD/F	ng-ITEQ/Nm ³	n.d. ³⁾	n.d. ³⁾
Benzène	mg/Nm ³	<1 ⁴⁾	
1) Conditions standard à 1013 hPa et 273 K ; après soustraction de la teneur en eau, et une teneur en oxygène des gaz résiduels de 10% en volume			
2) Valeur moyenne annuelle résultant de mesures en continu			
3) Non détecté			
4) Valeur moyenne pour une période d'échantillonnage de 0.5 h			

Tableau 4.6 : Résultats des mesures des émissions liées à l'utilisation de déchets combustibles dans un four à ciment allemand [76, Allemagne, 2006]

Par exemple, dans une cimenterie estonienne, le déchet combustible utilisé est un mélange homogène de déchets dangereux liquides inflammables, et est à base d'huiles usagées. Si ce mélange respecte les exigences techniques indiquées dans le tableau 4.7, il est appelé « déchet combustible », avec un nom spécial, et doit être utilisé uniquement comme combustible de complément dans les fours à ciment. Le déchet combustible en batch est un volume fixe de déchet combustible liquide, traité comme une charge avant d'être livré à l'utilisateur final dans certaines conditions, et bénéficiant d'une spécification de qualité. Des exemples d'analyse de caractéristiques sont indiqués dans le tableau 4.8. Des exemples de critères de qualité des déchets figurent dans le tableau 4.9 ci-dessous.

Fiche technique de qualité pour un déchet combustible VA ¹⁾				
N°	Élément	Unité	Valeur limite ; remarques	Valeur mesurée
Analyse de chaque lot par le fournisseur				
1	Valeur calorifique à réception	MJ/kg	>17	
2	Teneur en eau à réception	% en masse	<35 ; eau libre manquante dans les déchets à réception	
3	Teneur en cendres	% en masse	<15	
4	Point d'éclair	°C	>60	
5	Particules solides < 5 mm dans le combustible VA ¹⁾	mm	Absentes	
6	Densité à 15 °C	kg/Nm ³	Aucune norme	
7	Viscosité du VA ¹⁾ à 40 °C	cSt	Le déchargement de la marchandise sur le site de réception est garanti sans utiliser de moyens externes	
8	Test de réaction par mélange avec des mèches en schiste bitumineux (coagulation, gaz, réaction exothermique)		Négatif	
Analyse de chaque fraction de 500 Nm³ de VA¹⁾ par le fournisseur, ou au moins une fois par an				
8	Soufre (S)	% en masse	<2	
9	Teneur totale en halogène Cl+Br+Fl+I	% en masse	<1	
10	Métaux : Cd+Tl Hg Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	ppm	<15 <5 <2500	
Analyse de chaque fraction de 2000 Nm³ de déchets par le fournisseur, ou au moins une fois par an				
11	PCB ²⁾	ppm	<50	
1) Le déchet combustible VA spécialement préparé est un mélange homogène de déchets dangereux liquides inflammables et est à base d'huiles usagées				
2) Biphényles polychlorés				

Tableau 4.7 : Fiche technique de qualité pour un déchet combustible provenant d'Estonie [75, Estonie, 2006]

Analyses de mèches		
Paramètre	Unité	Analyses
Valeur calorifique supérieure	kJ/kg	15072
Valeur calorifique inférieure	kJ/kg	9211
Solides ¹⁾	%	24,3 (100)
Charbon ²⁾ (C)	%	24,7
Soufre (S)	%	5,3
Autres combustibles solides	%	20,6
Cendres (non combustibles)	%	49,4
Liquides ³⁾	%	36,6 (100)
Essence	%	30,3
Huile	%	69,4
Phénols	%	0,3
PCB ⁴⁾	%	0,5 ⁵⁾
Teneur en eau	%	39,1
Densité	kg/l	1,15
Point d'éclair	°C	70
Cendres (non combustibles), oxydées :		
Chlore (Cl)	%	traces
Sodium (Na+K)	%	2
Potassium (K)	%	
Calcium (Ca)	%	38,5
Silicium (Si)	%	28,8
Cuivre (Cu)	%	traces
Magnésie (Mg)	%	6,5
Fer (Fe)	%	6,1
Phosphore (P)	%	0,2
Aluminium (Al)	%	7,7
Cadmium (Cd)	%	traces
Vanadium (V)	%	traces
Plomb (Pb)	%	traces
Zinc (ZN)	%	traces
Chrome (Cr)	%	traces
Nickel (Ni)	%	traces
Soufre (S)	%	8,7
Titane (Ti)	%	0,4
Autres	%	1,1
1) Matières sèches, p = 0 %	3) organiques	
2) Carbone	4) Biphényles polychlorés	

**Tableau 4.8 : Analyse des caractéristiques d'une cimenterie estonienne
[75, Estonie, 2006]**

Critères de qualité pour les déchets		
Paramètre	Unité	Critère
Température de livraison	°C	90
Viscosité à une température de 80 °C	cST ¹⁾	5.5 – 6.0
Viscosité à une température de 100 °C	cST ¹⁾	3.6 – 4.2
Valeur calorifique inférieure	MJ/kg	non inférieur à 26
Poids brut	kg/m ³	1130 – 1140
Point d'éclair dans un creuset ouvert	°C	non inférieur à 130
Température de fusion	°C	jusqu'à 50
Teneur en cendres	%	jusqu'à 0,5
Additifs mécaniques ²⁾	%	jusqu'à 2,0
Teneur en eau	%	jusqu'à 4
Indice/facteur d'acidité	mg KOH ^{3)/g}	jusqu'à 260
Composition chimique :		
Soufre (S)	%	jusqu'à 0,2
Chlore (Cl)	%	jusqu'à 0,1
Métaux lourds : Na, K, Mn, V, Co, Ni, Cu, Pb, Zn	%	jusqu'à 0,005
1) cST = centistokes 2) Granulométrie non supérieure à 3 mm	3) KOH = hydroxyde de potassium	

Tableau 4.9 : Critères de qualité pour des déchets provenant d'une cimenterie estonienne [75, Estonie, 2006]

Le tableau 4.10 indique l'augmentation de l'utilisation des déchets et des déchets combustibles dans une cimenterie estonienne entre 2000 et 2005.

Année	Consommation de déchets combustibles (t/an)				
	Liquides				Solides
	Schiste bitumineux	Huiles usagées	Acide benzoïque	Total	Semi-coke de schiste bitumineux
2000	-	365	-	365	-
2001	4415	1223	-	5638	9366
2002	16809	3322	-	20131	10013
2003	16304	4020	-	20324	27503
2004	19921	5643	1500	27064	15300
2005	19242	4552	3312	27106	-

Tableau 4.10 : Consommation de déchets combustibles dans une cimenterie estonienne [75, Estonie, 2006]

4.2.2.1.1 Exemples de concentrations de substances dans les déchets/critères d'entrée des déchets

Les tableaux 4.11 à 4.13 indiquent des exemples de concentrations de métaux et de critères d'entrée classiques pour différentes substances de déchets utilisés comme combustibles et/ou comme matières premières dans différentes cimenteries et dans plusieurs pays.

Paramètre	Autriche ^{1) 10)}			Suisse ²⁾		Allemagne ³⁾	
	Déchets combustibles ⁴⁾⁹⁾ en général	Déchets plastiques, papier, textiles, bois, etc. fractions à valeur calorifique élevée issues des déchets classiques	Solvants, huiles usagées, laques	Déchets combustibles ⁵⁾⁹⁾ en général ¹⁾	Autres déchets destinés à la mise au rebut	Déchets plastiques, papier, textiles, bois, etc. fractions à valeur calorifique élevée issues des déchets classiques ⁶⁾	Solvants, huiles usagées
	Valeurs maximum (mg/kg)						
As	15	15	20	15	-	13	15
Sb	5	20 (200) ⁷⁾	100	5	800 ⁴⁾	120	20
Be	5	-	-	5	-	2	2
Pb	200	500	800	200	500	400	150
Cd	2	27	20	2	5	9	4
Cr	100	300	300	100	500	250	50
Cu	100	500	500	100	600	700	180
Co	20	100	25	20	60	12	25
Ni	100	200	-	100	80	160	30
Hg	0,5	2	2	0,5	5 ⁸⁾	1,2	1
Tl	3	10	5	3	-	2	2
V	100	-	-	100	-	25	10
Zn	400	-	-	400	-	-	-
Sn	10	70	100	10	-	70	30
Cl (total)	1 %	2 %	-	-	-	1,5 %	-
PCB	50	-	100	-	-	-	-
1) Engagement volontaire de la part de l'industrie du ciment, avec les autorités et le ministère compétent 2) BUWAL, directives de co-traitement suisses 3) Engagement volontaire de la part de l'industrie des déchets, et réglementations du Gouvernement de la NRW (Westphalie du Nord), Allemagne 4) Valeur calorifique nette de 25 MJ/kg 5) Valeur calorifique nette moyenne de 18 MJ/kg 6) Polyéthylène téréphthalate (PET) 7) Polyéthylène téréphthalate (PET), polyester 8) Cas particulier, épuration des gaz résiduels pour le Hg 9) Autres déchets combustibles en général (non applicable aux flux de déchets autorisés choisis) 10) D'autres valeurs plus récentes figurent dans les « Guides relatifs aux déchets combustibles » du Gouvernement Fédéral autrichien, notifiées par la Commission européenne							

Tableau 4.11 : Valeurs limites des différentes autorisations et réglementations autrichiennes, suisses et allemandes relatives à l'utilisation de déchets
[104, HOLCIM/GTZ, 2006], [168, GTT CLM, 2007]

Paramètre	Unité	Espagne ¹⁾	Belgique ¹⁾	France ¹⁾
Valeurs calorifiques	MJ/kg	-	-	-
Halogènes (exprimés en Cl)	%	2	2	2
Cl	%	-	-	-
F	%	0,20	-	-
S	%	3	3	3
Ba	mg/kg	-	-	-
Ag	mg/kg	-	-	-
Hg	mg/kg	10	5	10
Cd	mg/kg	50/1 00 ²⁾	70	-
Tl	mg/kg	50/1 00 ²⁾	30	-
Σ Hg+Cd+Tl	mg/kg	100	-	100
Sb	mg/kg	-	200	-
Σ Sb+As+Co+Ni+Pb+Sn+V+Cr	mg/kg	0,50 %	2500	2500
As	mg/kg	-	200	-
Co	mg/kg	-	200	-
Ni	mg/kg	-	1000	-
Cu	mg/kg	-	1000	-
Cr	mg/kg	-	1000	-
V	mg/kg	-	1000	-
Pb	mg/kg	-	1000	-
Sn	mg/kg	-	-	-
Mn	mg/kg	-	2000	-
Be	mg/kg	-	50	-
Se	mg/kg	-	50	-
Te	mg/kg	-	50	-
Zn	mg/kg	-	5000	-
PCB	mg/kg	30	30	25
PCDD/PCDF	mg/kg	-	-	-
Br+I	mg/kg	-	2000	-
Cyanure	mg/kg	-	100	-
1) Valeurs limites définies par les autorités pour les autorisations individuelles destinées aux cimenteries espagnoles, belges et françaises				

Tableau 4.12 : Exemples des valeurs limites pour les déchets combustibles dans différents pays/régions en fonction des autorisations individuelles
[104, HOLCIM/GTZ, 2006], [182, GTT CLM, 2008]

Paramètre	Unité	Espagne ¹⁾	Belgique ¹⁾	France ¹⁾	Suisse ²⁾
Carbone organique total	mg/kg	2 %	5000	5000	-
Quantité totale d'halogènes (exprimés en Cl)	%	0,25	0,5	0,5	-
F	%	0,1	-	-	-
S	%	3	1	1	-
Hg	mg/kg	10	-	-	0,5
Cd	mg/kg	100	-	-	0,8
Tl	mg/kg	100	-	-	1
Σ Hg+Cd+Tl	mg/kg	100	-	-	-
Sb	mg/kg	-	-	-	1
Σ Sb+As+Co+Ni+Pb+Sn+V+Cr	mg/kg	0,50 %	-	-	-
As	mg/kg	-	-	-	20
Co	mg/kg	-	-	-	30
Ni	mg/kg	-	-	-	100
Cu	mg/kg	-	-	-	100
Cr	mg/kg	-	-	-	100
V	mg/kg	-	-	-	200
Pb	mg/kg	-	-	-	50
Sn	mg/kg	-	-	-	50

Mn	mg/kg	-	-	-	-
Be	mg/kg	-	-	-	3
Se	mg/kg	-	-	-	1
Te	mg/kg	-	-	-	-
Zn	mg/kg	-	-	-	400
PCB	mg/kg	30	-	-	1
pH	mg/kg	-	-	-	-
Br+I	mg/kg	-	-	-	-
Cyanure	mg/kg	-	-	-	-
1) Valeurs limites définies par les autorités pour les autorisations individuelles destinées aux cimenteries espagnoles, belges et françaises					
2) Valeurs limites pour les déchets utilisés comme matières premières, BUWAL 1998 (Suisse), Guides relatifs à l'élimination des déchets dans les cimenteries					

Tableau 4.13 : Exemples des valeurs limites pour des déchets destinés à être utilisés comme matière première dans différents pays/régions
[104, HOLCIM/GTZ, 2006]

Le tableau 4.14 et le tableau 4.15 indiquent des exemples de critères d'entrée classiques pour les substances présentes dans les déchets utilisés dans les cimenteries allemandes.

Élément	Concentration (mg/MJ)
Plomb	0,09 – 25
Cadmium	0,01 – 0,7
Chrome	0,09 – 21
Nickel	0,1 – 25
Mercuré	0,01 – 0,1
Thallium	<0,01 – 0,1
Zinc	0,5 – 625

Tableau 4.14 : Exemples de plages de concentration types des métaux provenant de déchets combustibles
[60, VDI 2094 Allemagne, 2003]

Paramètre	Concentration (mg/kg)
Arsenic	13
Cadmium	9
Cobalt	12
Chrome	250
Cuivre	700 ¹⁾
Mercuré	0.5 – 1
Manganèse	500
Nickel	100
Plomb	400
Antimoine	120
Thallium	1 – 2
Vanadium	25
Etain	70
1) Des valeurs plus élevées sont possibles dans certains échantillons	

Tableau 4.15 : Exemples des critères d'entrée pour l'utilisation appropriée des déchets dans les fours à ciment allemands
[76, Allemagne, 2006]

Le tableau 4.16 et le tableau 4.17 indiquent des exemples de critères d'autorisation pour différentes substances selon les types de fours utilisés dans les cimenteries autrichiennes. Dans certains cas, la sélection des types de déchets combustibles et de leurs critères d'entrée repose sur la « liste positive », qui est un engagement volontaire de la part de l'industrie du ciment. En outre, dans certains cas, les autorités locales définissent des critères d'entrée plus stricts. Toutes les autorisations contiennent des valeurs maximales, dont certaines sont liées à la valeur calorifique, et d'autres aux types de déchets combustibles. En plus des valeurs maximales, une autorisation peut également contenir des valeurs moyennes et des valeurs du percentile 80, selon le type de déchet combustible. Une autorisation a été délivrée en 2005.

Paramètre	Déchets combustibles, à l'exception des boues de station ³⁾ (valeur calorifique = 25 MJ/kg)	Papier et boues de station	Huiles usagées, solvants, vernis	Plastiques, fractions à forte valeur calorifique	Déchets de bois	Pneumatiques usagés	Papier	Caoutchouc	Farines animales
Valeurs maximales (mg/kg matière sèche)									
As	15	5 – 10	10 – 20	15	15	-	0,5	36	0,3
Sb	200	20	10 – 100	20 – 30 (800 ¹⁾)	20	-	0,5	8,4	1
Pb	150	100 – 500	250 – 800	500	300 – 800	-	500	33,8	2
Cd	5	3 – 5	1 – 20	25 – 27	10 – 15	-	5	8	0,1
Cr	150	100 – 500	50 – 300	300	70	-	300	97	5
Co	50	50 – 60	3 – 25	20 – 100	14	-	60	128	1
Cu	700	350 – 600	500	500	100 – 400	-	600	748	15
Mn	500	700	70 – 100		150	-	300	4250	30
Ni	100	60	40 – 100	200	100	-	80	200	1,5
Hg	0,5	2 – 3	1 – 2	0,86 – 2	1	-	0,6	0,4	0,2
Tl	3	3	1 – 5	3 – 10	2	-	5	1	0,6
V	100	100	10 – 100	70	60	-	15	40	1
Zn	-	1000 – 2000	300 – 3000	-	1000	20000	2000	11400	150
Sn	50	10 – 50	-	70	-	-	10	20	1,5
Cl	1% en poids ²⁾	0,8% en poids	1% en poids	2% en poids	0,5% en poids	-	-	-	-
S	3% en poids	-	-	-	-	-	-	-	-
1) Uniquement pour le polyéthylène téréphthalate (PET)									
2) Cl, F									
3) A partir d'une autorisation									

Tableau 4.16 : Exemples des critères d'autorisation (valeurs maximales) pour les substances présentes dans les déchets utilisés par des cimenteries autrichiennes
[161, Autriche, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [170, Autriche, 2007]

Paramètre	Papier boues station	et de Huiles usagées	Solvants	Plastiques	Déchets de bois	Papier	Caoutchouc	Farines animales
Valeurs moyennes et valeurs du percentile 80 (mg/kg matière sèche)								
	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur du percentile 80	Valeur du percentile 80	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur du percentile 80
As	3,78	12	6	10	10	0,46	16,4	0,2
Sb	4,97	67	6	20	20	0,37	5,72	0,6
Pb	25,5	59	180	150	150	31,85	28	1,5
Cd	1,02	0,5	0,6	15	5	0,63	3,9	0,05
Cr	28	8	30	150	50	12,2	26	3
Co	6,6	1	1,8	15	10	3,6	80	0,4
Cu	160,5	52	300	300	50	10,75	300	12
Mn	350	0,1	42	200	150	287	28,6	25
Ni	22	1	24	100	100	11,1	77	1
Hg	1,2	0,47	0,6	0,6	0,5	0,26	0,02	0,1
Tl	6,69	0,05	0,6	1,5	1	1,11	0,4	0,3
V	16,05	1	6	30	60	6,11	12	0,5
Zn	40,6	390	30	30	20	1,76	10	1
Sn	877	1000	180	-	-	34,9	8597	120
Cl	-	0,4% en poids	-	-	-	-	-	-
S	-	2% en poids	-	-	-	-	-	-
PCB/PCT	-	50	-	-	-	-	-	-
Valeur moyenne : valeur du percentile 50 80 perc. : valeur du percentile 80				Valeur maximale : valeur du percentile 100				

Tableau 4.17 : Exemples des critères d'autorisation (valeur moyenne et valeur du percentile 80) pour les substances présentes dans les déchets utilisés par des cimenteries autrichiennes [161, Autriche, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [170, Autriche, 2007]

Des exemples de critères d'entrée pour les substances présentes dans les déchets utilisés dans des cimenteries françaises (valeurs limites minimales et maximales), espagnoles et polonaises sont indiqués dans le tableau 4.18 et le tableau 4.19.

Paramètre	Unité	Valeur maximale	Valeur minimale	Commentaire
Hg	ppm	<10	<10	1)
Hg+Cd+Tl	ppm	<1000	<100	2)
Cr	ppm	<10000	<250	3)
Cu	%	<2	<1	
Zn	%	<15	<1	
Co	%	<1	-	
Ni	%	<1	-	
Mn	%	<1	-	
Pb	%	<0,6	<0,1	
Σ As+Ni+Co+Se+Te+Cr+Pb+Sb+Sn+V	ppm	<10000	<2500	
Σ As+Ni+Co+Se+Te+Cr+Pb+Sb+Sn+V	ppm	-	<3500	
Σ Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Cd+Tl+Hg	%	-	<1	
Σ As+Ni+Co+Se+Te+Cr+Pb+Sb+Sn+V	%	-	<2	
Σ Cd+Hg+Cr+Pb+Sn+V+Co+As+Cu+Mn+Mo+Tl+Ni	%	-	<1	
Soufre	%	<12	<0,5	4)
PCB/PCB+PCT ⁸⁾	ppm	<50	<50	5)
PCP ⁹⁾	ppm	<50	-	6)
Quantité totale de chlore	%	<4	<1	7)
Autres halogènes (bromure+iodure+fluorure)	%	-	<0,5	-
Alcalins (Na ₂ O+K ₂ O)	%	<15	0,8	4)
Phosphates (P ₂ O ₅)	%	<15	<0,75	4)
1) Une valeur de 10 ppm est pertinente pour le mercure pour toutes les autorisations de cimenteries 2) Un grand nombre d'autorisations pour les cimenteries possède une limite de 100 ppm pour les produits volatils 3) Situation au cas par cas selon les autorités locales. Trois cimenteries ne possèdent aucune limitation sur les métaux, 10 autorisations sont liées à une législation européenne antérieure, et certaines usines ont reçu des autorisations avec des listes spécifiques de métaux, ou des limitations spécifiques quant à certains métaux 4) Plage de tolérance étendue pour ce paramètre 5) Une seule limite sur les PCB/PCT 6) Une seule limite sur les PCP 7) Plage de tolérance étendue pour ce paramètre ; des contraintes plus strictes peuvent exister pour les livraisons de déchets, selon chaque four 8) PCB : biphényles polychlorés ; PCT : terphényles polychlorés 9) PCP : pentachlorophénol				

Tableau 4.18 : Exemples des critères d'entrée pour les substances présentes dans les déchets combustibles utilisés dans des cimenteries titulaires d'une autorisation française [168, GTT CLM, 2007], [174, EUCOPRO, 2007]

Paramètre	Unité	Espagne			Pologne		
		Loi nationale	Usine 1	Usine 2	Loi nationale	Usine 1	Usine 2
Hg	ppm	nc	10	-	nc	nc	nc
Σ Hg+Cd+Tl	ppm	nc	100	100	nc	nc	nc
Σ Sb+As+Pb+Cr+Co +Cu+Ni+Mn+V	ppm	nc	5000	10000	nc	nc	nc
nc aucun critère d'entrée							

Tableau 4.19 : Exemples des critères d'entrée pour les substances présentes dans les déchets combustibles utilisés dans des cimenteries espagnoles et polonaises [168, GTT CLM, 2007], [174, EUCOPRO, 2007]

Paramètre	Unité	Valeur maximale
Soufre	% en poids/poids	1,5
Chlore	% en poids/poids	2,0
Fluor	% en poids/poids	0,5
Brome	% en poids/poids	0,5
Iode	% en poids/poids	0,2
Mercuré	ppm	10
Σ Cadmium+Thallium (total)	ppm	30
Antimoine	ppm	300
Arsenic	ppm	60
Chrome	ppm	200
Cobalt	ppm	100
Cuivre	ppm	300
Plomb	ppm	500
Manganèse	ppm	250
Nickel	ppm	500
Etain	ppm	200
Vanadium	ppm	50
Biphényles polychlorés (PCB)	ppm	10
Pentachlorophénol (PCP)	ppm	20
Solides	% en poids/poids	15
Cendres	% en poids/poids	10
Eau	% en poids/poids	20

Tableau 4.20 : Spécifications des critères d'entrée pour un exemple de déchet
[168, GTT CLM, 2007], [174, EUCOPRO, 2007]

4.2.2.2 Exemples de consommation d'énergie

Dans les cimenteries autrichiennes, la consommation de combustibles classiques et de déchets combustibles utilisés pour couvrir les besoins en énergie thermique a augmenté en continu au fil des ans entre 1997 et 2004, comme cela est indiqué dans le tableau 4.21.

Combustible	1997 (t/an)	1998 (t/an)	1999 (t/an)	2000 (t/an)	2001 (t/an)	2002 (t/an)	2003 (t/an)	2004 (t/an)
Charbon	200241	159331	131580	166965	149354	76504	70523	72218
Lignite	7434	4335	11774	35023	38855	62908	69786	62551
Fioul	53423	46762	45081	17574	11004	11714	12363	14909
Gaz ¹⁾	12618	11595	12394	13438	11343	10735	8727	8528
Coke de pétrole	3275	11692	24021	10367	8648	51882	50089	57147
Autres combustibles fossiles	0	0	0	0	0	0	82	1028
Quantité totale de combustibles fossiles	273347	233171	221271	239486	215928	210643	209050	213916
Combustibles secondaires	101063	121719	135065	169888	218048	238959	267822	274032
Quantité totale de combustibles	374411	354890	356336	409374	433976	449602	476872	487948

¹⁾ 1000 m³ (Vn/an)

Tableau 4.21 : Consommation de combustibles dans l'industrie autrichienne du ciment
[92, Autriche, 2006]

4.2.2.3 Exemples de données sur les émissions

Les données sur les émissions provenant d'une cimenterie estonienne en 2006 sont indiquées dans le tableau 4.22.

Nom et origine du polluant		Données autorisées (t/an)	Données sur les émissions réelles en 2006 (t/an)
Quantité totale de poussières		542,98	245,5
Quantité totale de poussières provenant	Des fours rotatifs en régime spécial	420,0	8 9,84
	Des fours rotatifs en régime ordinaire	149,60	71,11
	Des broyeurs de schiste bitumineux	21,60	8,66
	Des refroidisseurs de clinker	178,60	63,23
	Des transporteurs de clinker	5,76	1,85
	Des broyeurs de calcaire	5,04	0,86
	Des stations de broyage ciment	7,56	2,25
	Des stations de broyage ciment à séparateur	2,52	0,80
	Des machines de conditionnement	1,08	0,44
	Des carrières de calcaire	50,96	2,5
	Des décharges à déchets industriels	4,32	1,02
	Des carrières de schiste bitumineux	1,44	0,35
	Port (différents matériaux)	114,50	2,85
SO ₂ ,		5762,70	1696,63
SO ₂ provenant	Des fours rotatifs	5760,00	1696,63
	Des broyeurs de schiste bitumineux	2,70	-
NO _x , (calculés comme NO ₂)		3072,6	576,57
NO _x , provenant	Des fours rotatifs	2880,00	534,37
	Des broyeurs de schiste bitumineux	43,2	15,76
	Des centrales électriques	149,4	26,44
CO		3072,60	510,43
CO provenant	Des fours rotatifs	4608,00	460,00
	Des broyeurs de schiste bitumineux	10,8	7,72
	Des centrales électriques	149,40	42,71
CO ₂		787333	745620
Chlorure d'hydrogène		247,60	5,03
Fluorure d'hydrogène		12,68	-
Composés organiques volatils		307,44	26,17
Métaux lourds		20,32	0,08

Tableau 4.22 : Exemples de différentes données sur les émissions provenant d'une cimenterie estonienne en 2006 par rapport aux données sur les émissions autorisées [75, Estonie, 2006]

Poussières fines PM10 et PM2.5

Des exemples de fractions de poussières fines PM10 et PM2.5 émises par des cimenteries irlandaises figurent dans le tableau 4.23.

Source		PM	Concentrations			Émissions de masse (kg/h)
			Tel qu'émis (mg/Nm ³)	Correction à 10% d'oxygène	Conditions standard (mg/Nm ³)	
Usine 1 ⁶⁾	Broyeur à cru (filtre électrostatique)	PM10	2,67 ¹⁾	2		0,7684
		PM10	2,65 ¹⁾	2		0,7237
	Refroidisseur à grille (filtre électrostatique)	PM10	7 ²⁾			1,4782
		PM10	7 ²⁾			1,6866
	Broyeur à charbon (filtre à manches)	PM10	9,33 ³⁾	9		0,2979
		PM10	10,1 ³⁾	10		0,3085
	Broyeur à ciment (filtre à manches)	PM10	107 ⁴⁾			4,38
		PM10	73 ⁴⁾			3,00
	Séparateur pour station de broyage (filtre à manches)	PM10	3 ⁵⁾			0,4095
PM10		0 ⁵⁾			0	
	Événements des filtres à manches	PM10		0,007 – 0,302		
Usine 2 ⁷⁾	Broyeur à ciment (filtre à manches)	PM10			3,33	
		PM2.5			<1,1	
	Broyeur à charbon (filtre à manches)	PM10			3,33	
		PM2.5			3,33	
	Broyeur à cru et station de broyage ciment (filtre électrostatique)	PM10			2,22	
		PM2.5			5,56	
	Alimentation du four (filtre à manches)	PM10			1,11	
		PM2.5			2,22	
	Transporteur de clinker (filtre à manches)	PM10			1,11	
		PM2.5			1,11	
	Filtre à manches	PM10			1,11 – 7,78	
		PM2.5			1,11 – 2,22	
	Station de broyage ciment	PM10			5,56 – 3,33	
		PM2.5			1,11 – 2,22	
	Silos	PM10			1,11	
		PM2.5			<1,1 – 3,33	
	Broyeur à charbon (transporteur d'alimentation)	PM10			4,44	
		PM2.5			3,33	
	Broyeur secondaire	PM10			1,11	
		PM2.5			<1,1	
1) 7 % d'oxygène, température de 139 °C, débit gazeux moyen de 280397 Nm ³ /h, 3925558 Nm ³ /jour						
2) 20,9% d'oxygène, température de 216 °C, débit gazeux moyen de 225272 Nm ³ /h, 2703269 Nm ³ /jour						
3) 10 % d'oxygène, température de 86 °C, débit gazeux moyen de 31241 Nm ³ /h, 656063 Nm ³ /jour						
4) 20,9% d'oxygène, température de 110 °C, débit gazeux moyen de 40901 Nm ³ /h, 940739 Nm ³ /jour						
5) 20,9% d'oxygène, température de 86 °C, débit gazeux moyen de 136940 Nm ³ /h, 2191046 Nm ³ /jour						
6) Mesures de 2001						
7) Mesures de 2004						

Tableau 4.23 : Exemples d'émissions de poussières fines PM10 et PM25 mesurées dans des cimenteries irlandaises
 [113, Irlande, 2007], [182, GTT CLM, 2008]

Rejets dans l'eau

Dans une usine estonienne qui utilise le procédé par voie humide, 602000 m³ d'eau ont été utilisés en 2005 pour le collecteur de boues et d'huile. Les rejets dans l'eau sont dus au procédé technique de production de la pâte et au collecteur d'huile. Les rejets dans l'eau et les quantités de polluants dans les eaux usées d'une cimenterie estonienne sont indiqués dans le tableau 4.24.

Quantité de polluants dans les eaux usées			
Polluant	Unité	Collecteur de pâte et d'huile	
		2004	2005
Demande biologique en oxygène	mg/l	5	7
Solides en suspension	mg/l	8,3	11
Quantité totale d'azote	mg/l	1,8	1,4
Quantité totale de phosphore	mg/l	0,08	0,057
Sulfates	mg/l	-	
Phénols I basiques	µg/l	0,019	<0,5
Phénols II basiques	µg/l	0,0053	<0,5
Huile	mg/l	0,03	0,01
Demande chimique en oxygène	mg/l	54	-

Tableau 4.24 : Quantités de polluants dans les eaux usées d'une cimenterie estonienne [75, Estonie, 2006]

4.2.3 Fabrication du ciment – cogénération/récupération de l'excédent de chaleur

4.2.3.1 Cogénération d'énergie électrique à l'aide du procédé à cycle à vapeur conventionnel – cimenterie suédoise de Slite

La cimenterie (deux fours) de Slite (Ile de Gotland/Suède), qui était initialement conçue pour produire 6000 t de clinker par jour, a augmenté sa production en continu, pour atteindre aujourd'hui 7000 t/jour. La tour de préchauffage à cyclone en suspension possède une température de gaz de rejet d'environ 440 °C. De plus, l'usine dispose d'une humidité relativement faible pour les matières premières, de l'ordre de 2 à 3%. Seule une partie de la chaleur provenant du four est nécessaire pour le broyage par voie sèche.

La chaleur récupérable est envoyée à une centrale électrique existante située à côté de la cimenterie, et exploitée par un tiers qui réutilise une turbine à vapeur pour générer de l'électricité. La vapeur est générée dans une chaudière à récupération de chaleur en deux étapes : une au niveau du refroidisseur de clinker, et une dans la conduite descendante du four. Avec l'installation illustrée sur la figure 4.1, la cimenterie est capable de fournir de la vapeur d'eau ayant une qualité suffisante :

- le refroidisseur de clinker qui utilise les gaz d'exhaure comme source de chaleur résiduelle (environ 330 °C) ;
- l'électrofiltre situé sur le refroidisseur de clinker (flux gazeux) ;
- les chaudières à récupération de chaleur – sur le refroidisseur de clinker – avec le circuit de vapeur d'eau ;
- la seconde chaudière à récupération de chaleur (gaz de rejet de la tour de préchauffage), comme application à une teneur en poussières élevée ;
- la turbine et le générateur dans lesquels est générée l'énergie ;
- le condensateur à eau de mer, pour refroidir la vapeur d'eau par circulation.

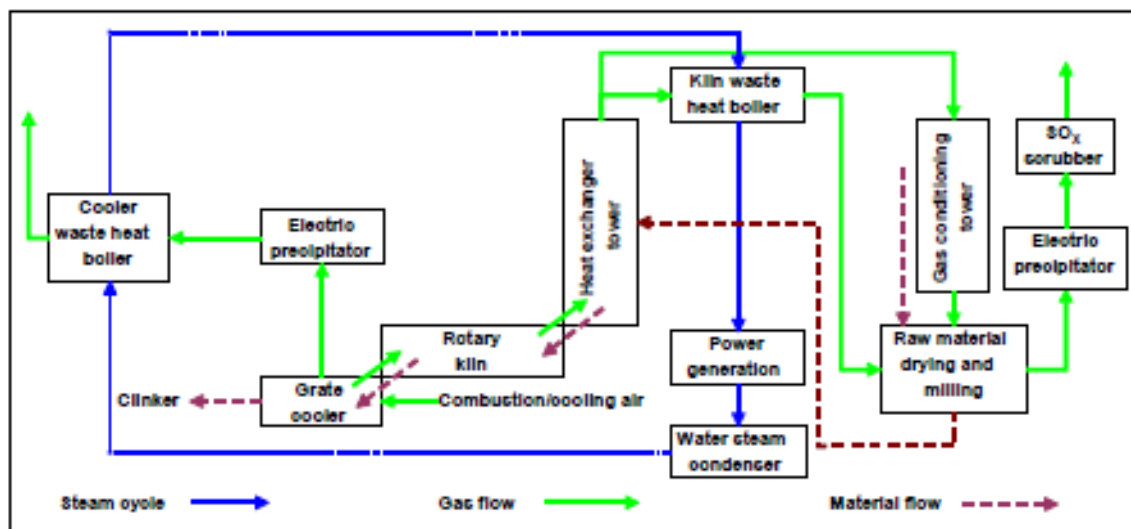


Figure 4.1 : Schéma de principe d'un système de récupération de chaleur à base d'eau en deux temps pour la cogénération d'énergie à la cimenterie suédoise de Slite [133, CEMBUREAU/Federhen, 2007]

Tout d'abord, les chaudières à récupération de chaleur du refroidisseur de clinker fonctionnent comme prévu. Cependant, la chaudière à préchauffeur par gaz résiduels ne génère pas la vapeur pour laquelle elle a été conçue – même après avoir subi des modifications. Cette défaillance peut être due à la couche de poussières fines isolantes située sur les tubes de l'échangeur thermique. Un système de soufflage de poussières plus efficace est alors nécessaire pour surmonter l'inefficacité de la chaudière. Une étude interne a démontré que la technique conventionnelle de nettoyage des tubes avec de la vapeur n'était pas économique. Une chaudière à récupération de chaleur munie de surfaces d'échange thermique étendues est nécessaire. Cette option, cependant, entraîne une perte de charge beaucoup plus importante et augmente les besoins en électricité internes.

En 2007, la cimenterie a récupéré environ 30 MW de chaleur du système ; elle était initialement conçue pour 9 MW et fournit désormais, après optimisation, environ 6 MW. L'investissement, calculé en 1999, a été de 8 millions d'euros pour la chaudière et le système de distribution de la vapeur, dont 25% ont été subventionnés. Cependant, aucun coût n'a été mentionné pour la turbine à vapeur réutilisée, qui a contribué de manière significative à l'économie de l'installation. La production annuelle d'électricité est aujourd'hui d'environ 50 GWh, ce qui équivaut à 1/4 des besoins en électricité de la cimenterie.

4.2.3.2 Cogénération à l'aide du procédé à cycle organique de Rankine (ORC) - cimenterie située à Lengfurt, en Allemagne

L'usine de Lengfurt utilise le procédé à cycle organique de Rankine (ORC) à basse température. Ce procédé repose essentiellement sur l'utilisation d'un milieu organique mobile (pentane) qui s'évapore à des températures bien moins élevées que pour l'eau, et non sur l'utilisation de vapeur comme milieu mobile. Les principes de base de cette technique ont été utilisés avec succès pendant longtemps pour la réfrigération. La technique ORC est principalement utilisée pour générer de l'électricité à partir de sources de chaleur géothermique ; cependant, l'utilisation de ce procédé dans une cimenterie est une première mondiale. La figure 4.2 montre le schéma de principe de ce procédé.

Le procédé ORC de génération d'électricité à partir de chaleur résiduelle à basse température dans la cimenterie de Lengfurt pouvait, en 2007, après sept années d'expérience, être considéré comme une alternative techniquement faisable aux centrales électriques utilisant de la vapeur d'eau et, comme une solution économique pour le propriétaire, en raison de son financement par le gouvernement régional.

Son avantage particulier est lié à sa stabilité et à sa fiabilité, à sa structure compacte et à son degré d'efficacité relativement élevé qui peut être atteint avec des sources de chaleur à moins de 275°C. Cependant, le procédé n'est pas courant pour les cimenteries, et le personnel d'exploitation et de maintenance doit recevoir une formation spéciale.

La centrale électrique à récupération de chaleur de type ORC se compose de plusieurs sous-systèmes :

- un refroidisseur de clinker avec des gaz d'exhaure utilisés comme source de chaleur résiduelle ;
- un filtre électrostatique qui réduit les émissions de poussières ;
 - note : les filtres à manches ne sont pas compatibles avec le niveau de température d'un tel arrangement ;
- une chaudière à récupération de chaleur et à circuit de pentane ;
- une turbine et un générateur, dans lesquels est générée l'électricité ;
- un condensateur d'air destiné à refroidir le circuit de pentane.

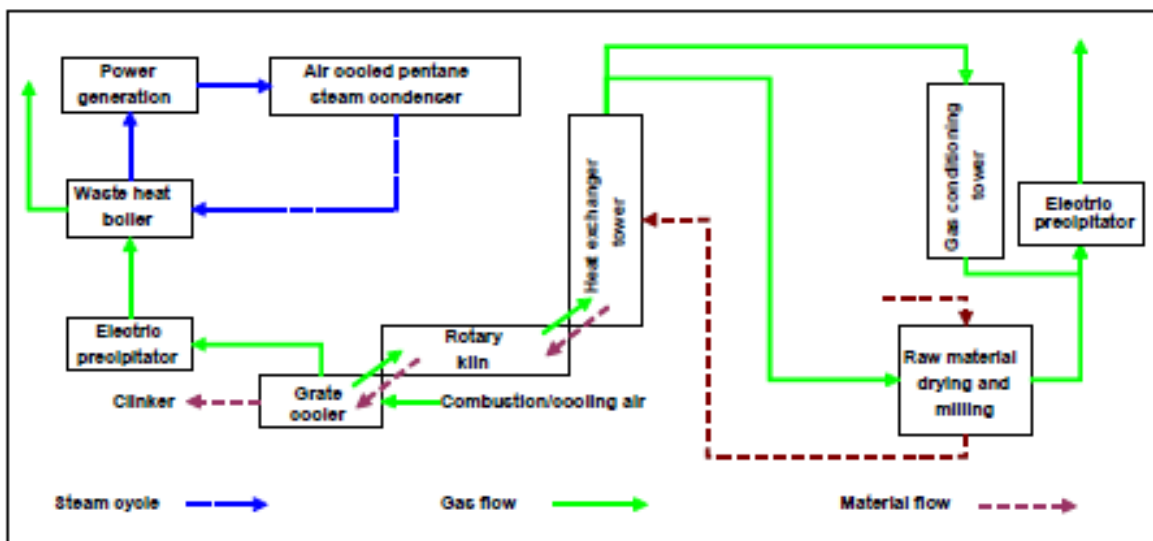


Figure 4.2 : Schéma de principe d'un système de récupération de chaleur à base de pentane pour la cogénération d'électricité dans l'usine allemande de Lengfurt [133, CEMBUREAU/Federhen, 2007]

Les résultats ont montré qu'une énergie électrique de 1 MW (net.) pouvait être générée avec le mode de fonctionnement donné. Le niveau de disponibilité atteint a été égal à 97% de la durée de fonctionnement du four à ciment. Le refroidisseur de clinker possède un rendement de chaleur résiduelle (via l'air d'exhaure du refroidisseur de clinker) de 14 MW, et une température de gaz d'exhaure de l'ordre de 300 à 350 °C, dont environ 9 MW sont extraits en moyenne.

Parfois, en raison de certaines conditions de fonctionnement du four et du refroidisseur de clinker à grille, le rendement de la turbine est inférieur à celui initialement prévu. En 2007, la centrale électrique à récupération de chaleur couvrait jusqu'à 9% des besoins ; cependant, à l'avenir, cette unité pourra couvrir jusqu'à 12% des besoins en énergie électrique d'une cimenterie. Ainsi, les émissions de CO₂ dues à la combustion associée à la génération d'électricité peuvent être réduites d'environ 3000 à 7620 t/an.

Les coûts d'investissement ont été de 4 millions d'euros. Parmi ces coûts totaux, 2 millions d'euros concernent l'unité ORC, avec son circuit de refroidissement au pentane (frais d'installation inclus).

Le reste a été utilisé pour la chaudière à récupération de chaleur, l'unité de transfert de chaleur, la construction, l'électricité, les études de conception, la mise en service, les autres dispositifs, et les frais. Les coûts d'investissement spécifiques ont été d'environ 4000 euros/kW (net.), ou 1300 euros/t de CO₂ par an. L'énergie électrique générée a été d'environ 6000 MWh/an, et les frais d'exploitation ont été de 50000 euros par an. Cependant, aucune réserve n'a été intégrée aux frais d'exploitation pour les réparations majeures, mais deviendra obligatoire dès que l'usine commencera à vieillir [78, E. Baatz + G. Heidt, 2000], [79, Allemagne, 2001], [133, CEMBUREAU/Federhen, 2007].

4.2.4 Fabrication du ciment – exemples de réduction des NO_x en utilisant une technique SNCR à haute efficacité

L'application de la technique SNCR aux fours à ciment date de plus de 25 ans. Les premiers essais d'exploitation ont démontré l'applicabilité de la technique SNCR aux fours à ciment rotatifs, à condition qu'une plage de températures de 900 à 1 000 °C existe. Dans les années 90, les essais ont été étendus à plusieurs fours à ciment dans différents pays (Allemagne, États-Unis, Autriche, Suède, Suisse, etc.). Dans la plupart des cas, des taux de réduction des NO_x supérieurs à 50% ont pu être atteints. Désormais aujourd'hui, la technique SNCR est utilisée dans l'industrie du ciment pour réduire les NO_x et est appliquée avec succès à de nombreux fours à ciment en Europe et aux États-Unis.

4.2.4.1 Exemple de technique SNCR utilisée en Suède

Procédé

En Suède, Cementa AB utilise une technique SNCR à haute efficacité pour réduire les NO_x depuis 1997, sur trois fours à ciment d'une capacité de 1900 t/jour (fours à préchauffeur à cinq étages et à refroidisseur à satellites) au sein de sa cimenterie de Skövde, et de 1200 et de 5800 t/jour dans sa cimenterie de Slite. La figure 4.3 illustre le schéma de principe d'un four à préchauffeur muni d'un refroidisseur à satellites dans la cimenterie de Slite.

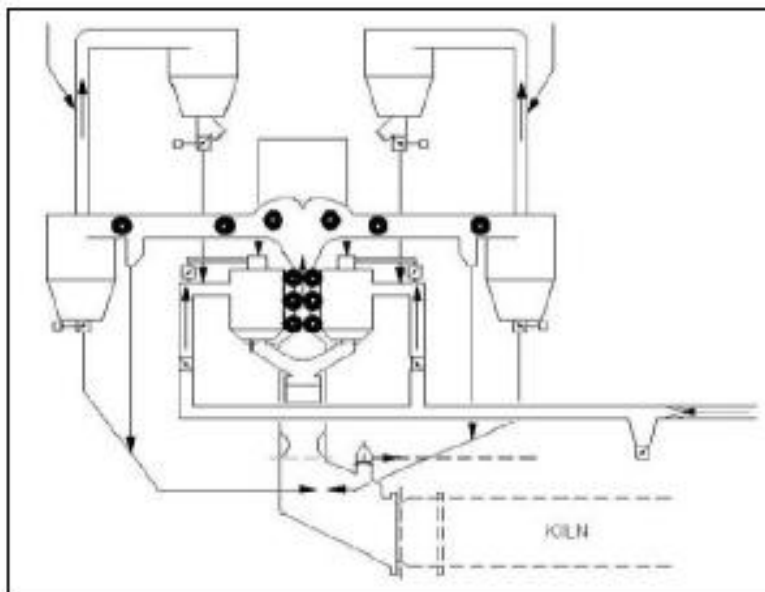


Figure 4.3 : Schéma de principe du procédé de fabrication du ciment à Slite (Suède)
[114, Suède, 2006]

Pour l'injection d'ammoniac dans le flux gazeux, un nombre différent de paires d'injecteurs est utilisé. La cimenterie de Slite utilise normalement trois à quatre paires d'injecteurs, comme cela est illustré sur la figure 4.4. Le schéma de répartition des injecteurs pour l'injection de la solution d'ammoniac à Skövde est illustré sur la figure 4.5.

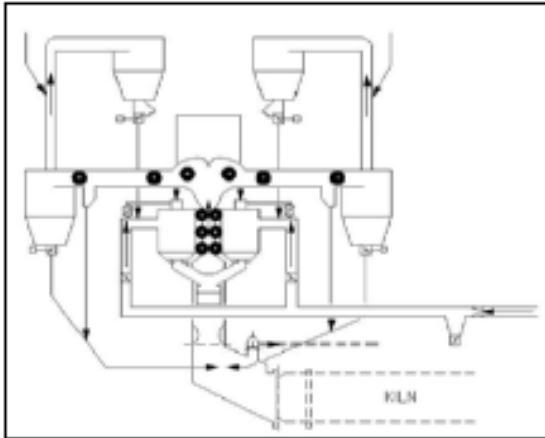


Figure 4.4 : Schéma de principe de l'injection d'une solution de NH_3 pour le procédé SNCR à la cimenterie suédoise de Slite
[114, Suède, 2006]

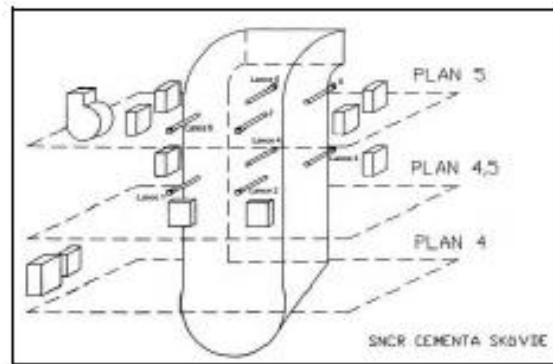


Figure 4.5 : Schéma de principe et plan des injecteurs pour l'injection d'une solution de NH_3 pour le procédé SNCR à la cimenterie suédoise de Skövde
[114, Suède, 2006]

Dans les deux usines, le niveau initial de NO_x se situait entre 800 et 1100 mg/Nm^3 . Ainsi, le taux de réduction est resté autour de 80%, comme au départ. Depuis 1998, les émissions de NO_x à long terme se situent autour de 200 mg/Nm^3 , mais, à l'usine de Skövde, ce niveau est inférieur à 200 mg/Nm^3 (moyenne annuelle). Depuis 1997, environ 63500 tonnes d'ammoniac ont été consommées afin de réduire environ 45000 tonnes de NO_x . Dans la cimenterie de Slite, la consommation d'eau ammoniacale (25%) s'est stabilisée aux environs de 3,5 à 4,5 l/t de clinker produite. Dans la cimenterie de Skövde, elle oscille entre 2,5 et 3,5 l/t. La figure 4.6 illustre la consommation d'eau ammoniacale et les émissions de NO_x de ces usines entre 1995 et 2005. La fluctuation de la consommation d'ammoniac est très probablement due à un changement des conditions de clinkérisation et, dans une moindre mesure, à l'usure des injecteurs du système. Étonnamment, il n'a pas été nécessaire de changer les injecteurs entre 1997 et 2005, et le temps d'arrêt pour les trois fours a été inférieur à 200 h.

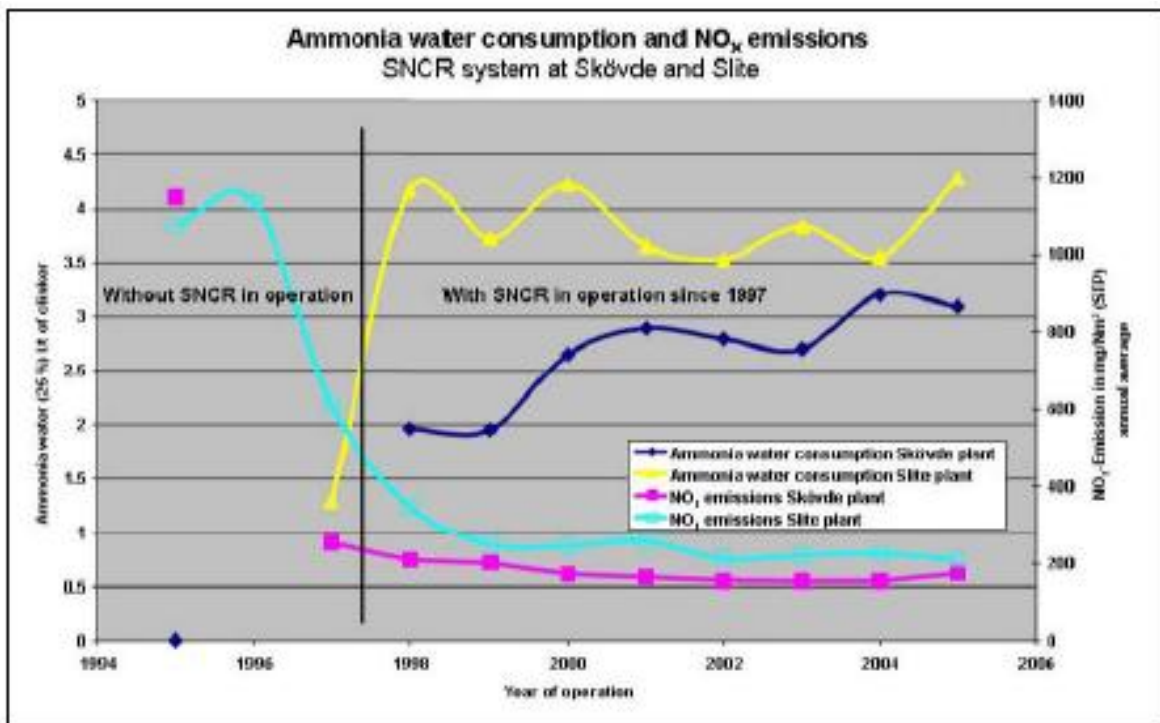


Figure 4.6 : Émissions de NO_x et consommation d'eau ammoniacale dans les cimenteries suédoises de Slite et de Skövde de 1995 à 2005

Rapport molaire

En 2001, le rapport molaire initial était de 1 à 1,2 (quantité molaire de NH_3 par rapport à la quantité molaire de NO_x présents) dans l'usine de Skövde. Avec une efficacité d'élimination moyenne de 80%, ces rapports sont de 1,2 à 1,4 pour les NO_x éliminés. A l'usine de Slite, le rapport d'ammoniac était au départ, une fois encore, de l'ordre de 1,2 à 1,4 mole/mole (NO_x présents par rapport au NH_3 injecté) ou de 1,5 à 1,8 (NO_x réduits par rapport au NH_3 injecté).

Fuite d'ammoniac

Entre 1994 et 1996, des tests de fuite d'ammoniac et d'émissions ont démontré que les deux usines présentaient des émissions d'ammoniac naturelles dues aux matières premières de 10 à 30 mg/Nm^3 pour l'usine de Skövde, et de 15 à 20 mg/Nm^3 pour l'usine de Slite.

A Skövde, la fuite d'ammoniac, dès que la technique SNCR a été mise en service, a été de 5 à 10 mg/Nm^3 . A Slite, la fuite d'ammoniac, en plus des émissions naturelles, a été d'environ 5 à 20 mg/Nm^3 .

En 2003, à l'usine de Skövde, des mesures répétées ont démontré moins de 5 mg/Nm^3 d'émissions d'ammoniac sans utiliser la technique SNCR, et 20 mg/Nm^3 en utilisant la technique SNCR.

Il convient de noter que les deux usines utilisaient des broyeurs à cru. L'ammoniac a été collecté au sein de ces systèmes de broyage. A Skövde, les systèmes de broyage (broyeurs à cru et broyeurs à charbon) ont fonctionné pendant presque 98% de la période d'exploitation. Par conséquent, les émissions d'ammoniac découvertes en mode composé (compound) (exploitation/arrêt des broyeurs) représentaient les données moyennes.

A l'inverse, la cimenterie de Slite comprend un laveur de SO_x où l'ammoniac est stocké dans la liqueur. Cela égalise donc les pics et les creux. Avec le gypse produit, seule une petite fraction d'ammoniac est distribuée aux stations de broyage (3 kg/h). La station de broyage de ciment fonctionne à basse température en circuit fermé, et une odeur d'ammoniac n'a été détectée que très occasionnellement dans le silo à ciment. De plus, depuis 1998, les mesures en continu des émissions d'ammoniac sont effectuées au niveau de la cheminée du laveur. Les données mesurées pour les émissions d'ammoniac et la consommation d'eau ammoniacale à la cimenterie de Slite sont illustrées sur la figure 4.7.

Pendant la période d'exploitation sans le laveur de SO_2 , les émissions d'ammoniac se situaient entre 15 et 35 mg/Nm^3 .

Depuis que le laveur a été mis en service, les pics de courte durée sont plus élevés, et peuvent atteindre 125 mg/Nm^3 . Cela est dû au fait que la température de la liqueur du laveur passe désormais de 53 à 59 °C, que l'équilibre est décalé et qu'une certaine quantité d'ammoniac accumulé soit à nouveau libérée. En utilisant le laveur à l'usine de Slite, le niveau d'ammoniac moyen de 20 à 35 mg/Nm^3 suit quasiment la tendance de consommation d'eau ammoniacale. Cet effet indique qu'il est nécessaire de continuer à mettre l'accent - malgré la haute efficacité des systèmes SNCR - aussi sur les mesures primaires de contrôle des NO_x par l'optimisation des conditions de combustion.

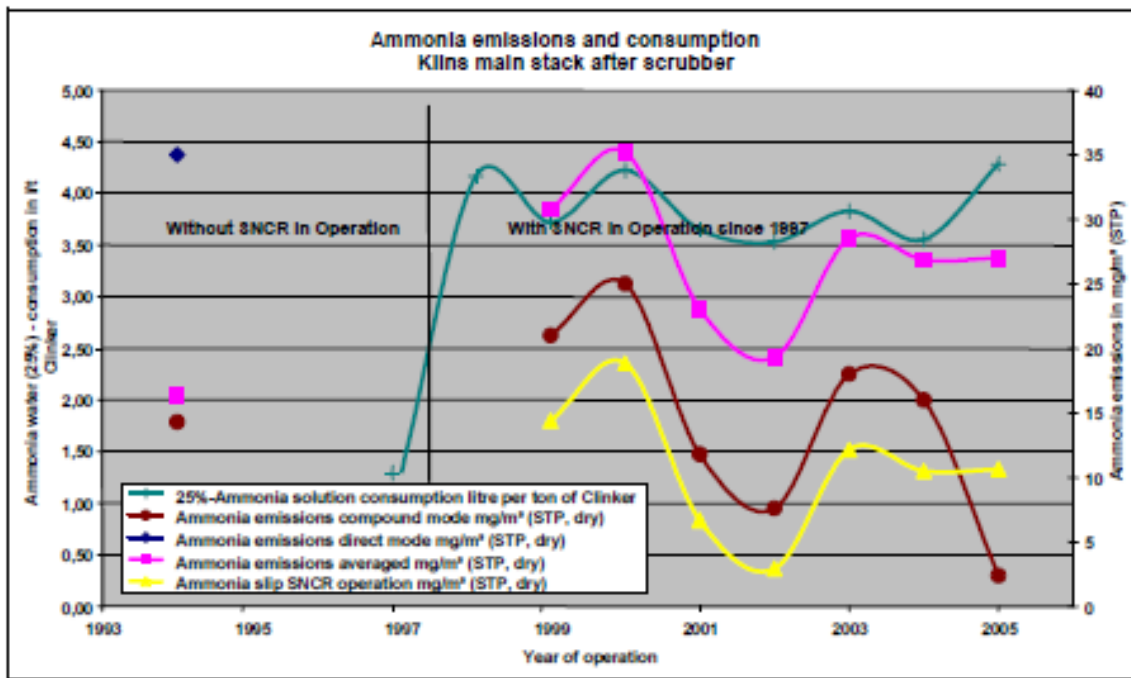


Figure 4.7 : Émissions de NH_3 et consommation d'eau ammoniacale dans deux fours à ciment de la cimenterie suédoise de Slite de 1994 à 2005
[114, Suède, 2006]

Un équipement spécial a été utilisé dans les cimenteries suédoises. Grâce à cet équipement et à l'exploitation de dispositifs à faibles émissions de NO_x , les émissions d'ammoniac supplémentaires ont été de 5 à 20 mg/Nm^3 . Cependant, la fuite d'ammoniac fluctue selon la nature du procédé de fabrication du ciment.

Coûts d'exploitation

Le coût d'exploitation d'un système SNCR dépend principalement de la consommation d'eau ammoniacale. Seule une faible quantité d'énergie de pompage est nécessaire et la combustion de l'ammoniac dans la zone de réduction de 900 à 1 100 °C compense la chaleur nécessaire pour évaporer l'eau (porteur d'ammoniac).

Avec des coûts d'environ 100 euros par tonne d'eau ammoniacale à 25% en 1996, et de 130 euros par tonne en 2006, les coûts de réduction par tonne de clinker produite ont augmenté modestement à l'usine de Skövde, passant de 0,30 à 0,35 euro. Les coûts accumulés ont été de 0,40 à 0,45 euro par tonne de clinker.

A Slite, étant donné que les frais de transport sur l'île de Gotland sont plus élevés que sur le continent (en 2007, les coûts étaient de 140 euros par tonne), le coût a fluctué aux alentours de 0,40 à 0,50 euro par tonne de clinker. Parmi les coûts de production, l'électricité, la maintenance et la dépréciation sont accumulées à hauteur de 0,10 euro supplémentaire par tonne de clinker. Comme cela a été initialement calculé, les coûts totaux par tonne de clinker sont restés aux alentours de 0,50 à 0,60 euro par tonne de clinker.

Entre 1997 et 2005, les coûts de réduction ont été d'environ 11 millions d'euros. En même temps, environ 45 000 t de NO_x ont été éliminées. Les coûts totaux, avec la dépréciation, les coûts de capital, les coûts en énergie et les coûts en ammoniac liés à la réduction des NO_x , ont été de 250 euros par tonne de NO_x .

4.2.4.2 Exemple de technique SNCR utilisée en Allemagne

Le procédé SNCR est utilisé depuis de nombreuses années dans une cimenterie allemande qui utilise un système de fours par voie sèche moderne. Cette usine utilise un four rotatif de 5,5 mètres de diamètre et de 89 mètres de long, muni d'un préchauffeur à deux tronçons à quatre étapes, et d'un refroidisseur planétaire. Sa capacité est d'environ 3000 t de clinker par jour. Le four peut être chauffé 100% du temps avec des déchets combustibles. Une fenêtre de températures appropriée est prévue dans le conduit ascendant afin d'appliquer le procédé SNCR. Le niveau d'émissions de NO_x initial est assez faible (environ 400 à 600 mg/Nm^3 sur une base journalière). Il peut néanmoins atteindre 1200 mg/Nm^3 , voire plus.

L'eau ammoniacale (solution d'ammoniac à 25%) est stockée dans une cuve ayant un volume de 100 m^3 . A partir de cette cuve, l'eau ammoniacale est pompée vers un réservoir plus petit et l'injection d'eau ammoniacale, contrôlée par un dispositif adapté, s'effectue à l'aide de huit lances, comme cela est illustré sur la figure 4.8. L'agencement des lances est déterminé par la température dans le conduit ascendant.



Figure 4.8 : SNCR à haute efficacité et point d'injection d'eau ammoniacale par lance aux positions n° 21 à 26
[76, Allemagne, 2006]

En utilisant un procédé SNCR à haut rendement, un niveau d'émissions de 500 $\text{mg NO}_2/\text{Nm}^3$ peut être atteint en permanence sans fuite d'ammoniac significative. Des essais ont été effectués afin d'étudier l'optimisation de l'unité SNCR de façon à obtenir des émissions de NO_x inférieures à 500 mg/Nm^3 . En 2007, les derniers résultats d'un test de performances d'une durée de six mois ont démontré que des valeurs d'émissions de NO_x de 350 mg/Nm^3 (valeurs moyennes journalières) étaient obtenues en appliquant un rapport molaire NH_3 : NO de 0,7 (exploitation en interconnexion/broyeur actif) à 0,8 (exploitation directe/broyeur inactif). De plus, des valeurs d'émissions de NO_x de 200 mg/Nm^3 (valeurs moyennes journalières) ont été obtenues en appliquant un rapport molaire NH_3 : NO de 1,4 (exploitation en interconnexion/broyeur actif) à 1,5 (exploitation directe/broyeur inactif). Cependant, en appliquant des rapports molaires NH_3 : NO élevés, les émissions d'ammoniac doivent être prises en considération avec une attention particulière. Pendant les tests de performances, les émissions de NH_3 ont été mesurées en continu. Les mesures de NH_3 ont cependant entraîné une fuite d'ammoniac significative en maintenant 200 mg de NO_x/Nm^3 , plus particulièrement pendant que le broyeur était inactif (50 à 200 mg/Nm^3 maximum).

De plus, la fuite d'ammoniac a été deux fois plus élevée pour atteindre le niveau d'émissions de 200 mg/Nm³ (NH₃ : valeur moyenne sur trois mois de 11 mg/Nm³), en comparaison avec un niveau de 350 mg/Nm³ (NH₃ : valeur moyenne sur trois mois de 21 mg/Nm³). Le rapport d'exploitation avec le broyeur inactif, dans ce cas, a été d'environ 10 à 20%. Aucun enrichissement en ammoniac dans le cru et dans les poussières des filtres électrostatiques n'a été observé pendant les tests de performances. Les tests ont indiqué que les émissions d'ammoniac devaient être sérieusement prises en considération. La fuite d'ammoniac, qui a lieu en raison du procédé ci-dessus, définit les limites d'addition d'agents réducteurs au-delà des valeurs stœchiométriques [76, Allemagne, 2006], [168, GTT CLM, 2007], [173, Allemagne, 2007], [182, GTT CLM, 2008].

4.2.5 Fabrication du ciment – exemple de réduction des NO_x en utilisant la technique SCR

Description

La première unité de démonstration de la SCR grandeur nature a été construite en Allemagne, avec un financement par le gouvernement. Cette unité (Solnhofer Portland-Zementwerke) est en activité depuis 2001. Solnhofer Portland-Zementwerke a décidé de mettre en œuvre un système SCR de traitement des gaz en configuration high-dust (gaz chargés en poussières) pour les raisons suivantes :

- consommation réduite de NH₃ par rapport à la technique SNCR, entraînant des coûts d'exploitation moins élevés ;
- au sommet du préchauffeur à quatre étages, les gaz résiduels possèdent une température de 320 à 350 °C, qui convient pour la technique SCR et ne nécessite pas de réchauffage (comme dans le cas de la configuration entre le filtre à manches et la cheminée), et permet ainsi de réduire les coûts d'énergie et les pertes de charge.

Le réacteur SCR de Solnhofen permet d'installer six couches d'éléments catalytiques, mais seules trois d'entre elles sont utilisées. Chaque couche se compose de six modules, ayant chacun 72 éléments catalytiques. Les éléments catalytiques mesurent chacun 15 x 15 x 90 cm, possèdent une structure en nids d'abeilles, et une composition spéciale à base de TiO₂ et de V₂O₅. Une taille de cellule de 13 mm (10 mm dans la couche intermédiaire) a été choisie afin d'empêcher toute obstruction. Le système de dépoussiérage intégré utilise de l'air préchauffé à haute pression pour éliminer les poussières qui s'accumulent à la surface des catalyseurs. Les injecteurs à air sont déplacés en continu par-dessus chaque couche de catalyseur, et, ainsi, aucune interruption de service n'est nécessaire pour retirer les poussières du catalyseur. En optimisant le système de dépoussiérage, la consommation d'air à haute pression est passée de 100 à 18 m³ par tonne de clinker de ciment, entraînant des coûts en énergie, pour le fonctionnement du catalyseur, d'environ 0,098 euro par tonne de clinker de ciment [76, Allemagne, 2006].

Le procédé SCR de l'usine de Solnhofen est illustré sur la figure 4.9.

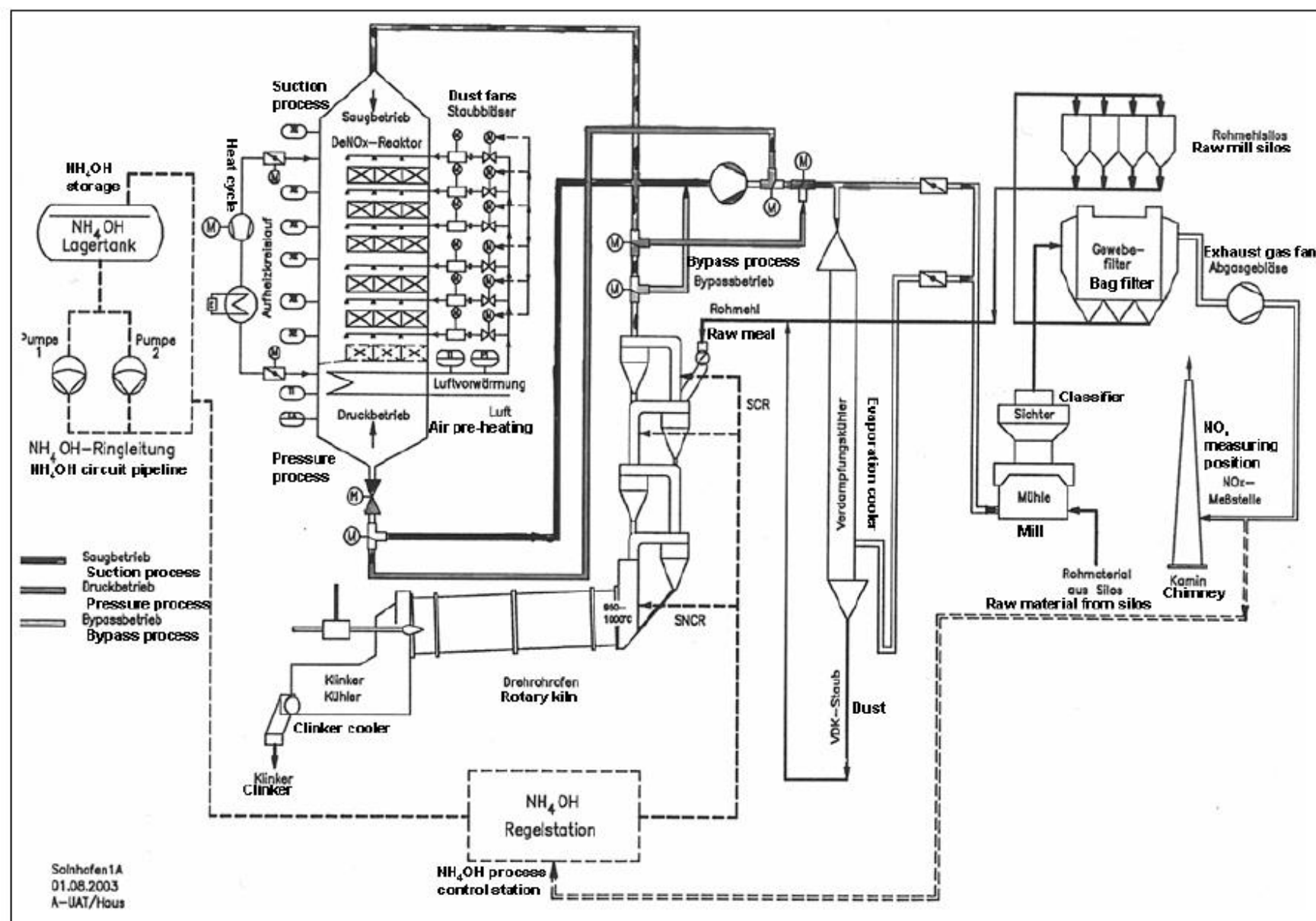


Figure 4.9 : Schéma de principe de l'exemple d'une installation de SCR en Allemagne (Solnhofer Portland-Zementwerke)
[76, Allemagne, 2006]

Afin de garantir une durée de vie maximale pour le réacteur SCR, il a été conçu de façon à faciliter une exploitation en amont ou en aval, comme cela est illustré sur la figure 4.9. Par conséquent, le système de dépoussiérage intégré est capable d'éliminer les poussières qui se sont accumulées depuis la surface supérieure ou la surface inférieure de chaque couche de catalyseur. Étant donné que la longue expérience de Solnhofen n'a pas démontré les avantages prévus pour l'exploitation en amont, il n'a pas été nécessaire de modifier le sens d'écoulement des gaz. Par conséquent, les futures mises en œuvre de la technique SCR de traitement des gaz fortement poussiéreux pourront être conçues uniquement pour une exploitation en aval, ce qui réduit ainsi l'investissement.

L'agent réducteur, une solution à base d'eau à 25% de NH_3 , est ajouté aux gaz résiduels dans les étages supérieurs du préchauffeur selon un rapport molaire de 0,8 à 0,9 selon la demande stœchiométrique, en fonction du débit des gaz résiduels, de la concentration initiale en NO_x et de la valeur cible.

Le premier groupe de catalyseurs a fonctionné pendant 40000 heures sans utilisation ou perte d'activité excessive. Les essais ultérieurs réalisés avec des catalyseurs à plaques ont démontré une utilisation mécanique plus importante et des pertes d'activité imprévues. Afin de garantir le respect permanent de la valeur limite d'émission (ELV), l'usine de Solnhofen s'est équipée d'un système SNCR de secours en 2006.

Avantages environnementaux obtenus et données d'exploitation

L'efficacité de réduction des NO_x de l'usine SCR de Solnhofen est généralement de l'ordre de 59 à 67%. Dans des conditions d'exploitation inhabituelles avec des concentrations en gaz brut de 3000 mg/Nm^3 et plus, des taux de réduction des NO_x de plus de 80% ont été observés. Dans des conditions normales, le SCR réduit les émissions de NO_x dues aux concentrations en gaz brut de 1000 à 1600 mg/Nm^3 à environ 400 à 550 mg/Nm^3 . Il convient de noter que l'usine de Solnhofen a été conçue pour respecter une limite d'émissions de NO_x de 500 mg/Nm^3 et qu'elle est exploitée en conséquence. Cependant, parfois, cette limite d'émissions a été dépassée.

Avec un rapport molaire de 0,8 à 0,9, la consommation de NH_3 est bien plus faible qu'avec la technique SNCR. Il convient de noter que le NH_3 issu des matières premières sert également d'agent réducteur dans le réacteur. Ainsi, le niveau d'émissions de NH_3 résiduel est très faible. A l'usine de Solnhofen, le SCR a généralement entraîné des émissions de NH_3 inférieures à 1 mg/Nm^3 .

Lors d'une campagne, le dosage de NH_3 a été augmenté selon un niveau de NO_x cible de 200 mg/Nm^3 . Lors de cette campagne, un niveau d'émissions d'environ 300 mg/Nm^3 a été obtenu. Ces résultats peuvent indiquer le potentiel de la technique, plus particulièrement parce qu'ils ont également été obtenus avec trois couches catalytiques uniquement. Le niveau d'émission de NH_3 résiduel était toujours d'environ 1 mg/Nm^3 .

Effets croisés

Le seul effet croisé négatif est une légère augmentation des besoins en énergie électrique en raison du système de dépoussiérage interne du réacteur SCR et des pertes de charge supplémentaires.

Applicabilité

Jusqu'en 2008, la technique SCR n'a été testée que sur des systèmes de fours à préchauffeur et en voie semi-sèche (Lepol), mais elle peut également être appliquée à d'autres systèmes de fours.

Aspects économiques

L'investissement total pour le projet SCR à Solnhofen a été d'environ 3,5 millions d'euros, y compris les dépenses supplémentaires liées au développement, comme les six couches catalytiques et la capacité d'exploitation en mode amont ou en mode aval. L'investissement pour une nouvelle unité, sur la base de l'expérience de Solnhofen, est estimé à environ 2,2 millions d'euros pour le réacteur SCR, y compris 250000 euros environ pour les catalyseurs, en tenant compte des coûts de remplacement tous les 5 à 6 ans. Cette somme ne comprend pas les frais liés au stockage et aux conduites d'ammoniac, étant donné qu'ils varient de manière significative d'un site à l'autre. Les coûts liés à la réduction des NO_x par la technique SCR ou SNCR sont estimés par l'agence fédérale allemande de l'environnement (UBA) pour une capacité de 1500 t/j et une réduction des NO_x de 1000 à 500 mg/Nm³ sur la base de l'expérience de l'usine de Solnhofen. Comme indiqué dans les deux dernières colonnes du tableau 4.26, les estimations des coûts sont extrapolées pour une réduction des NO_x allant jusqu'à 200 mg/Nm³.

D'après les calculs de l'UBA allemande, les coûts d'exploitation pour la technique SNCR et la technique SCR – y compris les coûts de remplacement du catalyseur – sont quasiment les mêmes pour un niveau de NO_x cible de 500 mg/Nm³, tandis que les coûts spécifiques totaux pour la technique SCR sont environ 50% plus élevés que pour la technique SNCR. Avec un niveau de NO_x cible de 200 mg/Nm³, la technique SCR semble plus efficace en termes de coûts d'exploitation, mais les coûts spécifiques totaux sont du même ordre de grandeur que pour la technique SNCR. Lorsque l'on compare ces chiffres, il convient de noter qu'aucune expérience à long terme avec un niveau de NO_x de 200 mg/Nm³ n'est encore disponible pour la technique SCR ou SNCR. Dans le cas de la technique SNCR, les émissions plus élevées de NH₃ doivent également être prises en compte [76, Allemagne, 2006]

Paramètre de base	Unité	Facteur
Capacité de production de clinker	t/an	480000
Capacité de production de clinker	t/j	1500
Durée d'exploitation	h/an	7680
Débit des gaz résiduaires	Nm ³ /t	2300
Niveau de NO _x initial	mg/Nm ³	1000
Niveau de NO _x initial	kg/t	2,3
Coûts en NH ₃ (solution à 25%)	EUR/t	90.00
Coûts en catalyseurs	EUR/Nm ³	7500
Durée de vie utile du catalyseur	h	40000
Durée de vie utile de l'investissement	années	20
Taux d'inflation	%	3,0

Tableau 4.25 : Hypothèses de base d'une unité de SCR en Allemagne
[76, Allemagne, 2006]

Comparatif des coûts entre le procédé SNCR et le procédé SCR					
Paramètre	Unité	SNCR	SCR	SNCR	SCR
Valeur cible de NO _x	mg/Nm ³	500	500	200	200
NH ₃ équivalent	kg/t	0,44	0,44	0,71	0,71
Facteur stœchiométrique		1,7	0,8	2,5	1,0
Consommation de NH ₃ (25 %)	kg/t	3,02	1,42	7,11	2,84
Consommation de NH ₃ (25 %)	kg/j	4,550	2,150	10,650	4,250
Nombre de couches catalytiques			3		4
Coûts d'exploitation					
Consommation de NH ₃	EUR/t	0,27	0,13	0,64	0,26
Consommation d'énergie électrique	EUR/t	0,03	0,10	0,06	0,11
Coûts de remplacement du catalyseur	EUR/t		0,10		0,13
TOTAL	EUR/t	0,30	0,33	0,70	0,50
Investissement					
Système d'ammoniac	EUR	600000	250000	1000000	350000
Réacteur SCR (sauf catalyseurs)	EUR		1950000		2350000
TOTAL	EUR	600000	2200000	1000000	2700000
Investissements spécifiques ¹⁾	EUR/t	0,08	0,30	0,14	0,37
Coûts spécifiques totaux ²⁾	EUR/t	0,38	0,62	0,83	0,87
Coûts de réduction des NO _x	EUR/t NO _x	330,00	540,00	450,00	470,00
1) Investissements spécifiques					
2) Coûts d'exploitation et investissements spécifiques totaux					

Tableau 4.26 : Comparatif des coûts techniques de réduction des NO_x entre le procédé SNCR et le procédé SCR selon l'UBA (agence fédérale allemande de l'environnement) pour une unité allemande [76, Allemagne, 2006]

Un calcul des coûts de l'industrie du ciment allemande réalisé par l'Association allemande des producteurs de ciment (VDZ) comprend une approche détaillée concernant les coûts de la technique SCR. En plus du coût d'investissement, cette étude considère également la totalité des coûts d'exploitation, y compris les coûts en eau ammoniacale, la consommation d'électricité due à l'air comprimé destiné au nettoyage du catalyseur, et la perte de charge due au catalyseur lui-même, ainsi que d'autres données d'évaluation économique typiques pour une cimenterie. Ici, il a été démontré que les coûts pour la technique SNCR sont toujours inférieurs à ceux de la technique SCR si l'on se base sur les tarifs européens de l'énergie et du NH₃. Théoriquement, la technique SCR peut devenir moins coûteuse que la technique SNCR uniquement avec des taux de réduction très élevés, et si les prix du NH₃ augmentent de manière significative, et si les tarifs de l'énergie diminuent. Cette situation, cependant, ne semble pas applicable à l'Union européenne, étant donné que les coûts de l'ammoniac et de l'énergie ne s'opposent pas, puisqu'ils ont tendance à augmenter et à diminuer de manière simultanée. On peut également constater que les efforts de réduction des NO_x à l'aide de mesures/de techniques primaires (~800 mg/m³, ce qui était la moyenne en Allemagne en 2007) ont entraîné de plus fortes économies pour la technique SNCR, étant donné que les coûts sont largement influencés par les coûts de l'ammoniac.

Les résultats liés à la technique SCR ont démontré des niveaux de coûts de l'ordre de 1,25 à 2 euros par tonne, selon la taille de l'unité et l'efficacité d'élimination des NO_x requise. Contrairement à la technique SNCR, le procédé SCR est dominé par les investissements, qui sont quatre à neuf fois supérieurs à ceux d'un système SNCR. De plus, la consommation d'énergie est essentiellement due à la perte de charge et à l'air de nettoyage pour le catalyseur. Les derniers chiffres spécifiques pour le système SCR reflètent le développement de la technique. Comme l'indiquait une précédente étude de la VDZ, la technique SCR avait un coût spécifique de 3 euros par tonne de clinker, bien que cette valeur ait diminué jusqu'à atteindre environ 1,75 euro par tonne en 2006 [76, Allemagne, 2006].

Les coûts calculés par la VDZ pour une installation grandeur nature ayant une capacité de 1500 t de clinker/jour, des émissions initiales de 1200 mg/Nm³ et un niveau final de 200, 500 et 800 mg/Nm³ sont indiqués dans le tableau 4.27.

Technique	Applicabilité du système de fours	Efficacité de réduction	Coûts rapportés	
			Investissement (en millions d'euros)	Coûts d'exploitation (en euros)
SCR	Tous éventuellement	85 – 95 %	3.2 – 4.2	0.54 – 0.94

Tableau 4.27 : Calculs des coûts de réduction des NO_x par utilisation du procédé SCR pour une cimenterie allemande d'une capacité de 1500 t/j [76, Allemagne, 2006]

4.2.6 Fabrication du ciment – guide concernant le contrôle des pics de CO

Dans la plupart des cas, avec le procédé de fabrication du ciment par voie sèche, les gaz d'exhaure chauds fournissent de la chaleur pour le broyeur à cru (mode composé). Si le broyeur à cru ne fonctionne pas (exploitation directe), les gaz sont normalement refroidis par pulvérisation d'eau dans une tour de conditionnement avant d'être traités dans le collecteur de poussières, à la fois afin de réduire leur volume et d'améliorer les caractéristiques de précipitation. Ce dernier point est particulièrement important pour les précipitateurs électrostatiques.

Les gaz d'exhaure du four/du broyeur à cru sont composés de différents constituants, comme du CO₂, du N₂, de la vapeur d'eau et de l'oxygène. Dans une moindre mesure, ils contiennent du NO, des SO_x et du CO. Le CO est contenu dans les gaz résiduels à des concentrations pouvant atteindre 0,1%. Du CO supplémentaire peut être issu du carbone contenu dans les matières premières.

Le terme « pics de CO » s'applique aux filtres électrostatiques, et, dans une certaine mesure, aux filtres hybrides, étant donné qu'ils doivent être arrêtés en cas de niveaux élevés de CO dans les gaz résiduels, pour des raisons de sécurité. Cet arrêt, à son tour, entraîne une augmentation des émissions de poussières, qui peut durer de quelques secondes à plusieurs minutes. Un dispositif de suivi automatique du CO doit surveiller les gaz résiduels en continu. Lorsque ce dispositif est optimisé en termes de temps de réaction et de procédure d'arrêt, et est correctement entretenu, le filtre électrostatique fonctionne conformément à ses spécifications. Lorsqu'il est appliqué à des fours à chauffe secondaire, les filtres sont encore plus fiables grâce à l'arrêt séquentiel du système de chauffe pendant un pic de CO.

4.2.6.1 Objectifs de réduction des interruptions de service – pics de CO

Le monoxyde de carbone issu de toute substance organique contenue dans les matières premières est émis avec les gaz du four. Cependant, en plus du niveau de CO de base, d'autres pics de CO se produisent lorsque le rapport entre l'alimentation en combustible et l'air de combustion n'est pas adapté. Les pics de CO peuvent avoir lieu pendant quelques minutes, voire quelques secondes, et atteindre rapidement une limite d'interruption de service (voir section 1.3.4.1.1).

Le principal objectif est donc de minimiser les interruptions de service de façon proactive – et d'éliminer les explosions de filtres électrostatiques – à l'aide de méthodes de gestion. Par conséquent, le contrôle du niveau de CO dans un four à ciment est important, plus particulièrement en cas d'utilisation de filtres électrostatiques pour le traitement des particules. Si le pic de CO ne peut être supprimé, toute source d'allumage, notamment l'équipement à haute tension des filtres électrostatiques, nécessite alors une attention particulière. Tout pic de l'équipement à haute tension doit absolument être évité. Les autres sources d'allumage potentielles peuvent être les charges statiques provoquées par les frottements entre les solides, ou par les ventilateurs qui peuvent être utilisés pour les systèmes de collecte des poussières.

En général, la limite critique est de plus de 8% de CO ou – de CH₄ – en présence de plus de 6% de O₂. En réalité, le pic de CO se déplace rapidement dans le flux gazeux et atteint la zone critique pour une source d'allumage avant que le système d'analyse ne soit capable de déclencher une alarme. Par conséquent, le niveau d'action doit être bien inférieur au niveau théorique, et dépend des concentrations en CH₄ et en H₂, plus particulièrement lorsque du gaz naturel est utilisé comme combustible. Dans certains cas, le filtre électrostatique se déclenche bien en dessous de la limite critique, alors que, dans d'autres cas, les filtres électrostatiques peuvent être mal protégés.

Le niveau de pic de l'équipement à haute tension dépend du temps d'inactivité. Celui-ci dépend à son tour de l'emplacement, du type et de l'agencement de l'équipement d'analyse. Plus le temps de réponse de l'équipement d'analyse est lent, plus la durée de maintien entre le point d'analyse et la source d'allumage est courte, et plus le niveau d'action doit être faible.

Des études indiquent que les interruptions se produisent principalement pendant la phase de démarrage. Par conséquent, pour garantir un fonctionnement en sécurité du système, il est essentiel que les analyseurs de gaz destinés à protéger les filtres électrostatiques soient actifs pendant toutes les phases d'exploitation, et pas uniquement pendant l'utilisation normale. Afin de réduire le temps d'arrêt de l'unité, il peut également s'avérer utile de disposer d'un système de secours fonctionnel.

4.2.6.2 Stratégie de développement d'une technique de minimisation du CO

Afin de réduire le temps d'arrêt des filtres électrostatiques, une approche systématique et progressive est nécessaire, comme cela est décrit ci-dessous :

- définition des objectifs et évaluation de la situation en ce qui concerne les principaux facteurs influençant les pics de CO, comme l'alimentation en combustible ou une mauvaise combustion ;
- comparaison et évaluation de la situation actuelle et de la situation optimale, identification du potentiel d'optimisation et définition des priorités – analyse des lacunes ;
- optimisation du procédé, du système d'analyse, garantie de la disponibilité, de la fiabilité et de la vitesse, optimisation des mesures/des techniques de réaction.

Lors de la phase d'évaluation, l'emplacement, la fiabilité, la disponibilité et le comportement dynamique de l'équipement d'analyse, en plus des statistiques de développement du CO, sont nécessaires, ainsi que les informations relatives au combustible et au procédé. Ces éléments peuvent être corrélés afin d'identifier toute cause éventuelle et de définir des contre mesures/techniques.

Les pics de CO peuvent être provoqués par une instabilité du système de combustion. Cela peut se produire avec n'importe quel combustible, mais plus particulièrement avec les combustibles solides. Par conséquent, les systèmes d'alimentation en combustible doivent être conçus de façon à empêcher les hausses de combustible dans le système de four à n'importe quel moment. Les propriétés de transport des combustibles solides sont des facteurs particulièrement importants à cet égard et doivent être contrôlées avec précision afin d'empêcher toute retenue ou tout blocage dans les systèmes de préparation et d'alimentation en combustible. Cependant, il est également important de maintenir le niveau normal d'émissions de CO le plus faible possible, afin d'augmenter la distance par rapport au niveau d'action et de disposer d'un temps de réaction plus long. Cela passe par une amélioration de la combustion (comme une optimisation), et de la qualité de l'alimentation en combustible, des propriétés et de la configuration du brûleur, du tirage du four, de la température de combustion et du temps de séjour.

4.2.6.3 Système de surveillance du CO

Le système idéal de surveillance du CO possède un temps de réponse court et doit être situé à proximité de la source de CO, comme au niveau d'une évacuation de tour de préchauffage, ou à l'entrée du four dans le cas d'une application de four par voie humide. De plus, une analyse du temps mort du système entier - y compris du temps de résidence dû au volume du conduit - doit être effectuée. Idéalement, le temps mort nécessaire pour permettre à l'échantillon de CO de se déplacer du point d'aspiration jusqu'à l'analyseur est de l'ordre de 20 à 30 secondes (temps de décalage pour l'analyse). Si l'on ajoute 10 à 30 secondes de temps de décalage supplémentaire (temps de réaction pour l'analyse), on doit obtenir le temps mort maximal total jusqu'à ce qu'environ 85% de la valeur maximale soient atteints. Le temps mort total détermine le moment auquel une action doit être mise en œuvre – ni trop tôt, ni trop tard. Si une analyse plus détaillée de la pente du signal de CO est effectuée, une prédiction plus précise du moment auquel le système à haute tension du filtre électrostatique doit être arrêté, et auquel il peut être remis en service – en tenant compte par conséquent du moment auquel le pic de CO a quitté la zone critique.

Le temps de décalage pour la surveillance du CO peut être réduit en augmentant le débit de l'échantillon, en réduisant la distance entre le point d'échantillonnage et l'analyseur, en réduisant le volume dans le système d'analyse, et en transmettant un signal électronique rapide. Des systèmes in situ rapides ayant des temps de réponse inférieurs à 3 secondes existent sur le marché, mais présentent des limitations avec les gaz fortement poussiéreux. En général, un régime d'entretien et d'étalonnage strict est essentiel. Cependant, les plages et les composants de l'analyseur doivent prendre en compte des limites critiques, qui vont jusqu'à 5% pour le CO et 3% pour le CH₄, respectivement.

4.2.6.4 Actions à mettre en œuvre en cas de pic de CO

Un exemple de mesures/de techniques primaires qui peuvent être utilisées pour supprimer les pics de CO dans les filtres électrostatiques est décrit dans le tableau 4.28. Les actions progressives standard peuvent tout d'abord comprendre une diminution de l'alimentation en combustible et du niveau de tension élevé. Ensuite, il est possible de couper entièrement l'alimentation en combustible et de déclencher les transformateurs haute tension de manière automatique. Le système doit ensuite être purgé en laissant les ventilateurs fonctionner. Le temps de purge nécessaire peut être déterminé de la même manière que le temps de décalage.

Mesures/techniques primaires pour prévenir les pics de CO		
Point de mesure	Niveau de CO (%)	Mesure
Dans la tour de préchauffage	0.5	Alarme, arrêt du précalcinateur/du système de chauffe en entrée de four
	1.2	Arrêt du système de cuisson principal
	2.5	Arrêt du précipitateur électrostatique à haute tension
Après la tour de préchauffage	0.5	Alarme, arrêt du précalcinateur/du système de chauffe en entrée de four
	0.8	Arrêt du système de cuisson principal
	1.5	Arrêt du précipitateur électrostatique à haute tension
	0.5	Redémarrage de l'équipement à haute tension des filtres électrostatiques

Tableau 4.28 : Exemple de mesures/techniques primaires pour éviter les pics de CO liés aux filtres électrostatiques
[60, VDI 2094 Allemagne, 2003], [83, CEMBUREAU, 2006]

4.2.6.5 CO et CH₄ dans les filtres à manches

Les filtres à manches utilisés dans les atmosphères critiques peuvent également rencontrer des problèmes. Par conséquent, le niveau de CO opérationnel doit également être maintenu le plus faible possible. Comme avec les filtres électrostatiques, des composants des gaz combustibles, comme le CH₄ et le H₂, réduisent le niveau critique, c'est-à-dire que, en cas de présence d'environ 2% d'hydrogène, le niveau critique diminue à environ 5%.

Les sources d'allumage potentielles pour les filtres à manches peuvent être les charges statiques provoquées par le frottement de fibres synthétiques ou – en cas de filtres hybrides (combinaison d'un filtre électrostatique et d'un filtre à manches) – la charge statique accumulée sur les manches. Afin d'empêcher toute interruption de service, notamment pour les broyeurs à charbon, les manches sont équipés d'un maillage en fibres d'acier inoxydable ou d'une surface conductrice, et sont reliés à la chambre de filtration. De la même manière, pour les collecteurs de poussières hybrides, le raccordement de la cage de support des manches à la chambre de filtration est recommandé.

Comme avec les filtres électrostatiques, le CO doit être purgé. La purge des broyeurs à charbon s'effectue de préférence à l'aide d'un gaz inerte, comme le gaz de four, du CO₂ ou du N₂ [83, CEMBUREAU, 2006].

4.3 Annexe : fabrication de la chaux

4.3.1 Fabrication de la chaux – répartition des concentrations en métal dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27

Les figures suivantes (figure 4.10 à la figure 4.25) illustrent les répartitions correspondantes des différentes concentrations en métal dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27 (voir également la section 2.3.3.9) [56, EuLA, 2006].

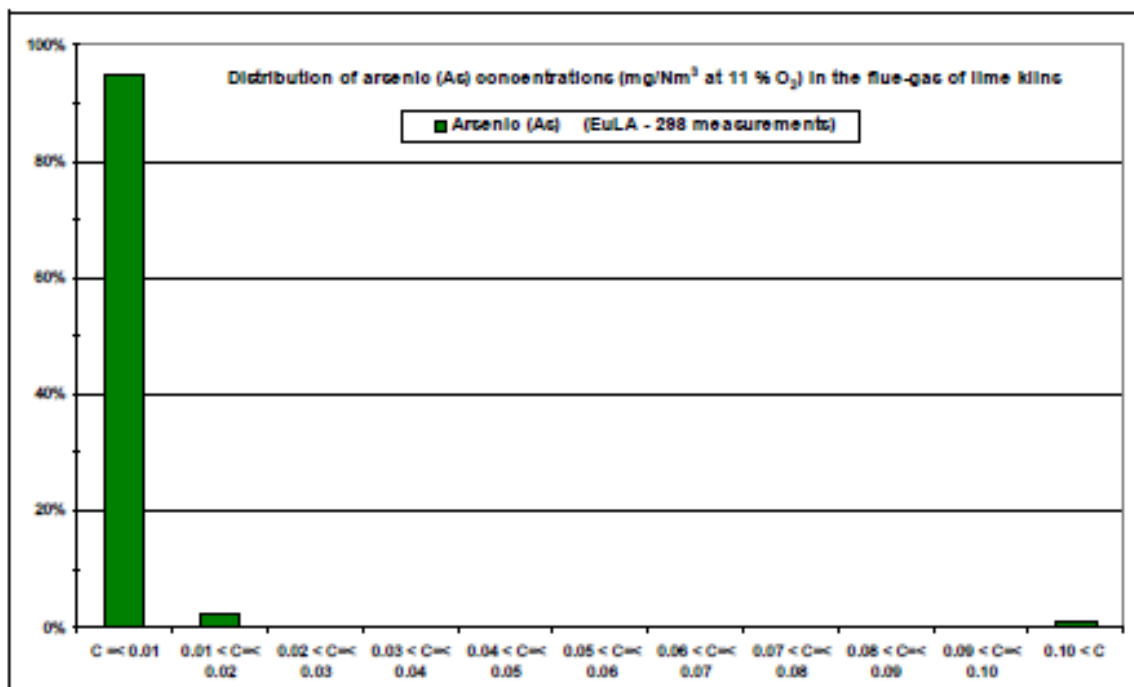


Figure 4.10 : Répartition des concentrations en arsenic dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

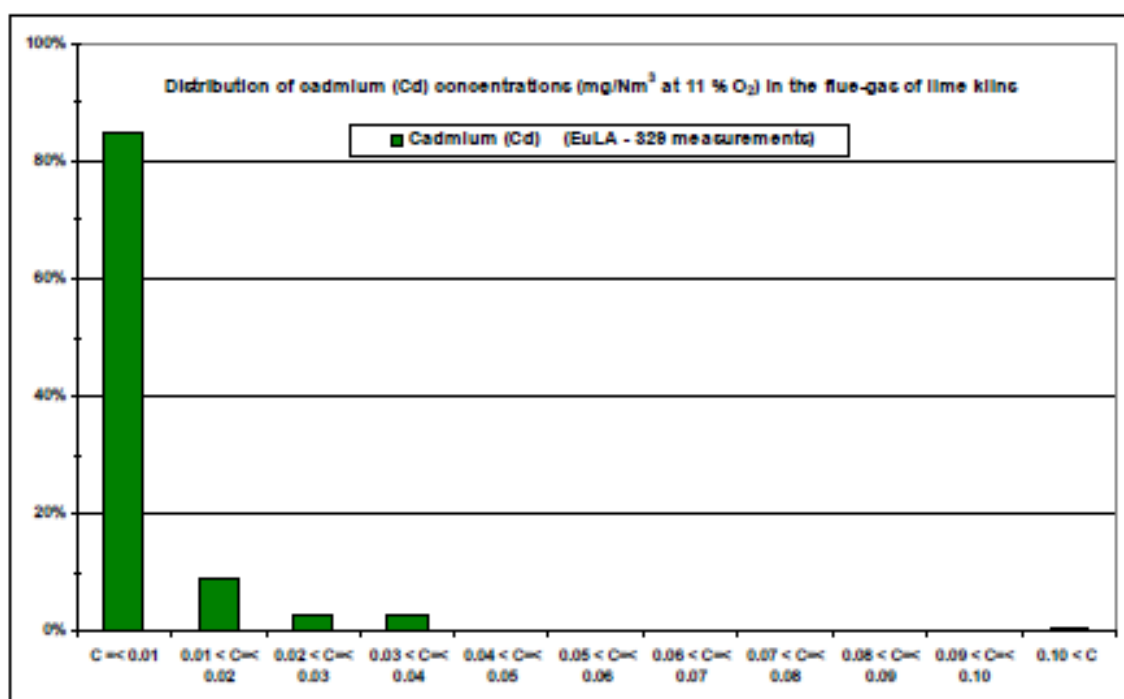


Figure 4.11 : Répartition des concentrations en cadmium dans les gaz résiduels des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

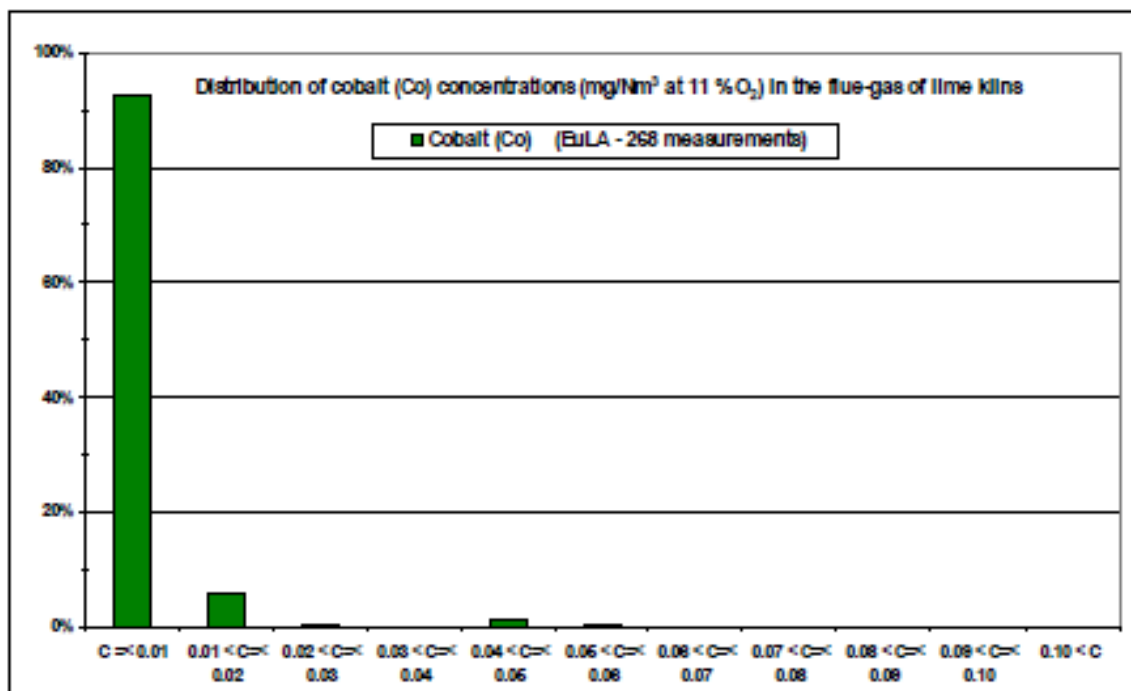


Figure 4.12 : Répartition des concentrations en cobalt dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

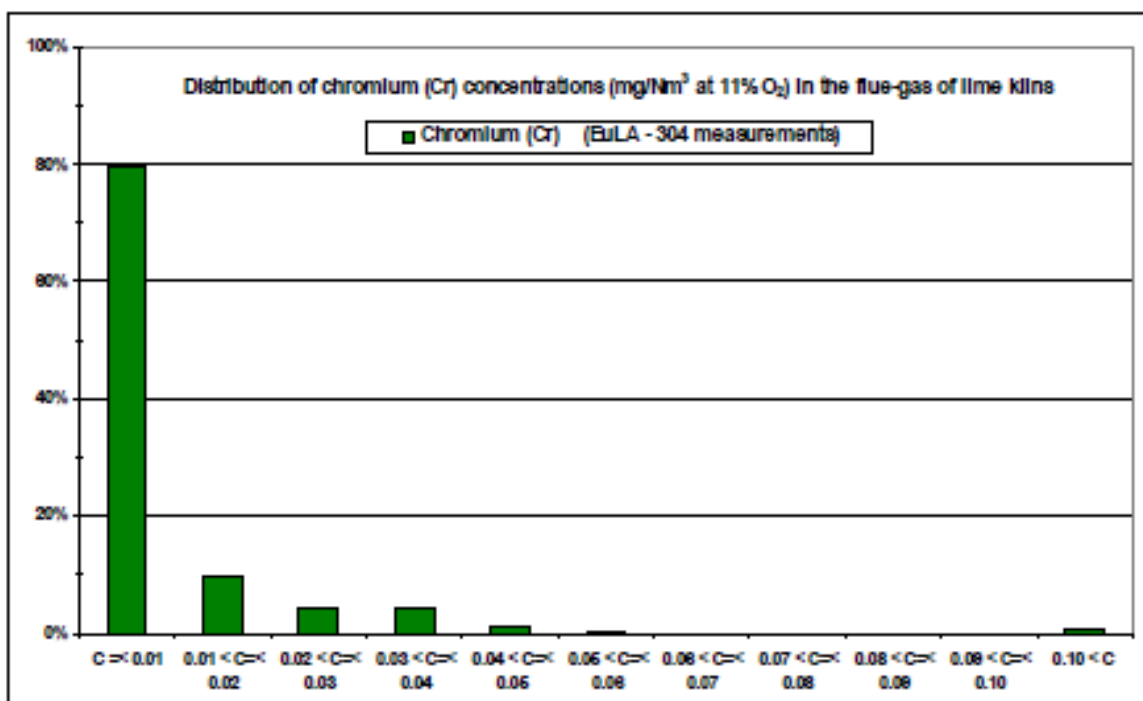


Figure 4.13 : Répartition des concentrations en chrome dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

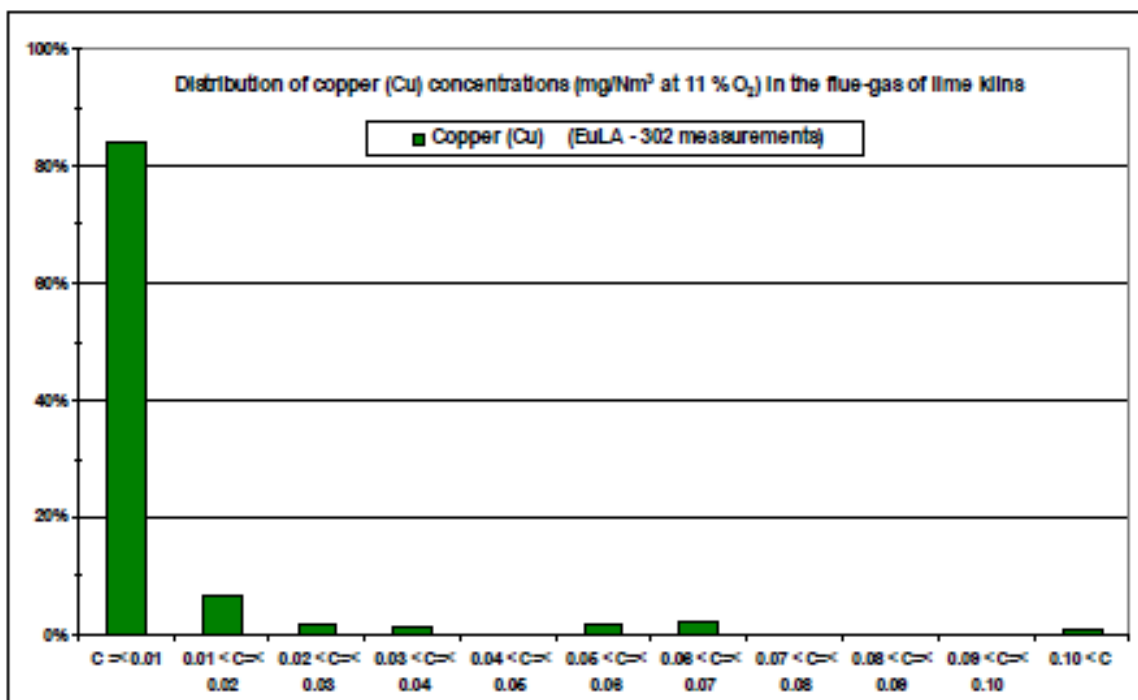


Figure 4.14 : Répartition des concentrations en cuivre dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

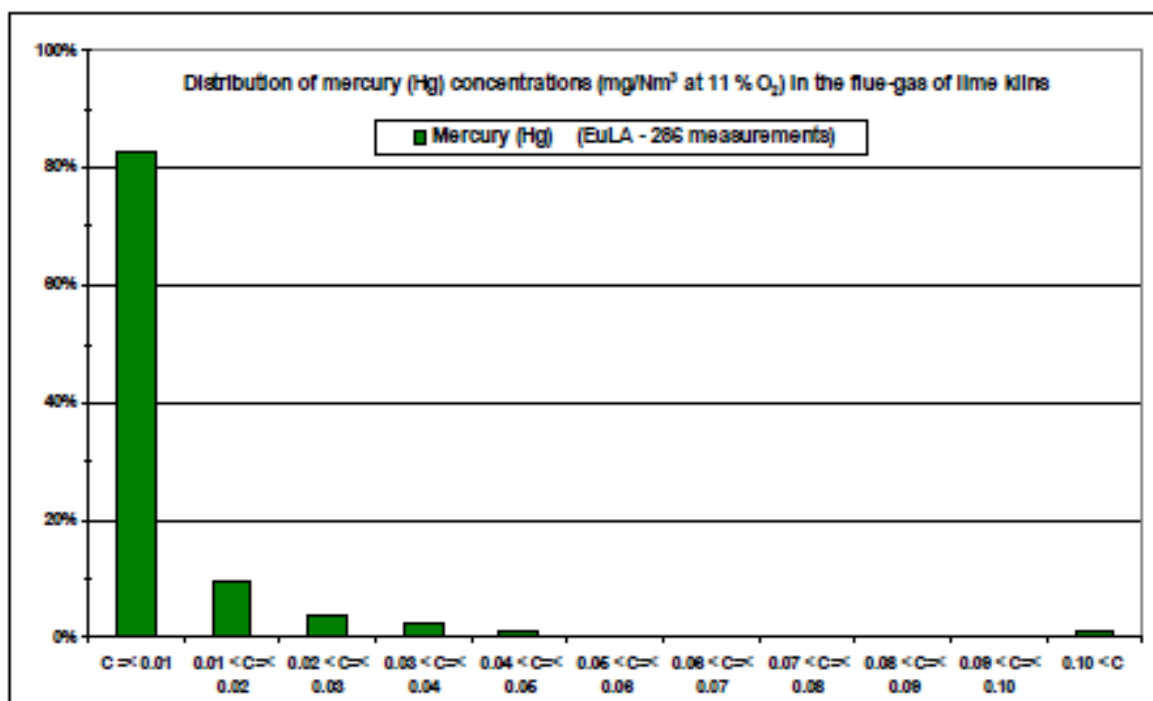


Figure 4.15 : Répartition des concentrations en mercure dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

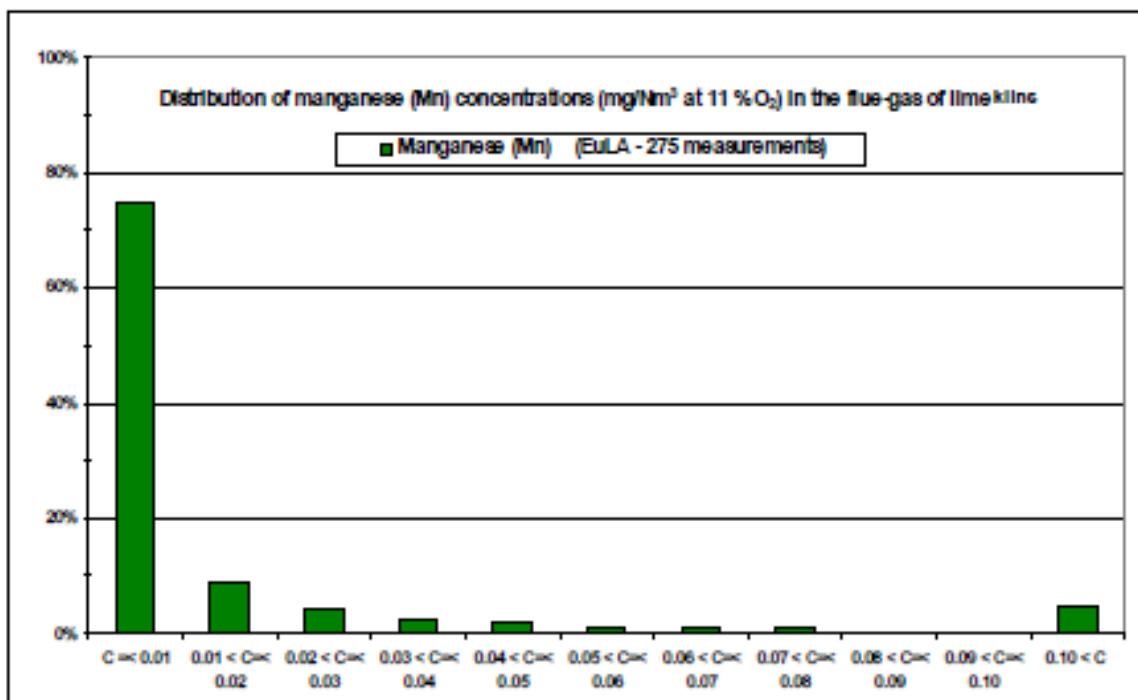


Figure 4.16 : Répartition des concentrations en manganèse dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

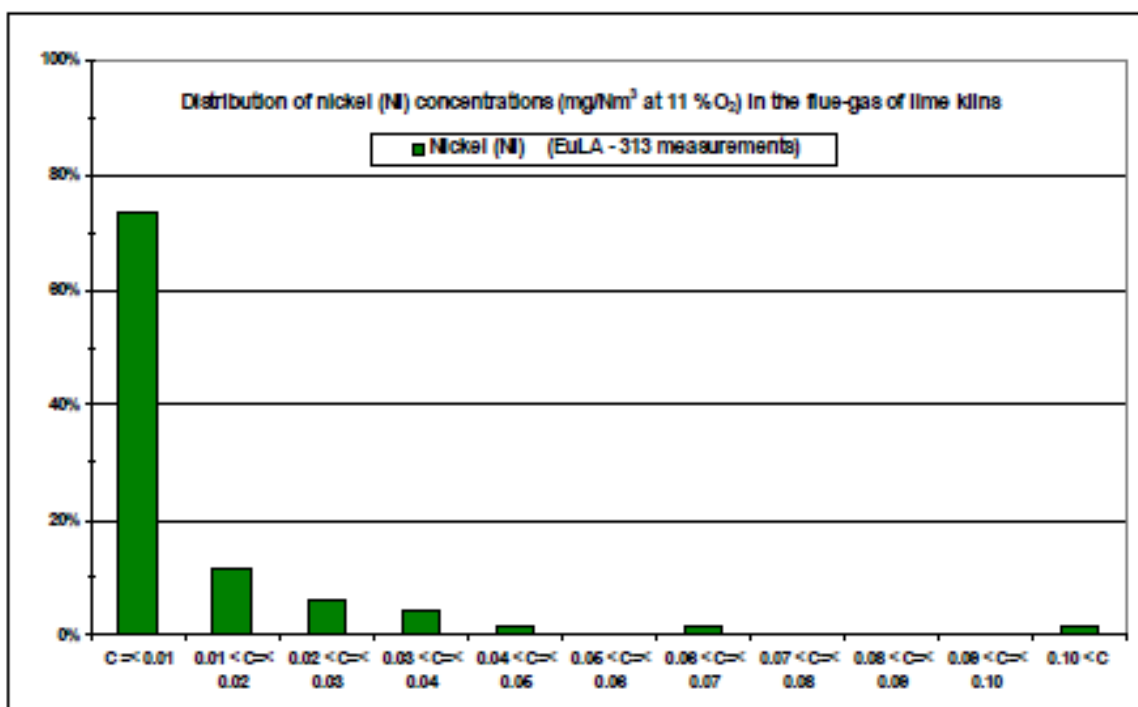


Figure 4.17 : Répartition des concentrations en nickel dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

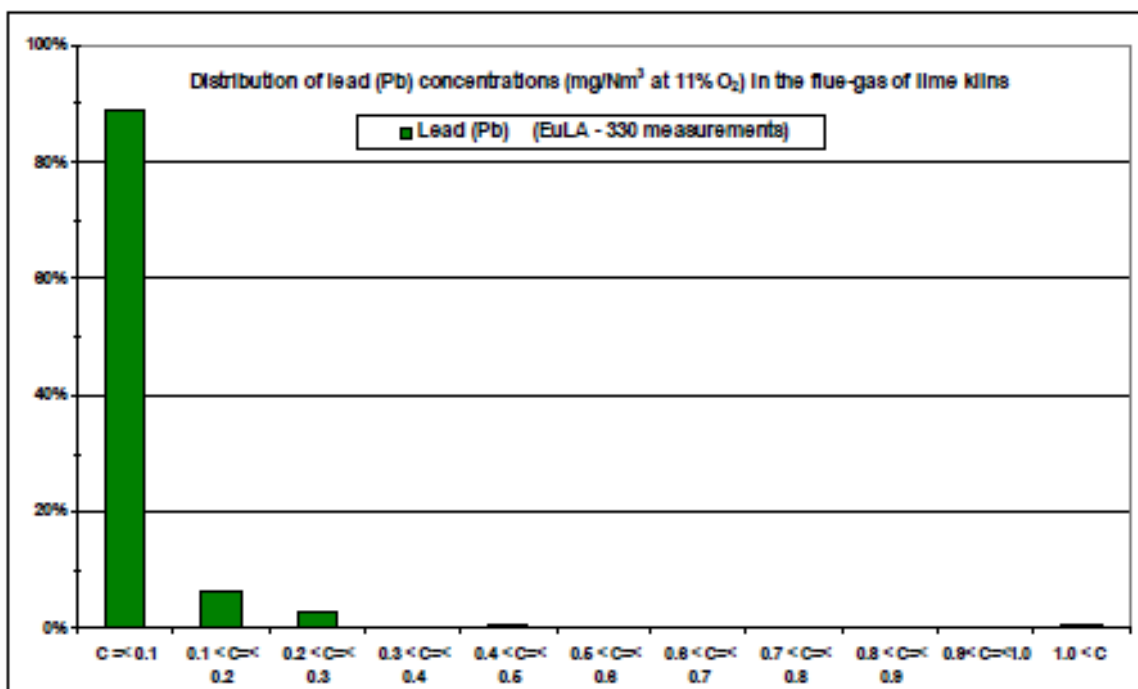


Figure 4.18 : Répartition des concentrations en plomb dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

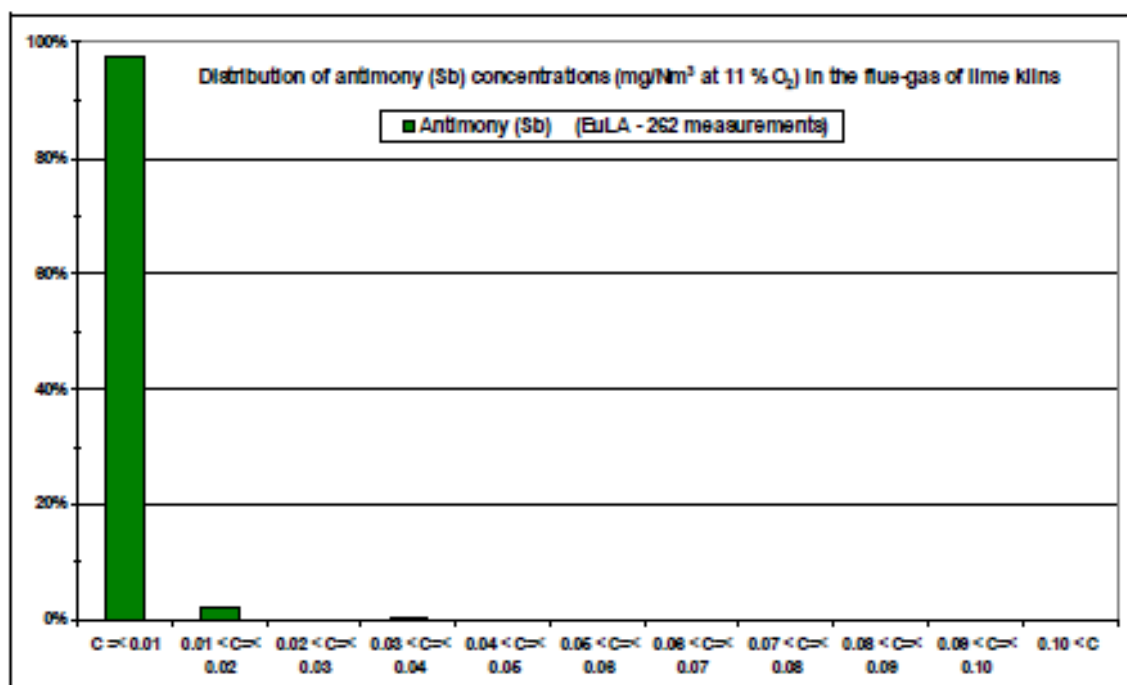


Figure 4.19 : Répartition des concentrations en antimoine dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

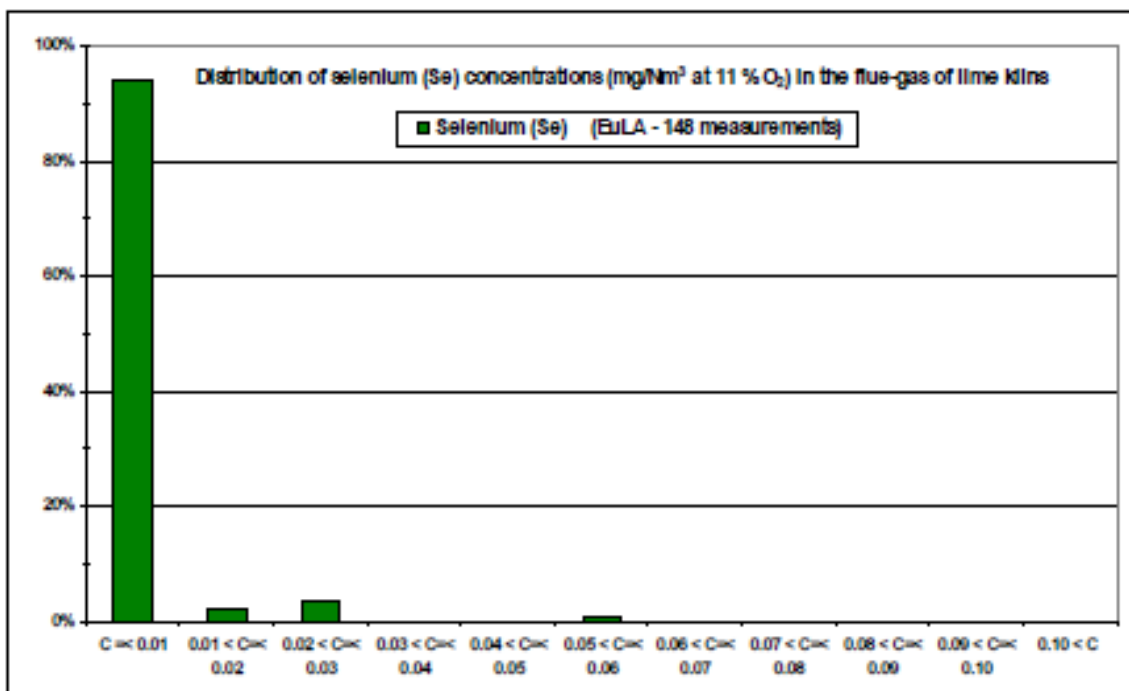


Figure 4.20 : Répartition des concentrations en sélénium dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

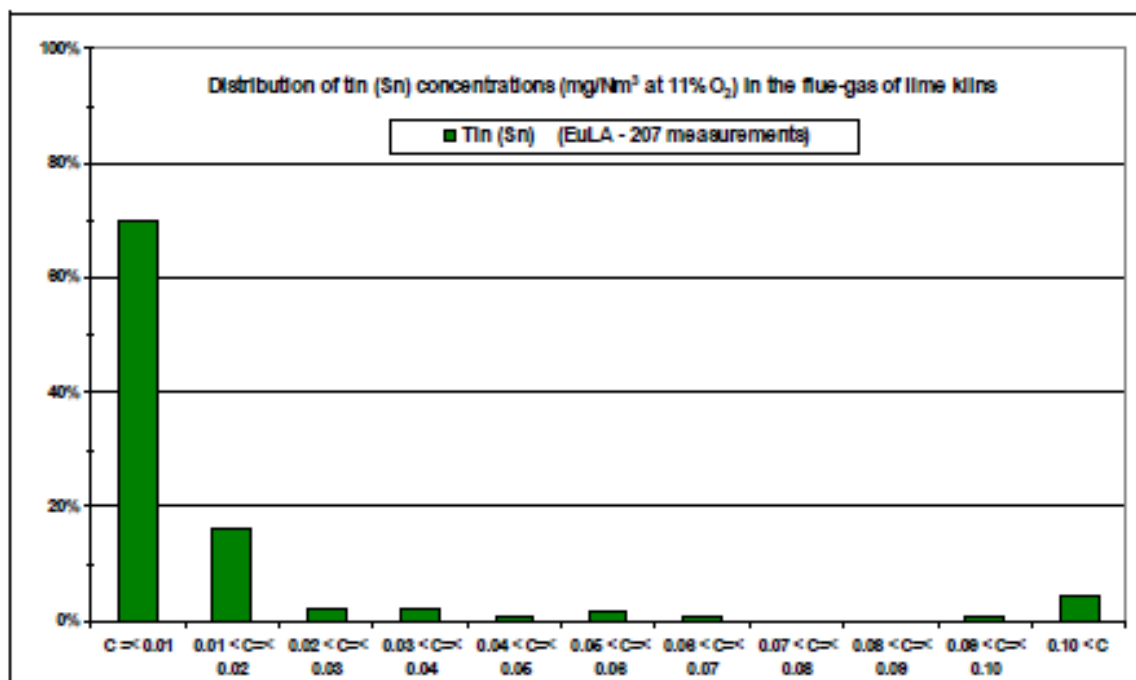


Figure 4.21 : Répartition des concentrations en étain dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

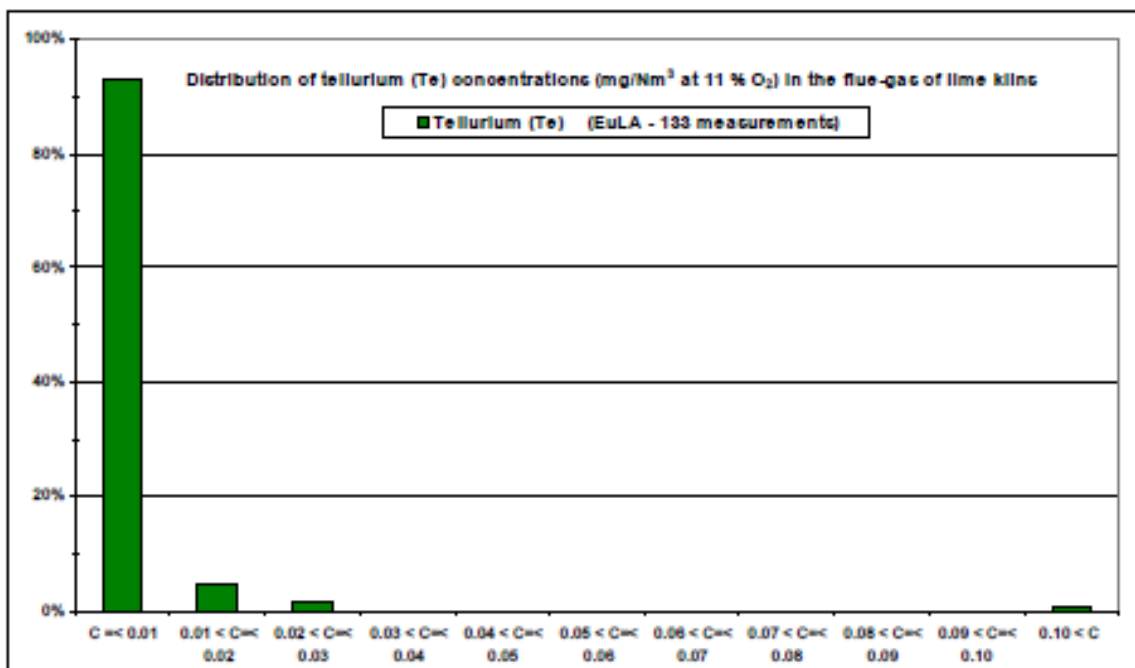


Figure 4.22 : Répartition des concentrations en tellure dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

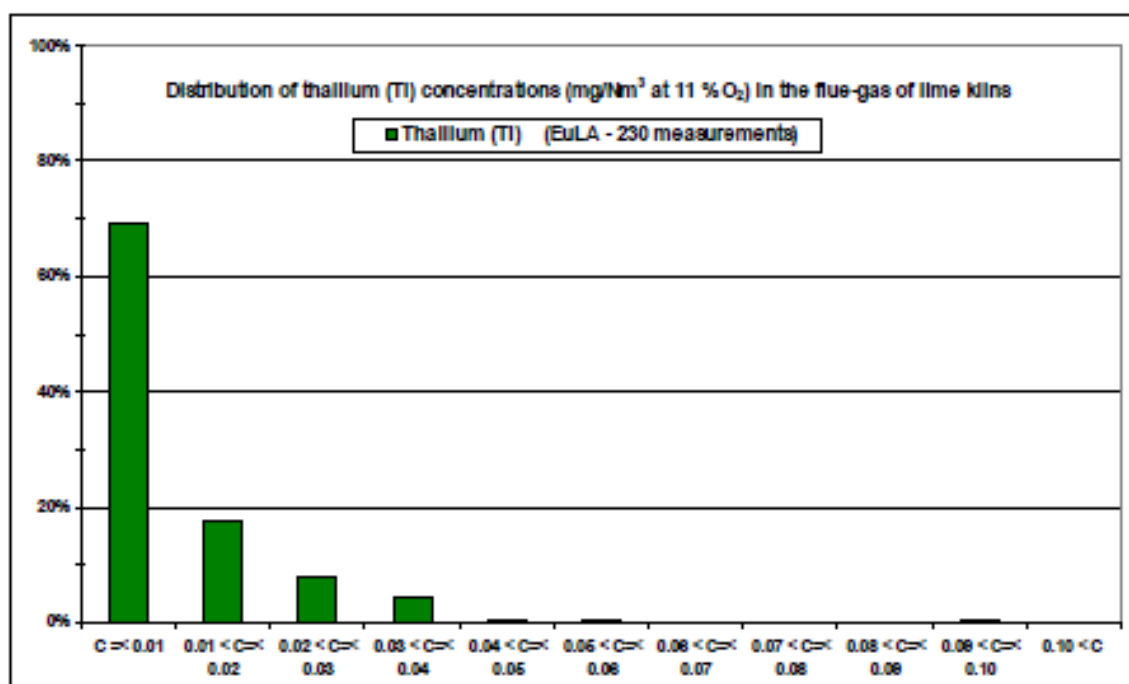


Figure 4.23 : Répartition des concentrations en thallium dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

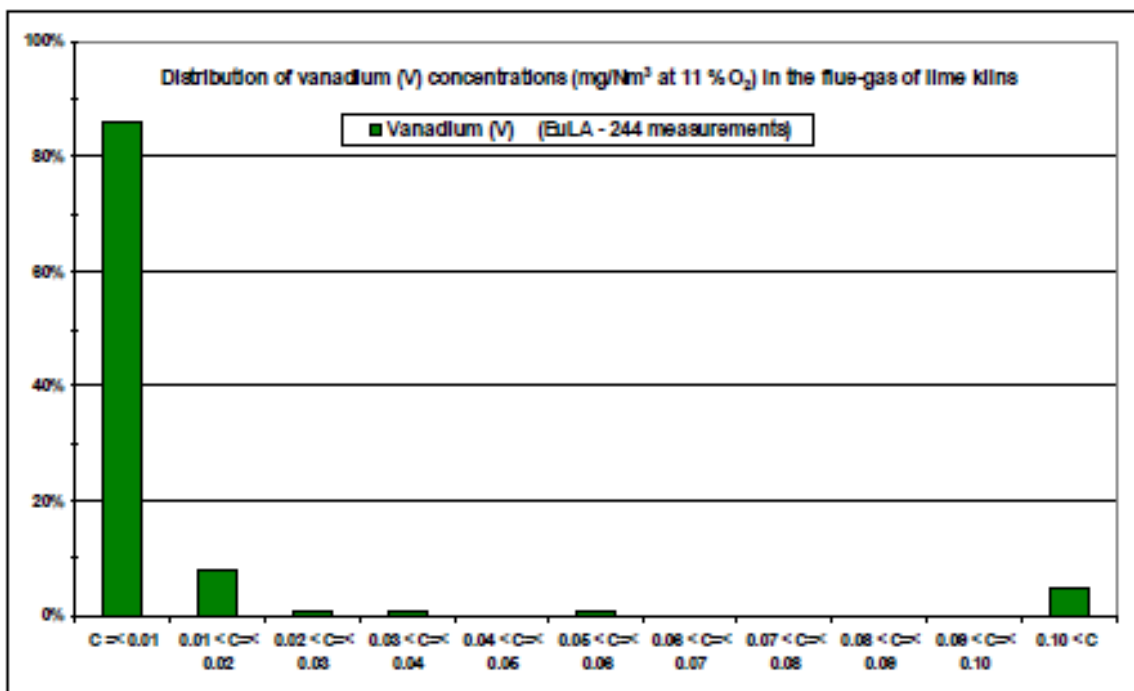


Figure 4.24 : Répartition des concentrations en vanadium dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

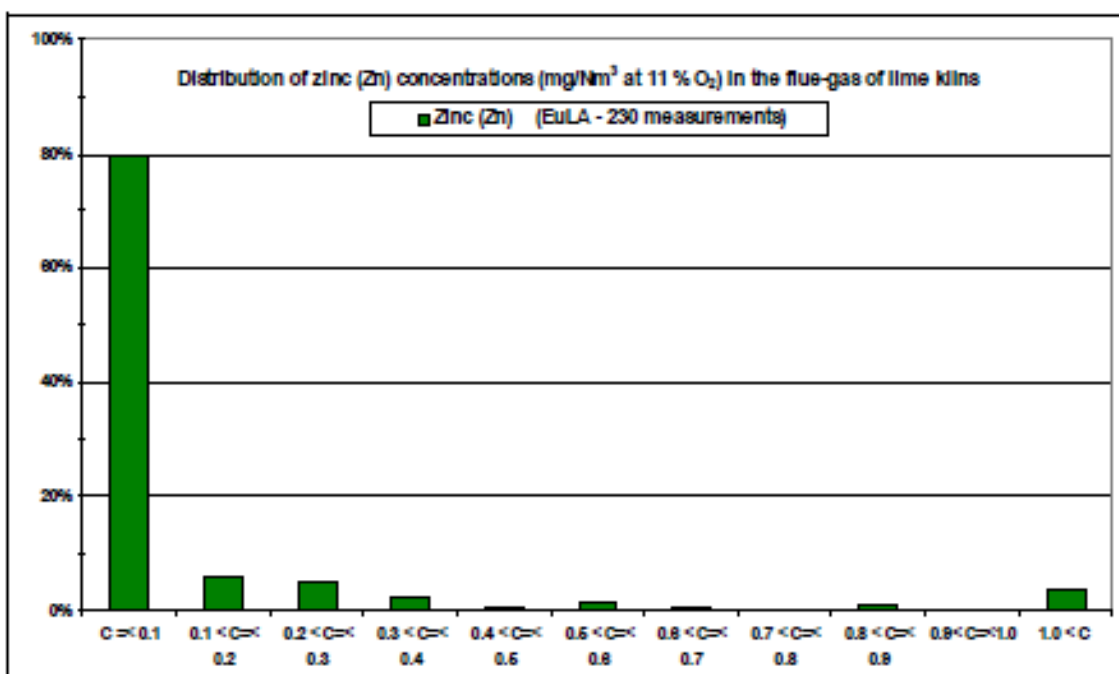


Figure 4.25 : Répartition des concentrations en zinc dans les gaz résiduaire des fours à chaux dans l'UE des 27
[56, EuLA, 2006]

4.3.2 Fabrication de la chaux – données spécifiques aux usines

4.3.2.1 Exemples de caractéristiques des matières premières

Un exemple de composition des matières premières utilisées dans une usine de chaux hongroise est indiqué dans le tableau 4.29.

Paramètre	Unité	Quantité
SiO ₂	%	0,30
Fe ₂ O ₃	%	0,09
Al ₂ O ₃	%	0,27
TiO ₂	%	0,01
CaO	%	54,94
MgO	%	0,91
K ₂ O	%	0,01
Na ₂ O	%	0,01
SO ₃	%	0,10
CO ₂	%	43,05
Cl	%	<0,01
Perte à l'allumage	%	43,11

Tableau 4.29 : Exemple de composition des matières premières utilisées dans une usine de chaux hongroise
[70, Hongrie, 2006]

4.3.2.2 Utilisation des déchets comme combustibles – exemples de teneurs en polluants acceptables dans les déchets

Des exemples de paramètres allemands et de teneurs en polluants acceptées pour différents types de déchets, c'est-à-dire les huiles usagées et les solvants, et les graisses et les farines animales (farines d'équarrissage) sont indiqués dans le tableau 4.30. De plus, des exemples de critères d'autorisation pour des substances et leurs valeurs calorifiques pour différents déchets combustibles utilisés dans les usines allemandes de chaux sont indiqués dans le tableau 4.31.

Paramètre	Unité	Huiles usagées et solvants		Graisses animales	Farines animales (farines d'équarrissage) ²⁾
		Teneur en polluants		Teneur en polluants	Teneur en polluants
		Moyenne	Minimale - maximale	Minimale - maximale	Minimale - maximale
Teneur en eau	% en masse	5	3 – 9		3,0 – 5,7
Résidus de coke	% en masse	1	0,6 – 1,4		
Carbone	% en masse				1,0 – 59,0
Teneur en cendres	% en masse	0,8	0,4 – 1,2		3,2 – 38,5
Soufre	% en masse	0,8	0,5 – 1,2	<0,01 – 0,03	
Chlore	% en masse	0,2	0,05 – 0,4	25 – 32	0,18 – 0,37
Fluor	% en masse				0,02 – 0,10
Azote	% en masse			460 – 590	
Métaux					
Cadmium	mg/kg	0,1	<1	<0,001 – 0,05	
Thallium	mg/kg	<0,5	<1	<0,001 – 0,1	0,1 – 10,0
Mercure	mg/kg	<0,1	<0,5	<0,01 – 0,8	0,05 – 1,0

Annexes

Antimoine	mg/kg	<1	<5		0,4 – 10,0
Arsenic	mg/kg	<0,1	<1		
Plomb	mg/kg	51	<100		0,7 – 10,0
Chrome	mg/kg	3	<10		3,0 – 63,0
Cobalt	mg/kg	1	<5		0,1 – 9,0
Cuivre	mg/kg	120	<250		5,2 – 50,0
Manganèse	mg/kg	5	<10		5,6 – 45,0
Nickel	mg/kg	2	<10		1,0 – 39,0
Vanadium	mg/kg	<1	<1		1,1 – 20,0
Etain	mg/kg	<4	<4		0,3 – 7,2
Arsenic	mg/kg				0,6 – 11,0
Cadmium	mg/kg				0,1 – 1,0
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	mg/kg	<188	<400	<0,1 – 0,9	
Σ Ni, V	mg/kg			<0,2	
Quantité totale de PCB ¹⁾	mg/kg	10	25		
1) Conformément à la norme DIN EN 12 766, partie 2, procédé B 2) Déchet combustible : Farines animales (farines d'équarrissage), valeur calorifique : <ul style="list-style-type: none"> • min=14 MJ/kg • max=21,5 MJ/kg 					

Tableau 4.30 : Teneur type en polluants acceptée pour les solvants et huiles usagées, graisses animales et farines animales (farines d'équarrissage) utilisés dans les usines allemandes de chaux
[155, Allemagne, 2007]

Paramètre	Déchet combustible 1		Déchet combustible 2		Déchet combustible 3		Déchet combustible 4	
	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur moyenne	Valeur maximale
	(mg/kg)							
Hg	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0	0,6	1,2
Cd	4,0	15,0	4,0	15,0	4,0	10,0	4,0	9,0
Tl	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	2,0
As	5,9	10,0	5,0	10,0	5,0	15,0	5,0	13,0
Co	5,0	10,0	5,0	10,0	5,0	10,0	6,0	12,0
Ni	20,0	100,0	20,0	100,0	20,0	100,0	25,0	50,0
Sb	40,0	100,0	40,0	100,0	25,0	60,0	25,0	60,0
Pb	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	70,0	200,0
Cr	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	120,0
Cu	100,0	250,0	90,0	250,0	90,0	500,0	120,0	300,0
Mn	50,0	100,0	50,0	100,0	50,0	100,0	50,0	100,0
V	10,0	20,0	10,0	20,0	10,0	20,0	10,0	25,0
Sn	15,0	50,0	15,0	50,0	15,0	75,0	30,0	70,0
Quantité totale de Cl	7000,0	10000,0	7000,0	10000,0	7000,0	10000,0	7000,0	10000,0
Quantité totale de F	250,0	500,0	250,0	500,0	250,0	1000,0	250,0	1000,0
Be	0,5	5,0	0,5	5,0	0,5	5,0	0,5	2,0
Zn	400,0	500,0	400,0	500,0	400,0	1000,0	400,0	1000,0
PCB		<3		<1		<1		<1
	(% en poids/poids)							
Humidité	8,0	<10,0	11,0	<12,5	18,0	<20,0	18,0	<20,0
Teneur en cendres	6,0	<7,0	8,0	<9,0	11,0	<15,0	11,0	<15,0
Quantité totale de	0,3	<0,5	0,3	<0,5	0,2	<0,3	0,2	<0,3

S								
	(MJ/kg)							
Valeur calorifique ¹⁾	25 – 31	23 – 29	20 – 24	18 – 22				
Valeur moyenne : Valeur du percentile 50, basée sur l'expérience pratique en prenant en considération la variation possible de la composition du déchet combustible Valeur maximale : valeur du percentile 100 ¹⁾ Min – max								

Tableau 4.31 : Exemples des critères d'autorisation (valeurs moyennes et maximales) pour des substances présentes dans différents déchets combustibles utilisés dans les usines allemandes de chaux
[50, Allemagne, 2006]

4.3.2.3 Exemples de données sur les consommations et les émissions

Consommation d'énergie

Le tableau 4.32 indique les données d'exploitation et la demande spécifique en énergie des fours à chaux autrichiens en 2004. Ces différents types de fours à chaux utilisent du gaz naturel, du fioul lourd et/ou du coke comme combustible.

Paramètre		Unité	Fours verticaux à cycles alternés	Fours verticaux annulaires	Autres fours verticaux
Capacité des fours unitaires		t/jour	150 – 390	140 – 220	100 – 200
Demande spécifique en énergie		MJ/t de chaux	3500 – 3800	4200 – 4700	3800 – 5100
Combustibles utilisés			Gaz naturel, fioul lourd.	Gaz naturel, fioul lourd.	Gaz naturel, coke
Quantité annuelle de combustibles utilisés (tous fours confondus)	Gaz naturel	millions de Nm ³	46	12	13
	Fioul lourd	t	4000	4500	-
	Coke	t	-	-	1000

Tableau 4.32 : Données d'exploitation et demande spécifique en énergie des fours à chaux autrichiens en 2004
[66, Autriche, 2006]

En moyenne, la demande en énergie pour la cuisson de la chaux en Autriche est d'environ 3760 MJ/t de chaux. La corrélation entre la taille du four et la demande en énergie n'est pas aussi significative que pour la fabrication du ciment, car les pertes par rayonnement sont plus faibles. L'un des facteurs influençant la demande en énergie est la teneur résiduelle en CO₂ dans les produits ; elle dépend de la réactivité du produit de chaux. La demande en énergie est plus importante pour la chaux vive fortement calcinée que pour la chaux vive légèrement calcinée. La demande en énergie dépend également du CO₂ résiduel. La demande en énergie plus faible des fours verticaux à cycles alternés, et en partie des autres fours, dépend de la teneur résiduelle élevée en CO₂ (>5%) dans les produits. Pour fabriquer de la chaux à faible teneur résiduelle en CO₂, la demande en énergie augmente [66, Autriche, 2006], [168, GTT CLM, 2007].

Les exemples de consommation d'énergie pour la fabrication de la chaux en Espagne indiqués dans le tableau 4.33 sont des valeurs moyennes. La valeur moyenne pondérée calculée pour les fours à chaux espagnols est de 3,984 GJ/tonne de chaux. Une valeur de 3,681 GJ/tonne de chaux est prévue pour la période 2008 – 2012 [55, Espagne, 2006].

Type de four	Nombre	Pourcentage %	Consommation d'énergie mise à jour GJ/tonne de chaux		
			Minimale	Moyenne	Maximale
Fours longs rotatifs (LRK)	4	7		6,6 ¹⁾	
Fours rotatifs avec préchauffeur (PRK)	1	2	5,4	-	-
Fours verticaux à cycles alternés (PFRK)	35	61	3,534	3,752	3,889
Fours verticaux annulaires (ASK)	2	4	3,958	4,156	4,355
Fours verticaux à alimentation mixte (MFSK)	-	-	-	-	-
Autres fours (OK) ²⁾	15	26	4,085	4,150	4,268
1) Sociétés basées en dehors de l'Espagne. Une valeur de consommation d'énergie d'environ 6,6 GJ/tonne de chaux est prise en considération					
2) Autres fours verticaux					

Tableau 4.33 : Consommation d'énergie par différents types de fours à chaux en Espagne [55, Espagne, 2006]

Compilation d'émissions observées dans des États membres de l'Union européenne

Des exemples types des émissions liées à différents types de fours à chaux en Allemagne sont indiqués dans le tableau 4.34.

Type de four	Concentration en émissions ³⁾				
	NO _x (mg/Nm ³) ¹⁾	CO (mg/Nm ³)	PCDD/F (ng I- TEQ/Nm ³)	HCl ⁵⁾ (mg/Nm ³)	HF (mg/Nm ³)
Chaux vive (légèrement à fortement calcinée)					
Fours longs rotatifs (LRK)	<500	<1000	<0,1	<50	<1
Fours rotatifs avec préchauffeur (PRK) 2)	<1500	<1000	<0,1	<20	<1
Fours verticaux à cycles alternés (PFRK)	<100 – <400	<1000	0,001 – <0,1	<10	<1
Fours verticaux annulaires (ASK)	<100 – <500	1000 – <3000	0,003 – <0,1	<40	<2
Fours verticaux à alimentation mixte (MFSK)	<100 – <500	6000 – 42000	0.01 – <0,1 ⁴⁾	<20	<1
Autres fours (OK) :					
• four vertical à chambres multiples	<500	<2000	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
• four à double chambre inclinée	300 – <500	<2000	0,001 – <0.1	<10	<1
Dolomite calcinée (légèrement calcinée à frittée)					
Fours longs rotatifs (LRK)	-	-	-	<150	<1
Fours rotatifs avec préchauffeur (PRK)	-	-	-	<30	<1
Fours verticaux à alimentation mixte (MFSK)	-	-	-	<20	<1
Utilisation des déchets				106)	16)
				607)	47)
1) Monoxyde d'azote et dioxyde d'azote, indiqués « dioxyde d'azote »					
2) Four rotatif à préchauffeur à grille					
3) Les émissions en concentration sont mesurées comme valeurs moyennes sur six heures et sont associées à 10 % de O ₂ afin de pouvoir les comparer					
4) Dans un cas, 0,26 ng de I-TEQ/Nm ³ a été mesuré au niveau d'un four vertical à alimentation mixte. Ce four a été mis hors service à la fin de l'année 2006					
5) Selon la teneur en composés chlorés dans le calcaire (50 à 100 ppm)					
6) Valeur moyenne journalière					
7) Valeur moyenne semi-horaire					

Tableau 4.34 : Exemples types des émissions liées aux fours à chaux en Allemagne [46, Allemagne, 2006]

Des exemples d'émissions ont été observés dans des usines de chaux dans plusieurs États membres de l'Union européenne utilisant différents fours et combustibles sont indiqués dans le tableau 4.35.

État membre de l'Union européenne	Émissions de poussières (mg/Nm ³)	Émissions de NO _x (mg/Nm ³)	Émissions de SO _x (mg/Nm ³)	Émissions de CO (mg/Nm ³)	Émissions de carbone organique total (mg/Nm ³)	Fours utilisés	Combustibles utilisés
Allemagne	-	100 – 150 ¹⁾	<100 ²⁾	-	-	Four vertical à chambres multiples	-
	-	<500	-	-	-	Fours rotatifs	-
	-	-	-	-	<5 – >5 ⁷⁾	Fours verticaux à alimentation mixte	-
	-	-	-	-	5 – <50 ⁸⁾ <1 (Benzène)	Fours verticaux annulaires	-
Exemple allemand particulier	-	-	-	-	995 14.6(Benzène)	Fours verticaux annulaires	-
Finlande ⁶⁾	23)	65	15	-	-	Fours verticaux à cycles alternés	Fioul lourd ⁴⁾
Hongrie ⁶⁾	1.4	32.2	4.8	3.9	-	-	Gaz naturel
République Tchèque ⁵⁾	-	400 t/an	130 t/an	-	-	-	-
1) 10 % de O ₂ 2) Si plus de 60 % de la capacité thermique nominale proviennent de déchets (plus de 40 % dans le cas des déchets dangereux), 50 mg/Nm ³ est établi comme valeur moyenne journalière, associée à 10% d'oxygène 3) Filtre à manches 4) Faible teneur en soufre à 0,6%, et la matière première contient peu de soufre également 5) 2006 6) Mesures ponctuelles 7) Dépend des conditions du procédé, les fours verticaux à alimentation mixte ne conviennent pas pour l'utilisation des déchets ; pour les fours verticaux à double chambre inclinée et les fours verticaux à chambres multiples, aucune donnée n'est disponible 8) Les fours de ce type qui utilisaient des déchets tels que des solvants ou des huiles usagées ne présentaient pas d'émissions de carbone organique total plus élevées							

Tableau 4.35 : Exemples d'émissions de NO_x observées dans les États membres de l'Union européenne

[45, Schorcht, 2006] [46, Allemagne, 2006], [64, République Tchèque, 2006], [71, Hongrie, 2006]

Des valeurs concernant différentes émissions de fours à chaux autrichiens sont indiquées dans le tableau 4.36. Aucune mesure/technique n'était utilisée en 2006 pour réduire les émissions de NO_x. Les émissions de CO se situent entre 0,007 et 0,22 g/Nm³ en relation avec une teneur résiduelle élevée en CO₂, et atteignent 5 g/Nm³ en relation avec une faible teneur résiduelle en CO₂. Pour les fours verticaux annulaires, les émissions de CO se situent entre 0,1 et 3 g/Nm³, et, dans les autres fours verticaux, entre 0,01 et 5 g/Nm³.

Paramètre	Unité	Concentration1) 2)		
		Fours verticaux à cycles alternés ³⁾	Fours verticaux annulaires ³⁾	Autres fours verticaux ³⁾
Volume de gaz résiduaires	Nm ³ /h	15000 – 45000	11000 – 20000	7500 – 22000
Teneur en oxygène	% en volume	8 – 12	6 – 15	6 – 17,5
Poussières	mg/Nm ³	<20		
HCl	mg/Nm ³	0,6 – 3,6		
HF	mg/Nm ³	0,01 – 0,14		
NO _x exprimés en NO ₂	mg/Nm ³	<150	<250	<250
SO _x exprimés en SO ₂	mg/Nm ³	<100	<10	<20
CO	g/Nm ³	0,007 à 0,22 (teneur résiduelle élevée en CO ₂), jusqu' à 5 (teneur résiduelle faible en CO ₂)	0,1 – 3	0,01 – 5
Quantité totale de C	mg/Nm ³	<100	<10	<10
Σ (Cd, Tl) ⁴⁾	mg/Nm ³	0,0001 – 0,002		
Hg	mg/Nm ³	0,000 1 – 0,003		
Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Sn ⁴⁾	mg/Nm ³	0,000 1 – 0,0052		
PCDD/F ⁴⁾	ng I-TEQ/Nm3	<0,05	<0,03	<0,03
Benzène	mg/Nm ³	<0,04		
Benzo-a-pyrene ⁴⁾	mg/Nm ³	<0,0003		
1) Les concentrations sont des mesures/techniques unitaires avec des intervalles de mesure de 30 minutes à un jour				
2) Se réfère à 10% d'oxygène dans les gaz résiduaires				
3) Utilisation de filtres à manches				
4) La valeur inférieure donne la limite de détection				

Tableau 4.36 : Émissions provenant de fours à chaux autrichiens [66, Autriche, 2006]

Des exemples de données sur les émissions obtenues auprès de plusieurs usines de chaux finlandaises utilisant différents types de fours sont indiqués dans le tableau 4.37. Les données sur les émissions du tableau 4.37 ont été collectées entre 1998 et 2006. Du charbon et du coke, du fioul lourd ou léger, du gaz de coke ou du coke de pétrole ont été utilisés comme combustibles, mais aucun déchet combustible n'a été utilisé. En 2005, des émissions de poussières inférieures à 5 mg/Nm³ pouvaient être obtenues en utilisant un filtre électrostatique dans un four rotatif, et des plages d'émissions de l'ordre de 1,7 à 2,2 mg/Nm³ pouvaient être obtenues en utilisant un filtre à manches dans un four vertical annulaire. Le tableau 4.38 indique des exemples d'émissions de métaux provenant d'un four à chaux finlandais utilisant du fioul régénéré comme combustible.

Émissions (mg/Nm ³)	N° d'unité	Four	Filtre	Combustibles	1998 O ₂ % ⁶⁾	1999 O ₂ % ⁶⁾	2000 O ₂ % ⁶⁾	2001 O ₂ % ⁶⁾	2002 O ₂ % ⁶⁾	2003 O ₂ % ⁶⁾	2004 O ₂ % ⁶⁾	2005 O ₂ % ⁶⁾	2006 O ₂ % ⁶⁾										
Poussières	Unité 1	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	<10	6	32 – 18	7	<5 et 13	6,7	5	6,4	<5	6,1	<5	9,3	<5 ⁷⁾	12,5	<5	6			
		Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	156 – 113	10			192 et 9	10,7	14 ⁷⁾	11	<5 ⁷⁾	11	<5	10,9	34 – 41 ⁷⁾	11,6	<5 ⁷⁾	11			
	Unité 2	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon						26 – 40	7				63 – 48	7,2 – 10					85 – 114	6,6	
	Unité 3	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon					1 – 243 ⁸⁾	4,5							38 – 54	5,2					
		Four vertical annulaire ²⁾	Manche ⁵⁾	Fioul lourd, fioul léger					12 ⁷⁾	11,9							0,7 – 1,1	4,2	2,2	1,7	5		
	Unité 4	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05			2468	6,5						130 – 149	7,2			255 – 335 ⁷⁾	12,6	154 – 229	8		
	Unité 5	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke	62									5			6	9,6					
		Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke	38									5			79	9,6					
	Unité 6	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Fioul régénéré															1,8 ⁹⁾				
NO _x	Unité 1	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	868	6	620	7	771 ± 120, 910	6,7		6,4	898 ± 135	6,1	645 ± 100	9,3	685 ± 100 ⁷⁾	12,5	800 ± 160	6			
		Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	722	10	-	-	810	10,7	610 ⁷⁾	11	563 ± 110 ⁷⁾	11	730 ± 140	10,9	890 ± 110 ⁷⁾	11,6	970 ± 200 ⁷⁾	11			
	Unité 2	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon							280	7			522 – 399	7,2 – 10					393 ⁹⁾	6,6	
	Unité 3	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon					507	4,5							157 – 160	5,2					
		Four vertical annulaire ²⁾	Manche ⁵⁾	Fioul lourd, fioul léger					167 – 101 ⁷⁾	11,9							243	4,3					
	Unité 4	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05			33810)	6,5					590 – 440	7,2			616 ⁷⁾	12,6	411 – 479 ¹¹⁾	8			
	Unité 5	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke																			
		Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke																			
	Unité 6	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Fioul régénéré															67 ⁹⁾ 10)				
SO ₂	Unité 1	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	475	6	110	7	258 ± 40	6,7		6,4	173 ± 34	6,1	240 ± 35	9,3	950 ± 90 ⁷⁾ , 214	12,5	241 ± 50	6			
		Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	390	10	-	-	350	10,7	330 ⁷⁾	11	210 ± 40 ⁷⁾	11	340 ± 50	10,9	410 ± 60 ⁷⁾	11,6	138 ± 28 ⁷⁾	11			

Annexes

	Unité 2	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon							<10	7			165 – 126	7,2 – 10					332 – 350	6,6
	Unité 3	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon						4,5								5,2				
		Four vertical annulaire ²⁾	Manche ⁵⁾	Fioul lourd, fioul léger						11,9							11	4,3				
	Unité 4	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05			143	6,5					66–142	7,2			851 ⁷⁾	12,6		8		
	Unité 5	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke																		
			Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke																	
	Unité 6	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Fioul régénéré															159)			
CO ₂	Unité 1	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	476	6	430	7	467 ± 72, 453	6,7		6,4	432 ± 70	6,1	360 ± 55	9,3	260 ± 60 ⁷⁾	12,5	475 ± 70	6		
		Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	320	10	-	-	310	10,7	300 ⁷⁾	11	303 ± 16)	11	340 ± 45	10,9	280 ± 60 ⁷⁾	11,6	285 ± 43 ⁷⁾	11		
	Unité 2	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon								7			424 – 324	7,2 – 10)	6,6	
	Unité 3	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon					290	4,5								5,2				
		Four vertical annulaire ²⁾	Manche ⁵⁾	Fioul lourd, fioul léger					292 ⁷⁾	11,9								4,3				
	Unité 4	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05			490	6,5						7,2					8			
	Unité 5	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke																		
		Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Gaz de coke																		
Unité 6	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche ⁵⁾	Fioul régénéré																			
CO	Unité 1	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	67	6	4	7	31	6,7		6,4	1	6,1	4	9,3	11 ⁷⁾	12,5		6		
		Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05	68	10	-	-	65	10,7	42 ⁷⁾	11	80 ⁷⁾	11	160	10,9	80 ± 60 ⁷⁾	11,6	227	11		
	Unité 2	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon							120	7			14	7,2 – 10					25,7 – 27	6,6
	Unité 3	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon						4,5								5,2				
		Four vertical annulaire ²⁾	Manche ⁵⁾	Fioul lourd, fioul léger						11,9								4,3				
	Unité 4	Four long rotatif ¹⁾	Filtre électrostatique ⁴⁾	Charbon, coke 05			56	6,5					94	7,2			3,8 ⁷⁾	12,6	336	8		

	Unité 5	Four vertical à cycles alternés ³⁾		Manche5)Coke gaz																																				
		Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche5)	Gaz de coke																																				
	Unité 6	Four vertical à cycles alternés ³⁾	Manche5)	Fioul régénéré															65 ⁸⁾																					
1)	Four long rotatif																						7)	O ₂ >11%																
2)	Four vertical annulaire																						8)	Filtre exclus																
3)	Four vertical à cycles alternés																						9)	Produit calciné : 310 t/j																
4)	Précipitateur électrostatique																						10)	NO ₂																
5)	Filtre à manches, textile																						11)	NO																
6)	O, état normal																																							

Tableau 4.37 : Émissions de poussières, NO_x, SO_x, CO et CO₂ provenant de plusieurs fours à chaux finlandais utilisant différents types de fours à chaux entre 1998 et 2006
[63, Finlande, 2006, 65, Finlande, 2006]

Émissions de métaux		
Métal	Unité	Émissions (formation de particules/ gaz)
Cd	µg/Nm ³	0,05/0,08
Ti	µg/Nm ³	0,30/<1,6
Hg	µg/Nm ³	0,001/0,026
Sb	µg/Nm ³	0,5/<1,6
As	µg/Nm ³	<0,2/1,9
Pb	µg/Nm ³	5,2/6,0
Cr	µg/Nm ³	0,7/15
Co	µg/Nm ³	0,14/1,3
Cu	µg/Nm ³	0,32/7,2
Mn	µg/Nm ³	3,6/6,0
Ni	µg/Nm ³	3,0/6,0
V	µg/Nm ³	<0,1/37

Tableau 4.38 : Émissions de métaux provenant d'un four à chaux finlandais [65, Finlande, 2006]

4.3.3 Fabrication de la chaux – exemple de manipulation d'huiles usagées dans un four vertical (et d'autres fours)

Afin de transformer un four vertical au gaz (et d'autres fours) en un four vertical chauffé avec des huiles usagées, il a été nécessaire de modifier les brûleurs et de construire une infrastructure dédiée au déchargement et au stockage des huiles usagées.

Comme cela est illustré sur la figure 4.26, dans ce cas spécifique, les huiles usagées sont livrées à l'usine de chaux par rail ou par la route, dans des camions-citernes par exemple. Deux citernes à double paroi d'une capacité de 100 m³ chacune ont été construites. Les huiles usagées sont transférées des wagons ou des camions vers les cuves qui se trouvent dans une zone spécialement conçue pour contenir tout déversement. Les eaux de surface (eaux de pluie) sont fournies à un séparateur d'huile. Étant donné que la zone de remplissage est conforme à l'ensemble des exigences légales, elle sert également à nettoyer et à faire le plein de tout type de véhicules (rail ou route).

Pendant le déchargement des wagons ou des camions-citernes, les huiles usagées s'écoulent dans une première station de pompage et de filtrage par un raccord de tuyau, puis par une conduite en acier. À partir de ce point, elles sont pompées dans les deux cuves de 100 m³ à l'aide de conduites souterraines à paroi double. Avec une capacité de four de 250 à 300 t de chaux/jour, cette capacité de stockage est quasiment équivalente à la consommation d'une semaine.

À partir des cuves, l'huile s'écoule dans une seconde station de pompage, comme cela est illustré sur la figure 4.27, qui se trouve juste à côté du four. Une pompe d'alimentation achemine l'huile vers un autre filtre et vers un système de chauffage électrique, qui chauffe l'huile à 60 à 80 °C. Ces températures sont nécessaires pour réduire la viscosité de l'huile, améliorant ainsi son atomisation dans le brûleur, et sa combustion optimale. Des conduites ascendantes transportent l'huile chauffée vers une station de dosage et de mesure, comme cela est illustré sur la figure 4.28, à partir de laquelle elle est distribuée aux brûleurs individuels. Dans les brûleurs, le combustible est mélangé avec l'air et les deux sont directement injectés dans le four.

Aucun déchet n'est produit pendant la combustion de l'huile filtrée. Les déchets sont produits uniquement pendant le procédé de filtrage de l'huile. Les filtres sont nettoyés, et tout déchet est collecté dans des conteneurs dédiés et mis au rebut en toute sécurité [50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006].

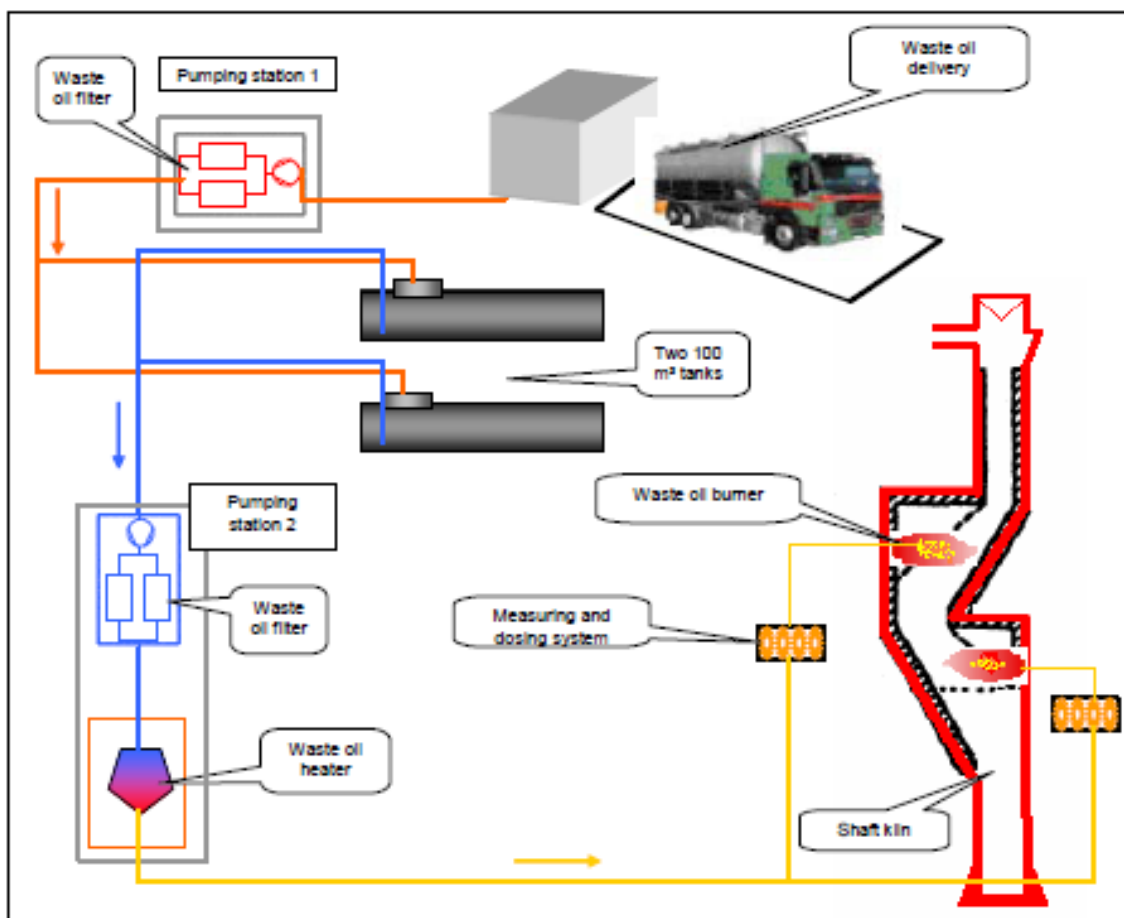


Figure 4.26 : Schéma de principe de la circulation des huiles usagées – de la réception au four vertical (et autres fours)
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]



Figure 4.27 : Station de pompage numéro 2 avec filtre et conteneur à déchets pour le nettoyage du filtre
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]



Figure 4.28 : Station de mesure et de dosage à vannes pneumatiques
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

4.3.4 Fabrication de la chaux – exemple de contrôle qualité des déchets combustibles solides brûlés dans les fours rotatifs

Un exemple de four à chaux allemand illustre les exigences types pour les déchets solides utilisés dans quatre fours rotatifs à préchauffeur. Ces fours rotatifs sont équipés de cyclones et d'un filtre électrostatique afin de réduire les émissions de poussières. De plus, la technique SNCR est utilisée pour réduire les émissions de NO_x (voir section 4.3.5). Dans un four rotatif, les températures types sont de l'ordre de 1000 à 1400°C.

Les combustibles utilisés sont le lignite pulvérisé, le gaz naturel et les déchets solides. Les déchets solides sont fournis par des entreprises spécialisées dans la collecte et le mélange des déchets. L'autorisation permet de remplacer au maximum 60% de la capacité thermique par des déchets. En 2006, le taux de substitution par les déchets solides était de 10%. Avant de fournir ces déchets combustibles solides au brûleur, les parties métalliques sont éliminées à l'aide d'un séparateur magnétique.

La sélection des types de déchets à utiliser comme combustibles dans un four à chaux dépend des exigences techniques du procédé de cuisson et de la qualité du produit. Dans cet exemple, les déchets combustibles se composent de combustibles issus de déchets solides (RDF) à partir de déchets triés ayant de faibles teneurs en polluants (principalement du plastique) et des valeurs calorifiques bien définies. Leur origine et la classification des déchets selon le Catalogue européen des déchets (2000/532/CE) sont spécifiées de manière précise [98, Commission européenne, 2000]. Le tableau 4.39 indique le type de déchets pouvant être utilisés dans ces fours rotatifs [50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006] :

Code déchet	Description générale
0201 04	Déchets plastiques (sauf emballages)
0201 07	Déchets issus de l'exploitation forestière
0301 01	Déchets d'écorces et de bois
0301 05	Sciure, copeaux, chutes, bois, aggloméré et placage autres que ceux mentionnés en 03 01 04
0303 02	Boues de liqueurs vertes (issues de la récupération des liqueurs de cuisson)
0303 07	Rejets mécaniquement séparés et issus de la pâte des déchets de papier et de carton
0303 08	Déchets issus du tri du papier et du carton destinés au recyclage
0402 09	Déchets issus de matériaux composites (textile imprégné, élastomère, plastomère)
0402 21	Déchets issus des fibres textiles non traitées
0402 22	Déchets issus des fibres textiles traitées
0702 13	Déchets plastiques
0801 02	Déchets de peintures et de vernis, excepté ceux mentionnés en 08 01 11
0802 01	Déchets de poudres de revêtement
0901 07	Films photographiques et papier contenant de l'argent ou des composés d'argent
1201 05	Copeaux et tournures de plastique
1501 01 ÷ 03	Emballages en papier et en carton, en plastique, en bois
1501 05 ÷ 06	Emballages composites et mixtes
1502 03	Absorbants, matériaux filtrants, chiffons et vêtements de protection, excepté ceux mentionnés en 15 02 02
1601 03	Pneumatiques en fin de vie
1702 01	Bois
1702 03	Plastiques
1905 01	Fraction non compostée des déchets municipaux et similaires
1912 01	Papier et carton
1912 04	Plastique et caoutchouc

1912 07	Bois autres que ceux mentionnés en 19 02 06
1912 08	Textiles
1912 10	Déchets combustibles (combustibles dérivés de déchets)

Tableau 4.39 : Liste des déchets pouvant être utilisés dans certains fours à chaux allemands [50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006], [98, Commission européenne, 2000]

Les exigences de qualité pour les déchets solides sont déterminées par l'autorité qui délivre les autorisations. Pour chaque livraison, les fournisseurs de combustibles doivent attester que les combustibles prêts à être utilisés comprennent uniquement les déchets mentionnés dans le tableau 4.39.

Pour le contrôle qualité de ces combustibles, les déchets combustibles sont divisés en quatre catégories, qui définissent la plage de valeurs calorifiques nettes et de composition chimique.

Deux paramètres statistiques indiqués dans le tableau 4.40 sont utilisés pour réguler la quantité de métaux introduite dans le four :

- valeur moyenne (= percentile 50 %), également appelée « valeur pratique ». Elle est basée sur l'expérience pratique et prend en considération les variations possibles de la composition du combustible
- valeurs maximales (= percentile 100%).

	Déchet combustible 1		Déchet combustible 2		Déchet combustible 3		Déchet combustible 4	
Polluant	Valeur moyenne (mg/kg)	Valeur maximale (mg/kg)	Valeur moyenne (mg/kg)	Valeur maximale (mg/kg)	Valeur moyenne (mg/kg)	Valeur maximale (mg/kg)	Valeur moyenne (mg/kg)	Valeur maximale (mg/kg)
Mercuré Hg	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0	0,6	1,2
Cadmium Cd	4,0	15,0	4,0	15,0	4,0	10,0	4,0	9,0
Thallium Tl	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	2,0
Arsenic As	5,0	10,0	5,0	10,0	5,0	15,0	5,0	13,0
Cobalt Co	5,0	10,0	5,0	10,0	5,0	10,0	6,0	12,0
Nickel Ni	20,0	100,0	20,0	100,0	20,0	100,0	25,0	50,0
Antimoine Sb	40,0	100,0	40,0	100,0	25,0	60,0	25,0	60,0
Plomb Pb	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	70,0	200,0
Chrome Cr	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	100,0	40,0	120,0
Cuivre Cu	100,0	250,0	90,0	250,0	90,0	500,0	120,0	300,0
Manganèse Mn	50,0	100,0	50,0	100,0	50,0	100,0	50,0	100,0
Vanadium V	10,0	20,0	10,0	20,0	10,0	20,0	10,0	25,0
Étain Sn	15,0	50,0	15,0	50,0	15,0	75,0	30,0	70,0
Quantité totale de chlore	7000,0	10000,0	7000,0	10000,0	7000,0	10000,0	7000,0	10000,0
Quantité totale de fluor	250,0	500,0	250,0	500,0	250,0	1000,0	250,0	1000,0
Béryllium Be	0,5	5,0	0,5	5,0	0,5	5,0	0,5	2,0
Zinc Zn	400,0	500,0	400,0	500,0	400,0	1000,0	400,0	1000,0
	% en poids / poids ¹⁾	% en poids/poids ¹⁾	% en poids/poids ¹⁾	% en poids/poids ¹⁾	% en poids/poids ¹⁾	% en poids/poids ¹⁾	% en poids/poids ¹⁾	% en poids/poids ¹⁾
Humidité	8,0	<10,0	11,0	<12,5	18,0	<20,0	18,0	<20,0
Teneur en	6,0	<7,0	8,0	<9,0	11,0	<15,0	11,0	<15,0

Annexes

cendres								
Quantité totale de soufre	0,3	<0,5	0,3	<0,5	0,2	<0,3	0,2	<0,3
PCB		<3		<1		<1		<1
1) Pourcentage en poids								

Tableau 4.40 : Concentrations moyennes et maximales en métaux pour chaque type de déchet combustible
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

Pour cet exemple, des plages ont été définies pour les valeurs calorifiques nettes de chaque catégorie de combustible, comme cela est indiqué dans le tableau 4.41 :

Valeur calorifique nette (MJ/kg)	Déchet combustible 1		Déchet combustible 2		Déchet combustible 3		Déchet combustible 4	
	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale
	25	31	23	29	20	24	18	22

Tableau 4.41 : Pouvoir calorifique net minimum et maximum pour chaque type de déchet combustible
[50, Allemagne, 2006], [51, EuLA, 2006]

Un échantillonnage régulier des déchets combustibles est effectué. Les échantillons individuels sont divisés en sous-échantillons, qui sont recombinaés par la suite en un échantillon mixte. Au bout d'intervalles de temps prédéterminés, les échantillons mixtes sont vérifiés afin de voir si les exigences de qualité sont conformes à celles indiquées dans le tableau 4.40.

Lorsque l'on utilise des déchets comme combustibles, l'assurance qualité et la garantie sont les éléments les plus importants. Le tableau 4.42 illustre des exemples de mesures/de techniques d'assurance de la qualité.

Étape du procédé	Mesures/techniques	Mesures/techniques supplémentaires
Source de déchets (producteur de déchets, site de tri, traitement mécanico-biologique des déchets)	<ul style="list-style-type: none"> listage des déchets éviter les impuretés, stipulations concernant les qualités acceptables des types de déchets individuels, analyse des déclarations, documentation de la quantité disponible de types de déchets individuels 	<ul style="list-style-type: none"> transmission des informations au producteur de déchets par le responsable « Déchets » contrôle régulier des déchets de production de l'usine par le responsable « Déchets »
Site de traitement des déchets	<ul style="list-style-type: none"> échantillonnage et analyse (réguliers) conservation d'échantillons documentation des quantités de déchets entrantes et traitées 	<ul style="list-style-type: none"> échantillonnage et analyse (réguliers) des quantités de déchets traités entrantes par un expert externe
Site de traitement des déchets	<ul style="list-style-type: none"> échantillonnage et analyse réguliers conservation d'échantillons documentation des quantités de déchets sortantes 	
Four à chaux	<ul style="list-style-type: none"> échantillonnage et analyse réguliers conservation d'échantillons documentation des quantités de déchets entrantes 	

Tableau 4.42 : Exemples de mesures/techniques d'assurance de la qualité des déchets
[156, Allemagne, 2007]

4.3.5 Fabrication de la chaux – exemple de traitement des NO_x en utilisant la technique SNCR dans des fours rotatifs à préchauffeur (PRK)

A l'usine de Flandersbach (Allemagne), des mesures/des techniques primaires et secondaires ont été mises en œuvre avec succès pour quatre fours rotatifs à préchauffeur. Un nouveau brûleur a été installé dans l'un des fours, mais son impact sur les émissions de NO_x était assez limité. L'expérience pratique a montré que la concentration globale en oxygène dans la zone de chauffe avait beaucoup plus d'influence sur ces émissions. Ainsi, l'atmosphère du four a été ajustée afin de réduire la concentration en oxygène. Cependant, il est apparu que cette mesure n'était pas suffisante pour garantir des émissions de NO_x toujours inférieures à 500 mg/Nm³. Notamment en cas de fabrication de chaux vive fortement calcinée, les émissions de NO_x étaient généralement supérieures à 1000 mg/Nm³ (dans des conditions de four stables), et parfois de 2000 mg/Nm³, comme par exemple lorsqu'une quantité d'air de refroidissement plus importante était nécessaire pour empêcher toute surchauffe du refroidisseur de chaux.

En raison des conditions de température sous la grille Lepol, il est possible de réduire les émissions de NO_x en injectant des agents réducteurs dans cette zone. Par conséquent, des tests préliminaires avec différents liquides, différents sites d'injection et différents taux d'injection ont été réalisés afin d'optimiser la conception de l'installation SNCR industrielle, décrite comme suit :

Concept général

Les agents réducteurs liquides sont livrés par camion et stockés dans deux cuves. L'agent liquide est ensuite pompé vers les grilles Lepol, dans lesquelles il est pulvérisé dans les chambres chaudes à l'aide d'air sous pression afin qu'il s'atomise et qu'il se mélange avec les gaz résiduels. L'installation est conçue pour utiliser de l'eau ammoniacale à une concentration maximale de 25%, et doit gérer les réglementations concernant les matières dangereuses.

Remplissage des cuves

Le camion-citerne est déchargé à l'aide d'une pompe, d'une conduite à supervision de fuite, et d'un filtre double destiné à retenir les impuretés. Le conducteur obtient l'autorisation de décharger après enregistrement auprès de la salle de contrôle. La procédure de remplissage n'est pas lancée tant que le camion-citerne n'a pas été mis à la terre. Le remplissage s'arrête automatiquement dès que la cuve est pleine ou dès que le système de contrôle de la pression différentielle des filtres envoie un signal de niveau maximum. Une nouvelle autorisation doit être demandée par le conducteur du camion-citerne après basculement sur l'autre cuve ou le second filtre.

Stockage

Deux cuves, ayant chacune un volume de 80 m³, sont équipées de dispositifs de contrôle et de sécurité, et de pompes de circulation. Afin d'éviter toute surpression ou tout vide, une vanne sensible à la pression est installée au niveau des cuves, et la pression est surveillée à l'intérieur de ces cuves.

Dosage

Une pompe contrôlée par un convertisseur de fréquence est installée pour chaque grille Lepol. Chaque pompe de dosage peut fonctionner en alternance avec chacune des deux cuves. Les pompes sont équipées d'une soupape afin d'empêcher toute augmentation de pression due au blocage du système. Une pompe de secours est installée en cas de panne de l'une des pompes de dosage, peut être enclenchée sur le point d'injection respectif.

Des orifices d'alimentation supplémentaires permettent de rincer les conduites et les filtres avec de l'eau industrielle de façon à les vider de tout composant, comme avant une maintenance par exemple.

Les buses d'atomisation doivent être utilisées aux débits pour lesquels elles ont été conçues. Afin de maintenir les conditions de pulvérisation optimales au niveau des buses d'atomisation, le débit doit être régulé dans les conduites de dosage. Si ce débit chute au-dessous d'une valeur prédéfinie, comme par exemple lorsque les besoins en agent réducteur sont faibles, de l'eau industrielle est ajoutée au système afin d'augmenter cette valeur. Cette option permet également de stocker des agents fortement concentrés et de les diluer afin d'obtenir une bonne répartition dans le flux de gaz résiduaires, et donc d'optimiser le rendement. Lorsque le débit nécessaire de l'agent réducteur augmente, comme par exemple lorsque la concentration en azote des liquides est faible et lorsque le taux de réduction exigé est élevé, une seconde lance est activée au niveau de l'orifice d'injection. Dans le système de commande, une distinction est possible entre les concentrations faibles et les concentrations élevées dans les cuves, et différents modes de dosage sont mis en œuvre.

Toutes les conduites sont isolées et équipées d'un système de chauffage afin d'empêcher le gel pendant l'hiver, et toute cristallisation en cas d'utilisation d'urée liquide.

Site d'injection

L'emplacement des points d'injection a été déterminé au cours de tests dans l'usine de Flandersbach. Les orifices choisis permettent une bonne pénétration et un bon mélange de l'agent avec les gaz résiduaires à un emplacement présentant une faible tendance à former un revêtement pouvant empêcher l'injection. Les points de liaison sont illustrés sur la figure 4.29.

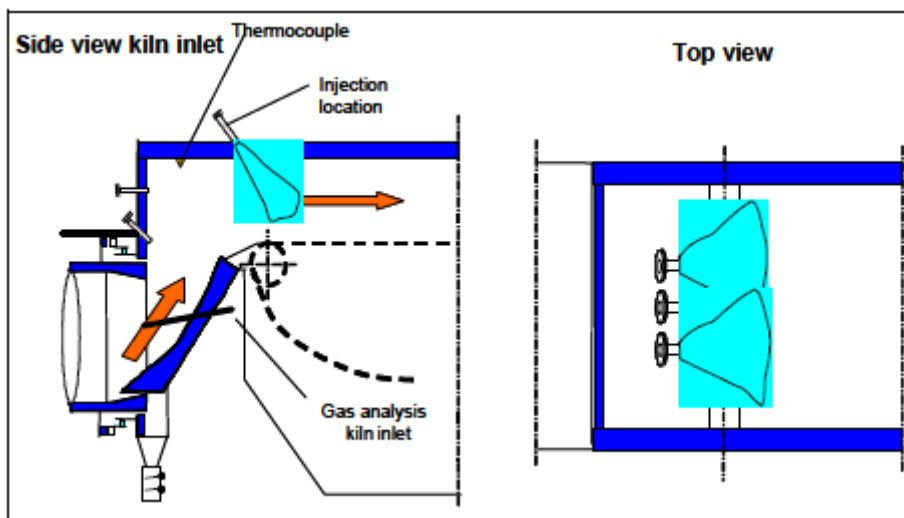


Figure 4.29 : Position des points d'injection et de liaison pour le procédé SNCR à l'usine de chaux de Flandersbach, en Allemagne [93, EuLA, 2006]

Exploitation

L'installation de l'unité a été réalisée en juillet 2006 et la phase de mise en service s'est terminée à la fin du mois d'août 2006. Depuis cette date, l'installation a fonctionné sans aucun problème majeur. Des améliorations nécessaires faisant suite à la phase de mise en service et d'exploitation ont été mises en œuvre depuis.

Efficacité des mesures de réduction

Une efficacité de réduction de 50 à 60% semble possible, permettant ainsi de maintenir un niveau d'émissions de NO_x inférieur à $500 \text{ mg NO}_x/\text{Nm}^3$, comme moyenne journalière. Des taux de réduction plus élevés sont possibles, en principe, mais entraînent immédiatement des fuites d'ammoniac massives. Des mesures réalisées dans différentes conditions de procédé et d'injection ont démontré que les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) restaient toujours inférieures à $10 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

Coûts

L'investissement est similaire à celui mentionné par l'industrie du ciment, c'est-à-dire entre 0,5 à 1,2 million d'euros. Étant donné que l'équipement n'a fonctionné que pendant une courte période de temps (quelques semaines seulement), il est difficile d'évaluer les coûts d'exploitation avec précision. Des estimations financières basées sur les tests préliminaires ont démontré que les coûts d'exploitation pouvaient être similaires à ceux indiqués par l'industrie du ciment, soit 0,1 à 1,7 euro par tonne de chaux pour une capacité de four de 1000 t/jour et des émissions initiales allant jusqu'à $1500 \text{ mg de NO}_x/\text{Nm}^3$.